

МЕЖДУНАРОДНАЯ БАЙКАЛЬСКАЯ МОЛОДЕЖНАЯ НАУЧНАЯ ШКОЛА ПО ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКЕ

Труды

XVIII Конференции молодых ученых

«Взаимодействие полей и излучения с веществом»

Иркутск 2024

УДК 004, 004.89, 517.95, 52, 520.16, 520.18, 520.362, 523.4, 523.62, 523.62-726, 523.9, 523.9-7, 523.94, 523.942, 523.98, 523.945, 523.985, 523.9-7, 523.985-125, 523.985.3, 524.1, 524.1-352, 524.338.5, 524.1-550.3, 524.834, 530.12, 530.182, 532.2, 533.852.3, 533.9.01, 533.9.08, 533.933, 533.95, 533.951, 533.951.2, 533.951.7, 533.951.8, 534.222.1, 535.15, 535.3, 535.31, 535.35, 535.36, 535.42, 535.44, 537.523.4, 537.591, 537.86, 537.876, 537.877, 538.566.2, 539.123, 539.17, 550.3, 550.385, 550.388.2, 550.388.8, 551.501, 551.506.3, 551.510, 551.510.522, 551.510.528, 551.510.533, 551.510.535, 551.511, 551.511.31, 551.513.11, 551.515.8, 551.540.42, 551.55, 551.594.12, 621.372.8, 621.39, 621.391, 621.396, 621.396.67, 621.396.94, 621.396.96.

Труды XVIII Конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом»

Настоящий сборник состоит из двух частей. В первую включены лекции, прочитанные на Международной Байкальской молодежной научной школе по фундаментальной физике (БШФФ-2024), посвященной актуальным проблемам физики ближнего космоса и астрофизики.

Во вторую часть включены доклады, представленные на XVIII научной конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом», которая традиционно проводится в рамках БШФФ. Тематика докладов охватывает широкий круг актуальных проблем астрофизики и физики Солнца, физики околоземного космического пространства, физики нижней и средней атмосферы, теоретической физики, лазерной физики. Особое внимание уделено исследованиям ионосферы и атмосферы Земли, изучению активных процессов на Солнце и космических лучей, а также разработке и оптимизации инструментов и методов гелиогеофизических исследований.

The issue consists of two parts. The first one includes lectures given at the Baikal Young Scientists' International School on Fundamental Physics (BSFP-2024).

The second part includes reports presented at the XVIII Young Scientists' Conference "Interaction of Fields and Radiation with Matter" which is traditionally held in the frame of BSFP. Topics of reports cover the wide spectrum of urgent problems of astrophysics, solar physics, physics of near-Earth space, physics of low and middle atmosphere, theoretical physics, and laser physics. The special attention is given to research into the Earth's ionosphere and atmosphere, active processes on the Sun, cosmic rays, as well as into development and optimization of instruments and techniques for heliogeophysical investigations.

Ответственный редактор — И.П. Яковлева

Редакторы — Е.Н. Коржова, И.В. Кравцов

*Материалы, представленные для публикации,
печатаются в авторской редакции.*

Организаторы мероприятия:

- Ордена Трудового Красного Знамени Институт солнечно-земной физики СО РАН;
- Иркутский государственный университет;
- Физический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова;
- Российский новый университет

НЕЛИНЕЙНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В F-ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МОЩНЫМИ РАДИОВОЛНАМИ КВ-ДИАПАЗОНА НЕОБЫКНОВЕННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Н.Ф. Благовещенская

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, С. Петербург, Россия,
nataly@aari.ru

NON-LINEAR PHENOMENA IN THE IONOSPHERIC F-REGION INDUCED BY EXTRAORDINARY POLARIZED POWERFUL HF RADIO WAVES

N.F. Blagoveshchenskaya

State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia,
nataly@aari.ru

Аннотация. В лекции представлены результаты исследований основных нелинейных явлений в F-области ионосферы, вызванных воздействием мощных радиоволн КВ-диапазона необыкновенной поляризации, излучаемых стендом EISCAT/Heating (г. Тромсе, Норвегия).

Ключевые слова: мощная КВ радиоволна, поляризация, высокоширотная ионосфера, нелинейные явления.

Abstract. The lecture describes investigation results of main non-linear phenomena in the ionospheric F-region induced by powerful HF radio waves radiated by EISCAT/Heating facility (Tromsø, Norway).

Keywords: powerful HF radio wave, polarization, high latitude ionosphere, non-linear phenomena.

Физические эксперименты в естественной свободной плазме (ионосфере) с использованием контролируемой инъекции мощных радиоволн КВ-диапазона в верхнюю (F-область) ионосферу позволяют изучать широкий спектр ионосферных возмущений, нелинейных явлений, механизмы возбуждения турбулентностей и плазменных волн, плазменные и гиромагнитные резонансы, механизмы ускорения электронов. Для модификации верхней ионосферы (F-область) традиционно на всех нагревных стендах мира используются мощные КВ радиоволны обыкновенной (O-мода) поляризации. Это вызвано тем, что радиоволны необыкновенной (X-мода) поляризации в фоновой (невозмущенной) ионосфере отражаются существенно ниже высоты отражения мощной КВ радиоволны O-поляризации, и, более того, ниже области существования квазиэлектростатических плазменных волн (ленгмюровских и верхнегибридных). Вследствие этого они не должны вызвать генерацию этих волн и, как следствие, возбуждение искусственной ионосферной турбулентности и явлений, её сопровождающих. Однако результаты многолетних экспериментальных исследований на КВ нагревном стенде EISCAT/Heating (г. Тромсе, Норвегия), полученные специалистами ААНИИ, впервые показали возможность генерации искусственных возмущений, вызванных воздействием мощной КВ радиоволны X-поляризации на высокоширотную F-область ионосферы, которые могут превосходить по интенсивности возмущения при O-нагреве. Для диагностики

эффектов воздействия мощных КВ радиоволн использовались: радар некогерентного рассеяния (933 МГц), пространственно совмещенный с нагревным стендом, когерентный радар CUTLASS (SuperDARN) в Финляндии, оптические камеры всего неба ALIS в Скандинавии, аппаратура, установленная на обсерватории ААНИИ вблизи г. С. Петербург, для дистанционной диагностики узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы и мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей методом ракурсного рассеяния.

В лекции кратко описаны основные нелинейные явления, возникающие в F-области ионосферы, при X-нагреве на частотах как ниже, так и выше критической частоты необыкновенной компоненты слоя F2 ($f_H \leq f_x F2$ и $f_H > f_x F2$, где $f_x F2 = f_o F2 + f_{ce}/2$, f_{ce} – гирочастота электронов). Рассмотрены условия генерации, характеристики и пороги возбуждения дактов повышенной электронной плотности, мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН), искусственного свечения в красной (630 нм) и зеленой (557.7) линиях атомарного кислорода, ленгмюровских и ионно-акустических плазменных волн, узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы (УИРИ). Обсуждаются физические процессы, лежащие в основе этих нелинейных явлений. Уделено внимание результатам сравнения эффектов воздействия мощных КВ радиоволн O- и X-поляризации на F-область ионосферы.

MONITORING TECHNIQUES AND METHODS OF ATMOSPHERIC CHARACTERISTICS AT HIGH ALTITUDE OBSERVATORIES ABOVE THE TIBETAN PLATEAU

Yongqiang Yao, Xuan Qian

National astronomical observatory, Chinese academy of sciences

Abstract. Since the atmospheric conditions at an observatory are of great importance for ground-based astronomical observations, and based on the key atmospheric elements influencing astronomical observations in different wavelengths, such as cloud cover, precipitable water vapor, wind, optical turbulence, atmospheric transparency, radiation, and so on, a lot of research on measurement techniques and methods for obtaining atmospheric characteristics have been carried out. In addition to the atmospheric characteristics of the whole layer, that in the near-surface layer especially the boundary layer are particularly essential for ground-based photoelectric equipment, as well as the characteristics in the upper air, in particular, in the near space, affecting the monitoring equipment, experimental platform, laser transmission, etc. in the upper atmosphere. In this study, based on the site survey of multiband observatories over China, as well as the site testing at the Ali observatory located on the most western Tibetan Plateau, at an altitude above 5050 m above sea level, a series of monitoring techniques and methods for obtaining the characteristics of atmosphere from ground to upper air will be introduced.

Key words: atmospheric characteristics, cloud cover, precipitable water vapor, optical turbulence, atmospheric transparency, radiation, numerical model, atmospheric radiation transmission model, machine learning, Ali observatory.

О НАИБОЛЕЕ ИНТЕРЕСНЫХ СОБЫТИЯХ В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ И КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ В 2023–2024 ГГ.

М.А. Абунина, Н.С. Шлык, С.М. Белов, А.В. Белов, А.А. Абунин

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова
Российской Академии наук (ИЗМИРАН), Москва, Троицк, Россия, abunina@izmiran.ru

ON THE MOST INTERESTING EVENTS IN THE SOLAR WIND AND COSMIC RAYS IN 2023-2024

M.A. Abunina, N.S. Shlyk, S.M. Belov, A.V. Belov, A.A. Abunin

Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation
of Russian Academy of Sciences, Moscow, Troitsk, Russia, abunina@izmiran.ru

Аннотация. Исследуются наиболее интересные крупномасштабные возмущения солнечного ветра, приведшие к значительной модуляции космических лучей и регистрации геомагнитных бурь за последние два года. Проведен анализ и представлено описание солнечных и межпланетных источников этих событий.

Ключевые слова: солнечный ветер, геомагнитные бури, межпланетные возмущения, Форбуш-эффекты

Abstract. The most interesting large-scale solar wind disturbances, which led to significant modulation of cosmic rays and registration of geomagnetic storms over the past two years, are studied. An analysis and a description of solar and interplanetary sources of these events are presented.

Keywords: solar wind, geomagnetic storms, interplanetary disturbances, Forbush effects

ВВЕДЕНИЕ

Изучение отдельных экстремальных возмущений межпланетной среды, космических лучей (КЛ), геомагнитной активности (ГА) и их солнечных источников позволяет оценить мощность циклов солнечной активности (СА), а также выделить их некоторые особенности. По отдельным наиболее интересным и редким событиям в научном сообществе публикуются десятки работ. Так, например, наиболее интересными событиями прошедшего 24-го цикла СА с точки зрения геомагнитных бурь и Форбуш-эффектов (ФЭ) можно считать 8–11 марта 2012 г., 22–24 июня 2015 г. и 7–8 сентября 2017 г., когда были зарегистрированы и самые значительные по величине ФЭ (11.2, 9.1 и 7.7%, соответственно), и наиболее мощные геомагнитные бури ($K_{\text{pmax}} = 8, 8+$ и $8+$).

В начале 25-го цикла СА 3–5 ноября 2021 г. было зарегистрировано мощное межпланетное возмущение, во время которого был зарегистрирован и большой ФЭ (9.8%), и очень большая магнитная буря ($K_{\text{pmax}} = 8$). Однако в 2023–2024 гг., когда по некоторым оценкам была фаза максимума цикла [Nandy, 2021; Obridko et al., 2021], наблюдался ряд достаточно мощных межпланетных возмущений, некоторые из которых мы будем рассматривать в данной статье.

Цель данной работы: выделить и исследовать крупномасштабные возмущения солнечного ветра и связанные с ними вариации плотности КЛ (жесткостью 10 ГВ) в 2023–2024 гг., описать солнечные источники наиболее мощных событий фазы максимума 25-го цикла СА.

ДАнные И МЕТОды

В работе используется база данных ФЭ и межпланетных возмущений (FEID — Forbush effects and Interplanetary Disturbances), созданная в ИЗМИРАН, которая сейчас доступна онлайн

(<http://tools.izmiran.ru/feid/>). Часовые вариации плотности и анизотропии КЛ в FEID рассчитаны методом глобальной съемки [Belov et al., 2018] для частиц с жесткостью 10 ГВ. Часовые значения скорости солнечного ветра (СВ), межпланетного магнитного поля (ММП), индексов ГА, данные по SSC, корональным дырам, корональным выбросам массы (КВМ), магнитным облакам (МО), солнечным вспышкам и др. добавлены в FEID и берутся из открытых Интернет-источников. Данные нейтронных мониторов (НМ) в реальном времени (<https://www.nmdb.eu/>) отбираются в соответствии с методом кольца станций (МКС, [Abunina et al., 2020]). Отметим, что МКС используется для изучения аномалий (предпонижений и предповышений) в интенсивности КЛ, обычно предшествующих значительным ФЭ. Предпонижения, по видимому, можно объяснить эффектом «конуса потерь», в котором Земля оказывается магнитно связанной с обедненной КЛ областью за фронтом ударной волны [Belov et al., 1995; Leerungnavarat et al., 2003], в то время как предповышения вызваны ускорением галактических КЛ на фронте приближающихся возмущений в результате отражения частиц от ударной волны [Belov et al., 1995; Kudela, Storini, 2006].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В 2020 г. начался новый цикл СА. И сейчас он уже приближается к максимуму: в 2023–2024 гг. наблюдался значительный рост солнечной и геомагнитной активности. Многочисленные мощные солнечные события вызвали отклик в магнитосфере Земли и были зарегистрированы большие магнитные бури, а также значительные ФЭ. Ниже описываются наиболее интересные, с нашей точки зрения, события в космических лучах и межпланетной среде и их солнечные источники за последние два года.

Апрель 2023 г.

21 апреля в 17:44 UT в активной области (АО) 13283 к северу от южной полярной корональной дыры была зарегистрирована вспышка M1.7 (S22W11), после которой на коронографе SOHO/LASCO в 18:12 UT наблюдалось КВМ типа гало с начальной скоростью 1284 км/с.

Вышеупомянутое межпланетное возмущение достигло орбиты Земли через двое суток (рис. 1а): 23 апреля в 17:38 UT началась очень большая магнитная буря ($Kp_{max} = 8+$, с проходящими значениями $Kp=9$, $Dst_{min} = -212$ нТл). В описываемом межпланетном возмущении скорость СВ достигала значения 706 км/с, а величина индукции ММП – 33.6 нТл, к тому же было зарегистрировано МО (с 01:00 UT 24 апреля длительностью 42 ч). Важно отметить, что повышенная скорость СВ (около 500 км/с) сохранялась на протяжении второй половины МО, что можно связать с воздействием высокоскоростного потока из южной полярной корональной дыры. Также был зарегистрирован один из самых больших по величине в 25-м цикле СА ФЭ с амплитудой $AF=7.2$ % (до 2024 г. самым большим считался ФЭ с амплитудой 9.8 % в ноябре 2021 г.). На рис. 1б особенно заметен эффект предвозрастания (синие кружки обозначают положительную вариацию скорости счета), начинающийся примерно за 36 ч до начала события на НМ, обращенных к Солнцу, а затем распространяющийся на все станции, поскольку фронт межпланетного возмущения приближался к Земле.

Этот эффект был настолько силен на данной выборке станций, что преобладает над ожидаемым уменьшением КЛ в течение нескольких часов после ударной волны (SSC), пока не началось МО (заштрихованная желтым область).

Март 2024 г.

24 марта 2024 г. был зарегистрирован большой ФЭ (~15 % по данным станции НМ Оулу, а по усредненным данным станций НМ, используемых в МКС, >12 %). Солнечным источником данного события стал КВМ (от 23 марта 2024 г. в 01:25 UT с $V_0 = 1613$ км/с), который был связан с солнечной вспышкой класса X1.1 из АО 3614 (23 марта 2024 г. в 01:33 UT). Ударная волна соответствующего межпланетного КВМ была зарегистрирована в 14:10 UT 24 марта 2024 г. (рис. 2). Кроме того, 20–22 марта 2024 г. центральный меридиан проходила корональная дыра, высокоскоростной поток из которой стал дополнительным источником высокой скорости СВ у Земли. Во время этого межпланетного возмущения максимальная скорость СВ составила более 850 км/с, а ММП увеличилось до значения 31 нТл (рис. 2а). Что касается геомагнитной активности, то была зарегистрирована очень большая геомагнитная буря ($Kp_{max} = 8$, $Dst_{min} = -130$ нТл). Долготно-временное распределение вариаций КЛ для ФЭ 24 марта 2024 г. представлено на рис. 2б. Имеются явные признаки предвозрастания на долготах >150° за несколько часов до начала события.

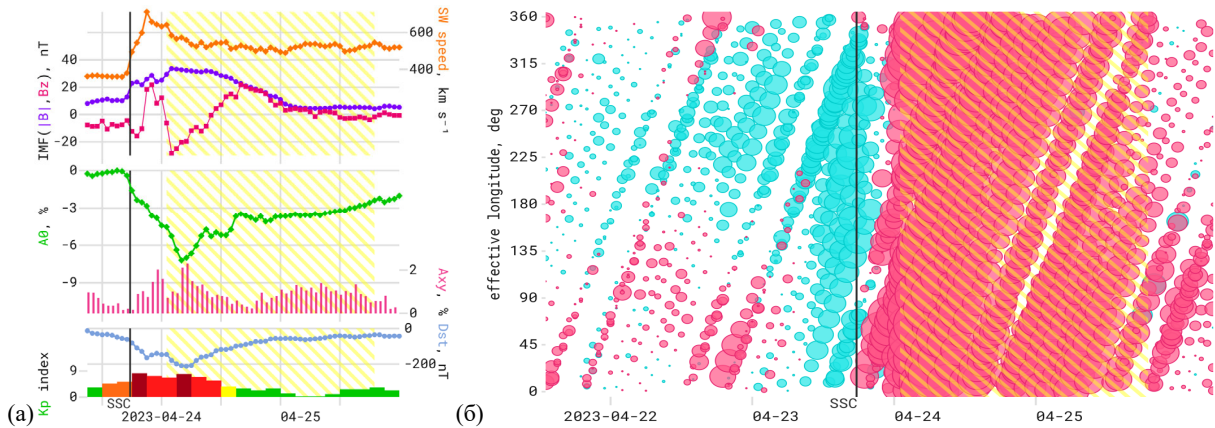


Рис. 1. (а) Данные скорости СВ, ММП, КЛ, ГА; (б) МКС для события 23 апреля 2023 г.

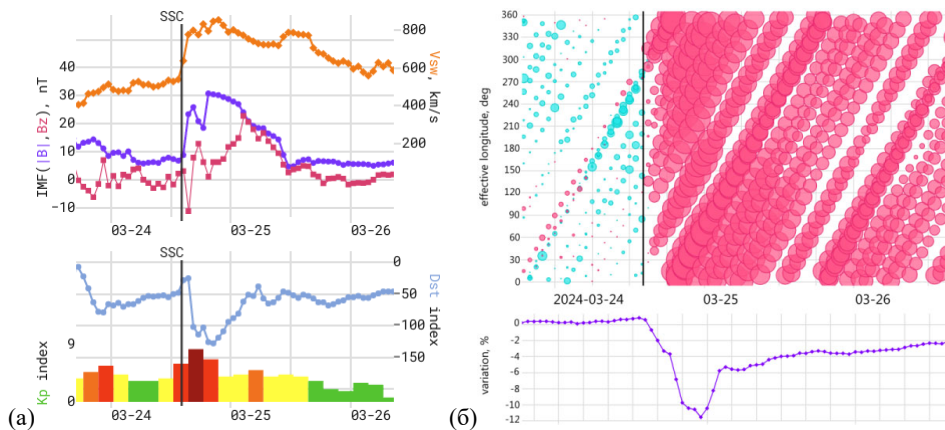


Рис. 2. (а) Данные скорости СВ, ММП и ГА; (б) МКС для события 24 марта 2024 г. и усредненный ФЭ по станциям НМ, используемых в МКС

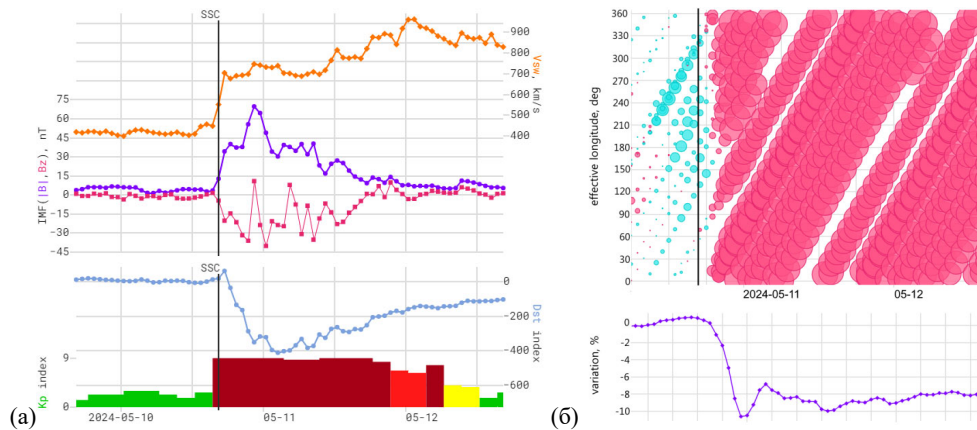


Рис. 3. (а) Данные скорости СВ, ММП и ГА; (б) МКС для события 10 мая 2024 г. и усредненный ФЭ по станциям НМ, используемых в МКС

Май 2024 г.

8–11 мая 2024 г. на Солнце была зарегистрирована серия больших вспышек из АО 13364 и связанных с ними мощных КВМ типа гало (со скоростями >1000 км/с). Начало геомагнитных возмущений во второй половине 10 мая (около 16:30 UT) связано с воздействием корональных выбросов от 8 мая. В связи высокой скоростью (>700 км/с) этого межпланетного возмущения, очень большими значениями ММП (>50 нТл) и длительными (>12 ч) отрицательными значениями B_z (<-15 нТл) на Земле началась самая мощная геомагнитная буря за последние 20 лет. K -индекс геомагнитной активности возрос до значения 9Z, а Dst -индекс достиг значения -412 нТл, к тому же значение K -индекса держалось на уровне 8–9 более суток. Во время данной магнитной бури максимальные значения скорости СВ у Земли достигли значения 994 км/с, а ММП — 73 нТл. По усредненным данным станций НМ, используемых в МКС, ФЭ достиг значения ~ 10 %. На рис. 3б явно видно предвозрастание на долготах $>120^\circ$ за несколько часов до развития события.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В 2023–2024 гг. наблюдалось множество значительных ФЭ и ГА; самые мощные возмущения были описаны в этой статье. Каждое из этих событий характеризуется сложным поведением параметров СВ и КЛ и связано с несколькими солнечными источниками. Также, перед мощными межпланетными возмущениями обычно наблюдаются предвестники в данных космических лучей за несколько часов до регистрации события у Земли. Можно с большой долей вероятности говорить, что этот период является периодом максимума солнечной активности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Abunina M.A., Belov A.V., Eroshenko E.A., et al. Ring of stations method in cosmic rays variations research // *Solar Phys.* 2020. V. 295. ID 69.
- Belov A. V., Eroshenko E. A., Yanke V. G., et al. Global survey method for the world network of neutron monitors // *Solar Phys.* 2018. V. 293. ID 68.
- Nandy D. Progress in Solar Cycle predictions: Sunspot Cycles 24–25 in perspective // *Solar Phys.* 2021. V. 296. ID 54.
- Obridko V.N., Sokoloff D.D., Shibalva A.S., et al. Zonal harmonics of solar magnetic field for solar cycle forecast // *J. Atmosph. Solar-Terr. Phys.* 2021. V. 225. ID 105743.
- Kudela K., Storini M. Possible tools for space weather issues from cosmic ray continuous records // *Adv. Space Res.* 2006. V. 37. P. 1443–1449.
- Leerungnavarat K., Ruffolo D., Bieber J.W. Loss cone precursors to Forbush decreases and advance warning of space weather effects // *Astrophys. J.* 2003. V. 593. P. 587–596.
- Belov A.V., Dorman L.I., Eroshenko E.A., et al. Search for predictors of Forbush decreases, Proc. 24th ICRC. Rome, Italy. 1995. V. 4. P. 888-891.
- URL: <http://tools.izmiran.ru/feid/> (дата обращения 21.05.2024)
- URL: <https://www.nmdb.eu/> (дата обращения 21.05.2024)

КИНЕТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕТЕПЛОВЫХ АТМОСФЕРНЫХ ПОТЕРЬ ДЛЯ ЭКЗОПЛАНЕТЫ π Men с ПОД ДЕЙСТВИЕМ РОДИТЕЛЬСКОЙ ЗВЕЗДЫ

А.А. Автаева, В.И. Шематович

Институт астрономии Российской академии наук, Москва, Россия, nastyaavt@gmail.com

KINETIC MODELING OF NON-THERMAL ATMOSPHERIC LOSSES FOR EXOPLANET π Men с FORCED BY THE HOST STAR

А.А. Avtaeva, V.I. Shematovich

Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, nastyaavt@gmail.com

Аннотация. В работе представлены результаты кинетического моделирования нетепловых потерь верхней атмосферы экзопланеты π Men с под действием родительской звезды. Во-первых, детально рассматривалось влияние диссоциации молекулярного водорода в процессах экзотермической фотохимии под действием жесткого УФ излучения родительской звезды и образование дополнительного нетеплового потока убегающего вещества из атмосферы. Во-вторых, изучалось влияние высокоэнергетичных протонов звездного ветра на нагрев верхних слоев атмосферы экзопланеты.

Ключевые слова: экзопланеты, кинетическое моделирование, звездный ветер, УФ излучение.

Abstract. This paper presents a kinetic modeling of the non-thermal losses of the upper atmosphere of the exoplanet π Men c under the action of the host star. Firstly, the effect of dissociation of molecular hydrogen in the processes of exothermic photochemistry under the action of hard UV radiation from the parent star and the formation of an additional non-thermal flux of escaping matter from the atmosphere were considered in detail. Secondly, the influence of high-energy protons of the stellar wind on the heating of the upper atmosphere of the exoplanet was studied.

Keywords: exoplanets, kinetic modeling, stellar wind, UV radiation.

ВВЕДЕНИЕ

В работе рассматриваются нетепловые процессы, влияющие на потерю вещества атмосферами экзопланет. Родительская звезда оказывает основное влияние на эволюцию экзопланеты и её атмосферы. В случае горячей экзопланеты, из-за относительно близкого расположения звезды и планеты (расстояние между ними менее 0.1 а.е.), влияние звезды существенно возрастает. В основном все рассматривают тепловые процессы потери атмосферы [Shaikhislamov et al., 2020].

Существуют также нетепловые процессы, влияющие на частицы атмосферы, в частности, жесткое ультрафиолетовое (УФ) излучение (1–100 нм) родительской звезды, проникающее глубоко в верхнюю атмосферу экзопланеты, его поглощение атмосферой сопровождается образованием надтепловых частиц с энергиями больше 5 кТ в процессах экзотермической фотохимии [Avtaeva, Shematovich, 2021]. Аналогично, в столкновениях с перезаряженными протонами звездного ветра (ЗВ) атмосферные атомы и молекулы приобретают избыточную энергию, переходя в разряд надтепловых частиц [Avtaeva, Shematovich, 2023].

СИСТЕМА ЗВЕЗДА π MENSAE И ЭКЗОПЛАНЕТА π MEN c

Изучаемая в работе экзопланета π Men c является периферийной планетой между суб-нептуном и супер-землями из-за своего относительно малого размера ($R_p = 2.06 \pm 0.03 R_{\text{Earth}}$ и $M_p = 4.52 \pm 0.81 M_{\text{Earth}}$ [Gandolfi et al., 2018]). Такие размеры соответствуют границе ущелья Фултона (1.6–2.2 R_{Earth} , [Fulton и др., 2017]) в распределении по радиусам, со стороны суб-нептунов. Экзопланета π Men c имеет среднюю плотность 2.82 г см⁻³, что позволяет отнести ее к типу горячих суб-нептунов имеющих первичную, либо близкую к первичной переходную, атмосферу с преимущественным содержанием водорода.

Родительская звезда π Mensae является звездой солнечного типа ($M_{\text{Star}} = 1.02 M_{\text{Sun}}$, $R_{\text{Star}} = 1.01 R_{\text{Sun}}$; [Gandolfi et al., 2018]) и принадлежит классу G0 V, что удобно для дальнейших расчетов и построений аэрономических моделей. При этом, π Mensae достаточно молодая звезда — 3 млрд. лет, но относительно спокойная, что позволяет в расчетах использовать стационарный поток жесткого УФ излучения и поток протонов звездного ветра от родительской звезды.

Суб-нептун π Men c располагается близко к своей родительской звезде, на расстоянии 0.067 а.е., что делает влияние родительской звезды существенным. В используемых нами моделях нетепловой потери атмосферы экзопланеты требуется модельная нейтральная атмосфера, в которой учитывается тепловое гидродинамическое убегание атмосферы и гидродинамическое поджатие атмосферы, поэтому в качестве начальных данных использовались данные из аэрономической модели [Shaikhislamov et al., 2020]. Концентрации основных компонент атмосферы представлены на рис. 1.

Рассматриваемая область атмосферы экзопланеты находится в пределах от 1 R_p до 19 R_p , как показано на рис. 1. От звезды к планете движутся два потока энергии: жесткое УФ излучение (XUV) и протоны звездного ветра (H^+_{sw}), с высокими энергиями.

1) XUV проходит глубоко в атмосферу без ионизаций и на высоте ниже примерно 5 R_p начинается образование надтепловых атомов водорода в процессах диссоциации и диссоциативной ионизации молекулярного водорода под действием УФ излучения (формулы представлены в рамке в зеленой области рис. 1). Зеленая область рис. 1 (от 2.5 R_p до 4.7 R_p) — область взаимодействия XUV и H_2 , эта же область является переходной областью $H \rightarrow H_2$, где процессы экзотермической фотохимии начинают преобладать, по сравнению с остальными высотами.

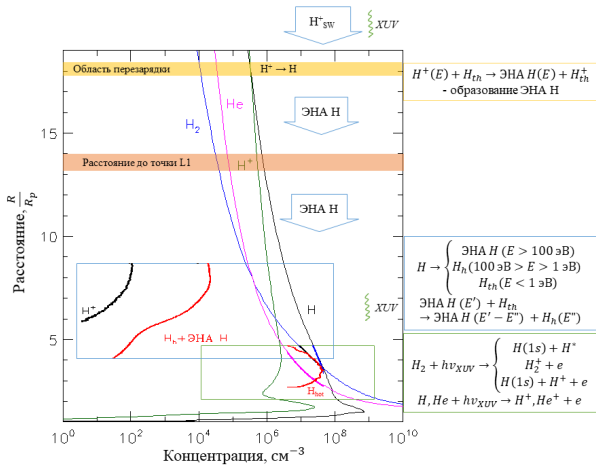


Рис. 1. Схематичное представление воздействия родительской звезды на атмосферу экзопланеты π Меп с

2) Протоны звездного ветра H^+_{sw} обмениваются зарядом с нейтральными атомами водородной короны в области перезарядки (желтая область рис. 1), находящейся примерно на высоте $18 R_p$, в результате происходит образование нейтральных атомов водорода (ЭНА Н) с высокими энергиями, которые проходят вглубь атмосферы (формулы представлены в желтой рамке рис. 1). Далее происходит взаимодействие ЭНА Н с атмосферными атомами водорода (формулы представлены в рамке в голубой области рис. 1). Голубая область рис. 1 (от $4.0 R_p$ до $8.6 R_p$) — область исследования взаимодействия ЭНА Н и атмосферного водорода, с образованием сверхтепловой фракции водорода.

То, что точка Лагранжа L1 находится между планетой и звездой на расстоянии $13.6 R_p$ от центра планеты (оранжевая область рис. 1), дает возможность не учитывать гравитацию родительской звезды для исследуемых областей.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

В исследовании использовались разработанные ранее кинетические модели для расчета образования, столкновений и переноса частиц, образующихся в процессах экзотермической фотохимии [Avtaeva, Shematovich, 2021] и в процессах высыпания протонов и атомов водорода с высокими энергиями в планетные атмосферы [Avtaeva, Shematovich, 2023].

Убегающий поток надтепловых Н за счет экзотермической фотохимии через верхнюю границу ($4.0 R_p$ — черная линия, рис. 2) получился равен $1.35 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, тогда как тепловой поток убегающего вещества, рассчитанный по формуле Джинса равен $4.67 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Потоки сравнимы между собой, что позволяет с уверенностью сказать, что нетепловые процессы вносят существенный вклад в убежание вещества из атмосферы, одновременно меняя относительный химический состав атмосферы.

Проведенные расчеты показали, что энергия проникающего в атмосферу потока ЭНА Н, образующегося при перезарядке H^+_{sw} с тепловыми атомами водородной короны преимущественно идет на

нагрев водородной короны горячей экзопланеты, а прямой поток убегания (для сравнения числовой спектр — красная линия на рис. 2) за счет перезарядки H^+_{sw} существенно меньше теплового потока убегания и не компенсирует проникающий в атмосферу поток ЭНА Н.

На рис. 1 красным представлены высотные профили концентраций надтепловой фракции атомов водорода, полученные в наших расчетах.

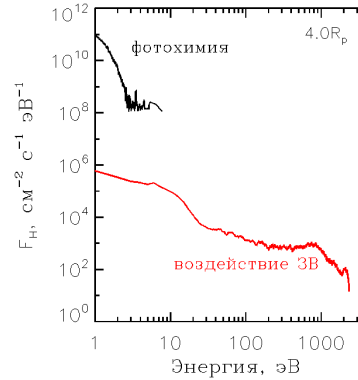


Рис. 2. Расчетные спектры восходящих числовых потоков надтепловых атомов водорода на расстоянии $4.0 R_p$ от центра экзопланеты π Меп с. Красным представлен поток надтепловых атомов Н, образующихся за счет перезарядки протонов ЗВ. Черным представлен поток надтепловых атомов Н, образующийся за счет процессов экзотермической фотохимии

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Атмосферный нагрев плазмой звездного ветра важен лишь в самых внешних областях протяженной водородной короны. По расчетам высотного распределения надтепловой фракции атомарного водорода (рис. 1, красная линия в синей области), образующейся за счет переноса энергии в столкновениях высокоэнергичных атомов Н с тепловыми атомами протяженной водородной короны горячего суб-нептуна π Меп с, данная фракция является лишь малой примесью к тепловой фракции Н в короне экзопланеты. При этом поток нетепловой потери вещества атмосферой за счет экзотермической фотохимии сравним с тепловой потерей атмосферой. Оба этих процесса существенно влияют на атмосферу экзопланеты, меняя относительный химический состав и среднее распределение температуры вещества и должны учитываться в аэрономических моделях.

Полученные относительно низкие скорости потери атомарного водорода из атмосферы, могут являться свидетельством того, что в атмосфере π Меп с не преобладает водород, что может быть подтверждено в поисках планетного атмосферного поглощения на длинах волн линий более тяжелых элементов, таких как Не, С и О. В то время, как ранее потенциал обитаемости экзопланеты оценивался по ее радиусу, массе и расстоянию от родительской звезды, в настоящее время происходит переход к новой версии оценки обитаемости — основное внимание уделяется химическому составу, особенно наличию атмосферных биомаркеров, а также климату в зависимости от влияния и активности родительской звезды.

Работа выполнена при поддержке проекта РФФ 22-12-00384.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Avtaeva A. A., Shematovich V. I. Nonthermal Atmospheric Loss of the Exoplanet GJ 436b due to H₂ Dissociation Processes // *Solar System Research*. 2021. V. 55. ISS. 2. P. 150–158.

Avtaeva A. A., Shematovich V. I. Kinetic Model of the Effect of the Stellar Wind on the Extended Hydrogen Atmosphere of the Exoplanet π Men c // *Astronomy Reports*. 2023. V. 67, N. 10. P. 979–990.

Fulton B. J., Petigura E. A., Howard A. W., Isaacson H., Marcy G. W., Cargile P. A., Hebb L., Weiss L. M., Johnson J. Asher, Morton T. D., Sinukoff E., Crossfield I. J. M., Hirsch L. A. The California-Kepler Survey. III. A Gap in the Radius Distribution of Small Planets // *Astronomical J*. 2017. V. 154. P. 109 (19 PP.).

Gandolfi D., Barragán O., Livingston J. H., and 29 more. TESS's first planet. A super-Earth transiting the naked-eye star π Mensae // *Astronomy & Astrophysics*. 2018. V. 619. P. id. L10 (10 PP.).

García Muñoz A., Youngblood A., Fossati, L., Gandolfi D., Cabrera J., Rauer H. Is π Men c's Atmosphere Hydrogen-dominated? Insights from a Non-detection of H I Ly α Absorption // *The Astrophysical Journal Letters*. 2020. V. 888. P. id. L21 (12 PP.).

Shaikhislamov I.F., Fossati L., Khodachenko M.L., Lammer H., García Muñoz A., Youngblood A., Dwivedi N.K., and Rumenskikh M.S. Three-dimensional hydrodynamic simulations of the upper atmosphere of pi Men c: comparison with Ly-alpha transit observations // *Astronomy & Astrophysics*. 2020. V. 639. P. id. A109 (7 PP.).

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ И ТЕПЛОВОГО ДИСБАЛАНСА НА ДИНАМИКУ МЕДЛЕННЫХ МАГНИТОАКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В МАГНИТНОСТРУКТУРИРОВАННОЙ ПЛАЗМЕ

Д.В. Агапова^{1,2}, Д.И. Завершинский^{1,2}, Н.Е. Молевич^{1,2}, С.А. Белов¹

¹ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, Самара, Россия, agapovadaria2019@gmail.com

² Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Самара, Россия

EFFECT OF THERMAL CONDUCTIVITY AND THERMAL MISBALANCE ON THE DYNAMICS OF SLOW MAGNETOACOUSTIC WAVES IN A MAGNETICALLY STRUCTURED PLASMA

D.V. Agapova^{1,2}, D.I. Zavershinskii^{1,2}, N.E. Molevich^{1,2}, S.A. Belov¹

¹ Samara National Research University, Samara, Russia, agapovadaria2019@gmail.com

² Samara Branch of P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Samara, Russia

Аннотация. В данной работе получено дисперсионное соотношение для магнитоакустических волн, распространяющихся в термически активной плазме с учетом теплопроводности, нагрева и радиационного охлаждения. Совместное влияние геометрической дисперсии, нагрева и охлаждения приводит к модификации трубочной скорости медленных магнитоакустических волн, которая отличается от скорости в идеальной плазме. Коротковолновым предельным значением фазовой скорости медленных волн является изотермическая звуковая скорость, которая объясняется наличием теплопроводности.

Ключевые слова: магнитоакустические волны, нагрев, теплопроводность, радиационное охлаждение.

Abstract. In this paper, the dispersion relation of magnetoacoustic waves propagating in a thermally active plasma is derived, taking account of thermal conduction, heating, and radiative cooling. The combined effects of geometric dispersion, heating, and cooling lead to a modification of the tube velocity of slow magnetoacoustic waves, which is different from the velocity in an ideal plasma. The short-wave limiting value of the phase velocity of slow waves is the isothermal sound velocity, which is due to the presence of thermal conduction.

Keywords: magnetoacoustic waves, heating, thermal conductivity, radiative cooling.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение физических процессов, происходящих в солнечной атмосфере, является ключевой областью солнечной физики. Одним из важнейших аспектов этого исследования является анализ магнитоакустических (МА) волн, которые можно использовать для диагностики параметров исследуемой плазмы. На данный момент существует много наблюдений затухающих медленных МА волн. Обычно затухание МА волн связывали с механизмом теплопроводности. Однако исследования показали, что неадиабатические процессы, такие как нагрев и охлаждение, могут существенно влиять на затухание волн. Радиационное охлаждение зависит от плотности и температуры, в то время как нагрев солнечной короны до сих пор является предметом дискуссий. Часто нагрев моделируется как функция плазменных параметров. Зависимость мощности нагрева и охлаждения от термодинамических параметров плазмы может приводить к нарушениям баланса между этими процессами. В результате возникает тепловой дисбаланс, определяющий доминирование нагрева или охлаждения.

В последнее время исследование воздействия теплового дисбаланса в солнечной атмосфере привлекает значительное внимание в научном сообществе, наиболее свежий обзор этих исследований можно найти в работах [Kolotkov et al., 2021; Zavershinskii et al., 2019; Kolotkov et al., 2019]. В работах показано, что тепловой дисбаланс может существенно влиять на дисперсионные свойства медленных волн в солнечной короне, что приводит к

зависимости фазовой скорости и скорости усиления/затухания от периода волны, и может вызвать усиление или затухание. Было также обнаружено, что процессы нагрева/охлаждения оказывают влияние на сдвиг по фазе между возмущениями различных параметров плазмы, таких как плотность, температура и другие [Prasad et al., 2021; Molevich et al., 2022]. В зависимости от механизма нагрева/охлаждения эффективность обратной связи между плазмой и собственными модами может значительно различаться, что приводит к разнообразию эволюционных сценариев для определенных начальных возмущений (подробнее см. [Zavershinskii et al., 2019]).

Во многих предыдущих исследованиях [Zavershinskii et al., 2019; Kolotkov et al., 2019] магнитогиродинамических (МГД) волн анализ совместного влияния теплопроводности, нагрева и охлаждения проводился с использованием приближения тонкой потоковой трубки, которая ограничена пределом длинных волн [Zhugzhda, 1996]. Эти исследования в основном проводились без учета внешней среды и, следовательно, без описания быстрых волн, которые чувствительны к ее параметрам. Без ограничений на длину волны в геометрии магнитного слоя свойства МГД волн были проанализированы в [Van der Linden, 1991]. Однако авторы сосредоточились на неустойчивости энтропийной/тепловой моды.

В данном исследовании будет проведено изучение свойств МА волн в магнитоакустической термически активной плазме без ограничений на

толщину волновода и величину магнитного поля. При этом учитываются как теплопроводность, так и дополнительные эффекты, такие как дисбаланс нагрева и охлаждения, в двумерной декартовой геометрии.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПИСАНИЯ МГД ВОЛН

Для наших исследований мы используем систему уравнений магнитогидродинамики (МГД). При этом уравнение переноса тепла взято в форме, которое учитывает влияние процессов нагрева, радиационного охлаждения и теплопроводности:

$$\frac{\rho^\gamma}{\gamma - 1} \frac{D}{Dt} \left(\frac{P}{\rho^\gamma} \right) = -\rho Q(\rho, T, |B|), \quad \frac{\rho^\gamma}{\gamma - 1} \frac{D}{Dt} \left(\frac{P}{\rho^\gamma} \right) = \nabla \cdot (\kappa \nabla T) - \rho Q(\rho, T) \quad (1)$$

Здесь ρ , T и P соответственно представляют плотность, температуру и давление в плазме. Кроме того, $\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + v \cdot \nabla$ обозначает конвективную производную. Теплопроводность выражается в виде тензора, как $\kappa = \kappa_{\parallel} e_B e_B + \kappa_{\perp} (I - e_B e_B)$, $\kappa = \kappa_{\parallel} e_B e_B + \kappa_{\perp} (I - e_B e_B)$, где I обозначает единичный тензор, $e_B = B / |B|$ — единичный вектор вдоль магнитного поля. Величины κ_{\parallel} и κ_{\perp} указывают на коэффициенты теплопроводности, параллельные и перпендикулярные силовым линиям магнитного поля, соответственно. В уравнении (1) введена функция тепловых потерь $Q(\rho, T, |B|) = L(\rho, T) - H(\rho, T, |B|)$ $Q(\rho, T) = L(\rho, T) - H(\rho, T)$, представляющая собой разницу между функциями охлаждения $L(\rho, T)$ и нагрева $H(\rho, T, |B|)$ $H(\rho, T)$. Стационарное состояние среды подразумевает, что неадиабатические процессы уравновешивают друг друга $L(\rho_0, T_0) = H(\rho_0, T_0)$.

Одна из основных геометрических моделей, которая используется для анализа волн в магнито-структурированной плазме — магнитный слой. В слоях сложность в виде введения функций Бесселя или Ханкеля отсутствует, в отличие от модели потоковой трубки, поэтому такая геометрия часто используется для аналитического и прямого численного моделирования. В настоящих исследованиях рассматривается геометрия магнитного слоя с толщиной $2x_0$ с магнитным полем, направленным вдоль оси z , в декартовых координатах (см. рис. 1 в [Агапова, 2022]).

Дисперсионное соотношение для магнитоакустических волн

Для анализа свойств магнитоакустических волн (МА) был использован стандартный метод теории возмущений. Приближенное решение системы уравнений искалось как сумма равновесного значения и малого возмущения параметра среды. Для описания дисперсии волн в линеаризованную систему уравнений были подставлены решения в виде суммы плоских монохроматических волн $\propto e^{i(\omega t + k_z z)}$. В результате чего, после ряда математических преобразований, были получены дисперсионные соотношения для осесимметричных и

изгибных магнитоакустических волн:

$$(c_{A_i}^2 k_z^2 - \omega^2) k_{x_e} = - \left(\frac{\rho_{0_e}}{\rho_{0_i}} \right) (c_{A_e}^2 k_z^2 - \omega^2) k_{x_i} \left(\frac{\coth(k_{x_i} x_0)}{\tanh(k_{x_i} x_0)} \right), \quad (2)$$

где

$$k_{x_{i,e}}^2 = \frac{(A_Q^2 m_Q^2 + i\omega\tau_V A^2 m^2) + \kappa_{\parallel} \frac{k_z^2 m_I^2 A_I^2}{Q_{0T} \rho_0}}{(A_Q^2 + i\omega\tau_V A^2) + \kappa_{\parallel} \frac{k_z^2 A_I^2}{Q_{0T} \rho_0}};$$

$$A_I^2 = (c_A^2 + c_I^2)(k_z^2 c_{TI}^2 - \omega^2), \quad m_I^2 = \frac{(k_z^2 c_A^2 - \omega^2)(k_z^2 c_I^2 - \omega^2)}{(c_A^2 + c_I^2)(k_z^2 c_{TI}^2 - \omega^2)};$$

$$A_Q^2 = (c_A^2 + c_{SQ}^2)(k_z^2 c_{TQ}^2 - \omega^2), \quad m_Q^2 = \frac{(k_z^2 c_A^2 - \omega^2)(k_z^2 c_{SQ}^2 - \omega^2)}{(c_A^2 + c_{SQ}^2)(k_z^2 c_{TQ}^2 - \omega^2)};$$

$$A^2 = (c_A^2 + c_S^2)(k_z^2 c_T^2 - \omega^2), \quad m^2 = \frac{(k_z^2 c_A^2 - \omega^2)(k_z^2 c_S^2 - \omega^2)}{(c_A^2 + c_S^2)(k_z^2 c_T^2 - \omega^2)}.$$

В дисперсионном соотношении используются характерные скорости для МА волн: скорость звука — $c_S = \sqrt{\frac{\gamma P_0}{\rho_0}}$, альфвеновская скорость, которая

выражается формулой $c_A = \sqrt{\frac{B_0^2}{4\pi\rho_0}}$, и модифицированная скорость звука $c_{SQ} = \sqrt{\frac{(Q_{0T} - \frac{\rho_0}{T_0} Q_{0\rho}) k_B T_0}{Q_{0T}}} m$, ко-

торая является низкочастотным предельным значением для термически активной однородной плазмы. Низкочастотный предел фазовой скорости медленных МА волн выражается трубочной скоростью $c_T = \sqrt{\frac{c_A^2 c_S^2}{(c_A^2 + c_S^2)}}$ в случае без учета теплового дисбаланса в слое конечного поперечного размера x_0 и модифицированной трубочной скоростью $c_{TQ} = \sqrt{\frac{c_A^2 c_{SQ}^2}{(c_A^2 + c_{SQ}^2)}}$ с учетом роли теплового дис-

баланса. Наличие теплопроводности в исследуемой задаче, определяет высокочастотный предел медленных МА волн, который выражается изотермической скоростью звука $c_I = \sqrt{\frac{P_0}{\rho_0}}$. В коротковолновом пределе также появляется изотермическая трубочная скорость $c_{TI} = \sqrt{\frac{c_A^2 c_I^2}{(c_A^2 + c_I^2)}}$. Индексы "i", "e" обозначают параметры внутри и снаружи слоя соответственно.

Наличие теплопроводности в исследуемой задаче, определяет высокочастотный предел медленных МА волн, который выражается изотермической скоростью звука $c_I = \sqrt{\frac{P_0}{\rho_0}}$. В коротковолновом пределе также появляется изотермическая трубочная скорость $c_{TI} = \sqrt{\frac{c_A^2 c_I^2}{(c_A^2 + c_I^2)}}$. Индексы "i", "e" обозначают параметры внутри и снаружи слоя соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в данной работе было получено дисперсионные соотношения для магнитоакустических волн при учете неадиабатических процессов, таких как нагрев, охлаждение и теплопроводность. Учет теплопроводности для описания волн в термически активном магнитном слое существенно влияет на фазовую скорость медленных волн в высокочастотном пределе. Следовательно, пренебрежение

тепловым дисбалансом или теплопроводностью может привести к существенным расхождениям между сейсмологическими и спектрометрическими оценками параметров плазмы. Однако, эти расхождения могут служить ценным источником информации для дальнейшего анализа и уточнения параметров плазмы.

Работа частично поддержана в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проекты FSSS-2023-0009, FFMR-2024-0017).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Kolotkov D.Y., Zavershinskii D.I., Nakariakov V.M. The solar corona as an active medium for magnetoacoustic waves // *Plasma Physics and Controlled Fusion*. 2021. V. 63, N 12. P. 124008.
- Zavershinskii D.I., Kolotkov D.Y., Nakariakov et al. Formation of quasi-periodic slow magnetoacoustic wave trains by the heating/cooling misbalance // *Physics of Plasmas*. 2019. V. 26, N 8. P. 082113.
- Kolotkov D.Y., Nakariakov V.M., Zavershinskii D.I. Damping of slow magnetoacoustic oscillations by the misbalance between heating and cooling processes in the solar corona // *Astronomy & Astrophysics*. 2019. V. 628. P. A133.
- Prasad A., Srivastava A.K., Wang T. J. Role of Compressive Viscosity and Thermal Conductivity on the Damping of Slow Waves in Coronal Loops with and Without Heating–Cooling Imbalance // *Solar Physics*. 2021. V. 296. P. 1–34.
- Molevich N.E., Riashchikov D.S., Zavershinskii D.I. et al. Phase Shift between Temperature, Pressure, and Density Perturbations in a Heat-Releasing Medium // *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*. 2022. V. 49, N 9. P. 282–287.
- Zhugzhda Y.D. Force-free thin flux tubes: Basic equations and stability // *Physics of Plasmas*. 1996. V. 3, N 1. P. 10–21.
- Van der Linden R.A.M., Goossens M. Thermal instability in slab geometry in the presence of anisotropical thermal conduction // *Solar Physics*. 1991. V. 131. P.79–105.
- Agapova D.V., Belov, S.A., Molevich, N.E. et al. Dynamics of fast and slow magnetoacoustic waves in plasma slabs with thermal misbalance // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2022. V. 514, N 4. P. 5941–5951.

БАЗА ДАННЫХ МЕЖПЛАНЕТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ И ФОРБУШ-ЭФФЕКТОВ

С.М. Белов, А.В. Белов, Н.С. Шлык, М.А. Абунина

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им Н.В. Пушкова, Москва, Россия,
izmiran.crdt@gmail.com

DATABASE OF INTERPLANETARY DISTURBANCES AND FORBUSH EFFECTS

S.M. Belov, A.V. Belov, N. S. Shlyk, M.A. Abunina

Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS (IZMIRAN), Moscow, Russia,
izmiran.crdt@gmail.com

Аннотация. Разработан новый уникальный интерфейс для работы с базой данных бурь в космических лучах, свободно доступный всем пользователям сети Интернет. Каталог событий в космических лучах, связанных с солнечной активностью (Форбуш-эффектов), создается коллективом ИЗМИРАН на протяжении многих лет и известен как FEID (Forbush Effects and Interplanetary Disturbances). На данный момент в нем зарегистрировано 8700 событий, начиная с 1954 года, из которых для 2500 событий установлен солнечный источник. Основные параметры космических лучей рассчитываются с помощью метода глобальной съемки (GSM) по данным мировой сети нейтронных мониторов.

Ключевые слова: программные инструменты, базы данных, космические лучи, солнечная активность, солнечный ветер, межпланетные возмущения, Форбуш-эффекты

Abstract. A new interface, accessible to any internet user, was developed for accessing the database of Forbush-effects and Interplanetary Disturbances (FEID). Catalogue of cosmic-ray events has been constantly worked on by the IZMIRAN group over the last decades and currently includes more than 8700 events, starting from the year 1954, with a solar source determined for 2500 events. Cosmic rays' parameters are obtained using spherical analysis – the Global Survey Method (GSM) on the global neutron monitor network data.

Keywords: research tools, databases, cosmic rays, solar activity, solar wind, interplanetary disturbances, Forbush effects

ВВЕДЕНИЕ

Форбуш-эффект (ФЭ) — изменение потока космических лучей (КЛ) в связи с солнечной активностью: воздействием потоков плазмы из корональных дыр (КД) и/или выбросов солнечного вещества [Belov, 2009]. Это очень интересный феномен, так как различные фоновые условия и различные события на Солнце каждый раз порождают уникальный эффект в результате своего взаимодействия [Shlyk et al., 2022]. Для изучения ФЭ и сопутствующих явлений коллективом ИЗМИРАН разработана и поддерживается база данных, известная как FEID (Forbush Effects and Interplanetary Disturbances). С помощью этого инструмента уже были написаны десятки статей, однако недавно для базы данных был разработан новый пользовательский интерфейс, доступный через сеть Интернет [<https://tools.izmiran.ru/feid>], что создаёт ещё больше возможностей для новых исследований и более широких коллабораций.

КАТАЛОГ СОБЫТИЙ

Каталог событий составляется исследовательской группой в ручном режиме на основании данных из различных источников: списков SSC (Sudden Storm Commencement), каталогов корональных выбросов массы (КВМ) и КД, данных о солнечных вспышках, геомагнитной активности и т.д. В случае отсутствия регистрации SSC или межпланетной ударной волны, начало события определяется по резкому изменению параметров КЛ и межпланетной среды. Для исследования вариаций космических лучей используются часовые данные мировой сети нейтронных мониторов, обрабатываемые с помощью Метода Глобальной Съемки

(Global Survey Method, GSM) [Белов и др., 2018], а также Метода Кольца Станций [Абунина и др., 2020]. Для исследования поведения параметров межпланетной среды используются данные OMNI [<https://omniweb.gsfc.nasa.gov>].

На данный момент база данных FEID насчитывает более 8700 событий, из которых для 2500 имеется информация об источнике. Определение солнечных источников является ключевой задачей при изучении возмущений в космических лучах и солнечном ветре, так как природа этих возмущений может кардинально различаться в зависимости от источника [Мелкумян и др., 2023].

ВОЗМОЖНОСТИ НОВОГО ИНСТРУМЕНТА

Для каждого события в каталоге приводится набор основных параметров, включающих время начала, эффективную продолжительность ФЭ, тип начала, вид и описание солнечного источника, а также параметры солнечной вспышки, КВМ и магнитного облака, при наличии оных. Остальные параметры вычисляются из рядов данных КЛ и межпланетной среды, таких как, например: вариации плотности и компонент анизотропии потока КЛ, скорость солнечного ветра, межпланетное магнитное поле, индексы геомагнитной активности. Определяющим параметром каждого события является его величина (магнитуда), вычисляемая как разница между максимальной и минимальной вариацией потока КЛ, рассчитанного по GSM для частиц жесткостью 10 ГВ [Belov et al., 2001]. В каталоге представлены события с магнитудой от 0.1 % до 26 % (на правой панели рис. 1 можно видеть гистограмму распределения величин событий в базе

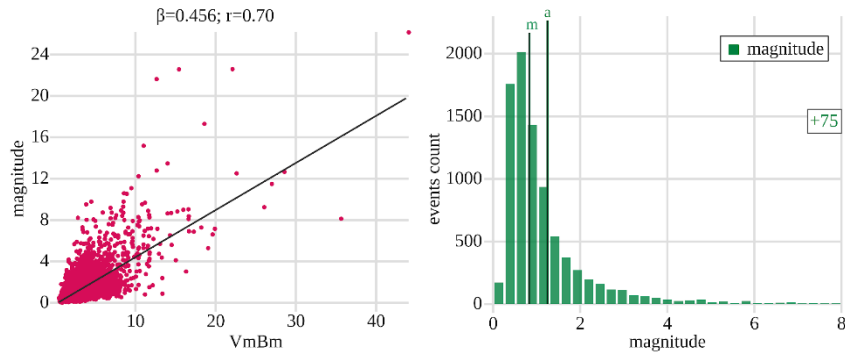


Рис. 1. Корреляция величины ФЭ с индексом возмущенности солнечного ветра (слева) и гистограмма распределения величин ФЭ (справа)

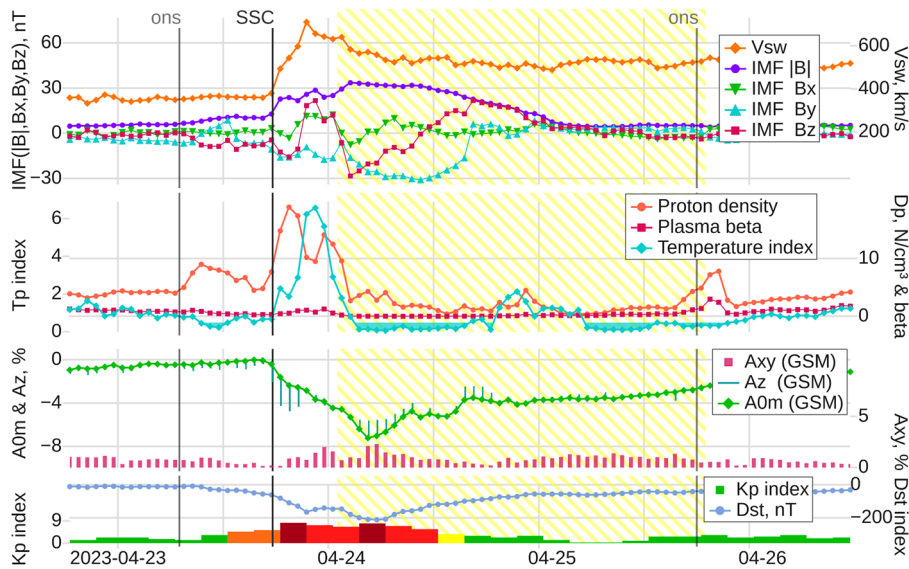


Рис. 2. Поведение параметров в событии 23 апреля 2023 г.

данных, а на левой — пример отображения корреляции между величинами). Существенной инновацией в новой версии FEID является то, что каждый пользователь может самостоятельно рассчитывать множество параметров событий, которые могут понадобиться в конкретной работе, например экстремумы параметров солнечного ветра внутри магнитного облака, временной интервал до предыдущего события и многое другое. Список событий с любым набором параметров доступен для экспорта. Важным инструментом является возможность делать выборки событий на основании различных параметров и проводить их сравнительный анализ.

Одной из основных особенностей программы является широкий спектр возможностей визуализации как поведения параметров КЛ и межпланетной среды в отдельных событиях, так и статистических особенностей выборок (например, рис. 1, а также метод наложения эпох и историческая динамика параметров). Предлагается возможность высоконастраиваемого экспорта рисунков для вставки в текст публикации, пользователь может изменять различные параметры самой картинки, оси, шрифт и его размер (с учетом размера картинки в тексте), все представленные цвета и не только. На рис. 2 представлен пример изображения, показывающего

поведение параметров КЛ и межпланетной среды в событии 23 апреля 2023 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе описан новый интерфейс для работы с базой данных FEID, свободно доступный всем пользователям сети Интернет [<https://tools.izmiran.ru/feid>]. Этот инструмент предоставляет широкий спектр возможностей для анализа различных событий за длительный период с 1954 г. по настоящее время.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абунина М.А., Белов А.В., Ерошенко Е.А., Абунин А.А., Оленева В.А., Янке В.Г., Мелкумян А.А. Метод кольца станций в исследовании вариаций космических лучей: 1. Общее описание // Геомагнетизм и аэронавтика. 2020. Т. 60, № 1. С. 41–48.
- Белов А.В., Ерошенко Е.А., Янке В.Г., Оленева В.А., Абунина М.А., Абунин А.А. Метод глобальной съемки для мировой сети нейтронных мониторов // Геомагнетизм и аэронавтика. 2018. Т. 58, № 3. С. 374–389.
- Мелкумян А.А., Белов А.В., Абунина М.А., Шлык Н.С., Абунин А.А., Оленева В.А., Янке В.Г. Форбуш-понижения, связанные с корональными дырами, корональными выбросами из активных областей и волоконными

выбросами: сравнение в солнечных циклах 23 и 24 // Геомагнетизм и Аэрономия. 2023. Т. 63, № 5. С. 581–598.

Belov A.V., Eroshenko E.A., Oleneva V.A., Struminsky A.B., Yanke V.G. What determines the magnitude of Forbush decreases? // Adv. Space Res. 2001. V. 27, N 3. P. 625–630.

Belov A.V. Forbush effects and their connection with solar, interplanetary and geomagnetic phenomena / Proc. IAU Symposium. 2009. V. 257. P. 439–450.

Shlyk N.S., Belov A.V., Abunina M.A., Abunin A.A., Oleneva V.A., Yanke V.G. Forbush decreases caused by paired interacting solar wind disturbances // MNRAS. 2022. V. 511, N 4. P. 5897–5908.

URL: <https://tools.izmiran.ru/feid> (дата обращения 10.05.2024)

URL: <https://omniweb.gsfc.nasa.gov> (дата обращения 10.05.2024)

КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ СПЕКТРОВ ЗВЕЗД ТИПА UX Ori. ЗВЕЗДА UX Ori И CQ Tau

П.О. Димитриева, В.П. Гринин

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия,
st110648@student.spbu.ru

QUANTITATIVE ANALYSIS OF SPECTRA OF UX Ori stars. STAR UX Ori AND CQ Tau

P.O. Dimitrieva, V.P. Grinin

St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia,
st110648@student.spbu.ru

Аннотация. Выполнен количественный анализ спектров молодых звезд UX Ori и CQ Tau, принадлежащих семейству молодых неправильных переменных звезд типа UX Ori. Спектры получены в моменты времени, когда звезда была в ярком состоянии. По эквивалентной ширине линии H α сделаны оценки темпа аккреции газа на звезду.

Ключевые слова: звезды типа UX Ori, UX Ori, CQ Tau.

Abstract. Quantitative analysis of spectra of young stars UX Ori and CQ Tau, which belong to the family of young irregular variable stars of the UX Ori type, has been performed. The spectra were obtained when the star was in a bright state. Using the equivalent width of the H α line, we estimated the rate of gas accretion onto the star.

Keywords: UX Ori type stars, UX Ori, CQ Tau.

ВВЕДЕНИЕ

В данной работе представлены результаты спектроскопических наблюдений высокого разрешения звезды UX Ori и CQ Tau, еще не пришедшей на главную последовательность, принадлежащей группе UXORs. Звезды типа UX Ori (UXORs) — молодые звезды, которые были отнесены в отдельный спектральный класс относительно недавно [Grinin, 2017]. Необходимость отнесения этих звезд в отдельное семейство заключалась в особенностях их фотометрического поведения. Они демонстрируют глубокие ($\Delta V = 2 - 3$ m) непериодические ослабления блеска продолжительностью от нескольких дней, до нескольких недель и глубиной до 2–3 звездных величин.

Наблюдается и другая особенность этих звезд. В 1968 г. Гётц и Венцель обнаружили необычное поведение цветового трека на диаграмме цвет-величина во время минимума CQ Tau [Grinin, 2017]. Падение блеска вначале сопровождалось покраснением звезды, однако вблизи минимума цветовой трек поворачивал в голубую сторону. Вскоре «эффект поголубения» был обнаружен у многих звезд этого типа.

На основании этих фактов Гринин с соавторами (1992) определили эволюционный статус звезд этого подкласса и построили модель описывающую наблюдаемые эффекты. Из заключений авторов следует, что звезды типа UX Ori обычно являются молодыми звездами, окруженными протопланетными дисками, которые имеют небольшой наклон к линии наблюдения. Этот вывод был подтвержден дальнейшими исследованиями, в том числе интерферометрическими наблюдениями в ближней инфракрасной области спектра.

Таким образом, наблюдательные признаки, по которым можно отнести звезды к типу UX Ori, это наличие глубоких алголе-подобных минимумов, эффект поголубения и увеличение степени линейной поляризации в минимумах.

АНАЛИЗ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В данной работе мы используем спектры высокого разрешения, которые были получены на эшелле-спектрографе SOFIN [Tuominen et al., 1999] на 2,56-метровом телескопе обсерватории Nordic Optical Telescope (NOT) во время двух сеансов наблюдений в 1995 и 1996 гг.

В спектрах UXORs присутствует ряд линий фотосферного и околос звездного происхождения. Некоторые из них (D Na I, He I 5876, H α) сильно изменчивы [Graham, 1992; Grinin et al., 1994; Grady et al., 1996; de Winter 1999; Kozlova et al., 2000], свидетельствуя о сложном движении околос звездного газа в околос звездном пространстве звезды. В спектрах исследуемых звезд также присутствуют многочисленные линии поглощения нейтральных и ионизированных, а также линии водорода, прежде всего Бальмеровской серии. Большинство этих линий типичны для нормальных звезд близких спектральных классов, но некоторые, такие как He I 5876, Na I D или триплет O I 7774, не наблюдаются с такой же интенсивностью у нормальных A-звезд [Grinin et al., 2001]. Многие фотосферные линии блендированы околос звездными линиями поглощения, так называемыми shell компонентами. Наиболее стабильными оказались линии Mg II 4481 и Si II 6347.

В работе были измерены эквивалентные ширины наиболее ярких индивидуальных линий из полученных ранее спектров. Использовались усредненные спектры звезд, полученные, когда звезда была в ярком состоянии [Grinin V.P., O. V. Kozlova]. Усредненные спектры сравнивались с синтетическими, рассчитанными по Kurucz (1993) модели звездных атмосфер и списка спектральных линий от базы данных VALD [Kurka et al., 1998].

Результаты измерений эквивалентных ширин для UX Ori приведены в табл. 1, где в 1 столбце указан порядок, во 2 — химический элемент, принадлежащий линии, в 3 — длина волны спектральной линии (в ангстремах) и в 4 — значение эквивалентной ширины EW (в ангстремах). Отрицательные значения EW указывают на эмиссионные линии.

Результаты измерений эквивалентных ширин для UX Ori

№	Элемент	$\lambda(\text{Å})$	EW (Å)
UX Ori (1994)			
26	H I (emission)	8598.40	-1.663 (19/11/94)
	H I (emission)	8665.02	-1.849 (19/11/94)
34	H α (emission)	6562.80	-7.610 (19/11/94)
UX Ori (1995)			
26	H I (emission)	8598.40	-1.603 (02/12/95)
	H I (emission)	8598.40	-1.609 (04/12/95)
	H I (emission)	8598.40	-1.76 (06/12/95)
	H I (emission)	8665.02	-2.502 (02/12/95)
	H I (emission)	8665.02	-3.087 (04/12/95)
	H I (emission)	8665.02	-2.107 (06/12/95)
34	H α (emission)	6562.80	-13.150 (02/12/95)
			-12.772 (04/12/95)
			-12.719 (06/12/95)
			-10.555 (02/12/95)
			-10.502 (04/12/95)
			-10.084 (06/12/95)
46	H β (emission)	4881.32	-1.293 (02/12/95)
			-1.115 (04/12/95)
			-1.300 (06/12/95)
49	Ti II	4563.76	0.116
50	Mg II	4481.33	0.594
54	Ti II	4163.65	0.111
55	H γ (emission)	4101.73	-0.285 (02/12/95)
57	Ca II	3933.66	2.179
UX Ori (1996)			
26	H I (emission)	8598.40	-1.675 (25/11/96)
	H I (emission)	8598.40	-1.859 (28/11/96)
	H I (emission)	8665.02	-1.431 (25/11/96)
	H I (emission)	8665.02	-1.397 (28/11/96)
34	H α (emission)	6562.80	-8.457 (25/11/96)
		6562.80	-5.672 (28/11/96)
35(1)	H α (emission)	6562.80	-5.524 (28/11/96)
		6562.80	-5.229 (02/12/96)
35(2)	Si II	6347.11	0.335
	Si II	6371.37	0.217
36	Si II	6347.11	0.329
	Si II	6371.37	0.258
39	He I	5875.61	0.475
	Na I	5889.95	0.702
	Na I	5895.92	0.541
47	H I	4861.32	0.274
	H I	4861.32	0.342

Аналогичные результаты получены для CQ Tau.

Следующий важный параметр — темп аккреции, который мы определили, представлен в табл. 2. Для определения аккреционной светимости мы выбрали эмиссионную линию H α , так как эта линия является наиболее сильной линией, присутствующей в спектрах.

Светимость линии L_{acc} вычислялась с использованием звездного потока на длине волны H α , рассчитанного по Kurucz (1979), и расстоянием до звезды.

Использовалось следующее соотношение между аккреционной светимостью и светимостью в линии [Mendigutía et al., 2011b]:

Результаты темпа аккреции для звезд UX Ori, CQ Tau.

Star	line	EW (Å)	date	$L_{acc} (L_{\odot})$	$\dot{M} 10^{-7}$ ($M_{\odot}/year$)	$\bar{\dot{M}} 10^{-7}$ ($M_{\odot}/year$)	$\dot{M}^* 10^{-7}$ ($M_{\odot}/year$)
UX Ori	H α	7.610	19/11/94	2.85	1.02	1.27±0.19	0.66±0.43
		13.150	02/12/95	5.17	1.84		
		12.772	04/12/95	5.01	1.79		
		12.719	06/12/95	4.98	1.78		
		10.555	02/12/95	4.07	1.45		
		10.502	04/12/95	4.05	1.44		
		10.084	06/12/95	3.87	1.38		
		8.457	25/11/96	3.20	1.14		
		5.672	28/11/96	2.07	0.74		
		5.524	28/11/96	2.01	0.72		
		5.229	02/12/96	1.89	0.68		
CQ Tau	H α	8.445	03/12/95	0.67	1.14	1.06±0.10	1.12±0.55
		5.161	05/12/95	0.40	0.67		
		11.992	21/11/96	0.99	1.67		
		8.566	26/11/96	0.68	1.15		
		7.459	29/11/96	0.59	0.99		
		7.649	29/11/96	0.60	1.02		
		5.971	02/12/96	0.46	0.78		

$$\log \log \left(\frac{L_{acc}}{L_{\odot}} \right) = A + B \times \log \left(\frac{L_{line}}{L_{\odot}} \right), \quad (1)$$

где A и B — константы, соответствующие точке пересечения и градиенту соотношения между $\log(L_{acc}/L_{\odot})$ и $\log(L_{line}/L_{\odot})$ соответственно. В нашей работе мы использовали $A = 2,09 \pm 0,06$ и $B = 1,00 \pm 0,05$ [5].

Скорость аккреции массы определялась из аккреционной светимости, звездного радиуса и звездной массы по формуле:

$$\dot{M} = \frac{L_{acc} R_*}{G M_*} \quad (2)$$

В табл. 2 занесены результаты темпа аккреции, рассчитанных по формулам (1) и (2). В 1 столбце указано название звезды, во 2 столбце — линия, по которой определялась аккреционная светимость, в 3 столбце — эквивалентная ширина линии H α , в 4 столбце — дата наблюдения, в 5 столбце — аккреционная светимость, в 6 столбце — темп аккреции, в 7 столбце — среднее значение темпа аккреции и в 8 столбце — результаты темпа аккреции авторов [Donehew, 2011].

Как видно, при одном и том же уровне блеска звезды прослеживается нестабильность темпа аккреции, значения которого могут отличаться в 2 раза. Наши результаты хорошо согласуются с результатами авторов [Donehew, 2011], что показывает правильность метода расчета темпа аккреции и возможности его применения для исследований других звезд типа UX Ori в дальнейшем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были определены эквивалентные ширины проявившихся индивидуальных линий по спектрам звезд, полученных ранее. Значения эквивалентных ширин отражают спектральные характеристики звезд. И в UX Ori и в CQ Tau наблюдаются многочисленные линии металлов (Mg I, Fe I, Ti, Si I), дублет натрия и сильная эмиссия в водородных линиях. По эквивалентной ширине эмиссионной линии H α были сделаны оценки темпа аккреции. Для звезды UX Ori средний темп аккреции составил $1.27 \cdot 10^{-7}$ ($M_{\odot}/год$), для звезды CQ Tau — $1.06 \cdot 10^{-7}$ ($M_{\odot}/год$). В результатах прослеживается нестабильность темпа аккреции, значения которого могут отличаться в 2 раза при одном и том же уровне блеска звезды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Donehew B. Measurements of mass accretion rates in Herbig Ae/Be stars: дис. Clemson University. 2011.
- Grinin V. P. et al. Optical spectra of five UX Orionis-type stars // *Astronomy & Astrophysics*. 2001. V. 379(2). P. 482–495.
- Grinin V. P. Young stars with non-periodic algol-type minima // *Astronomical and Astrophysical Transactions*. 1992. V. 3(1). P. 17–32.
- Grinin V. UX Ori-type stars // *Stars: From Collapse to Collapse*. 2017. V. 510. P. 32.
- Wichitanakom C. et al. The accretion rates and mechanisms of Herbig Ae/Be stars // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2020. V. 493. N. 1. P. 234–249.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА ФЛУКТУАЦИЙ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА В РАМКАХ ОБОЛОЧЕЧНОЙ МГД-МОДЕЛИ

И.А. Дуканов¹, Е.В. Юшков^{1,2}, Д.Д. Соколов¹

¹Физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова, Кафедра математики, Москва, Россия,
ilya.dukanov@gmail.com

²Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

STUDYING EVOLUTION OF THE ENERGY SPECTRUM OF SOLAR WIND FLUCTUATIONS WITHIN THE FRAMEWORK OF THE SHELL MHD-MODEL

I.A. Dukanov¹, E.V. Yushkov^{1,2}, D.D. Sokoloff¹

¹Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow, Russia,
ilya.dukanov@gmail.com

²Space Research Institute — IKI, Moscow, Russia

Аннотация. На данный момент нет единства в определении причин эволюции спектра флуктуаций солнечного ветра. Во многих исследованиях интерес прикован к маркерам, характеризующим развитие турбулентности и процессы энергопереноса в среде. Такими маркерами являются изломы спектров на масштабах больших вихрей, а также на кинетических масштабах. В отсутствии единого мнения можно делать предположения о причинах тех или иных изменений в спектре в процессе эволюции, основываясь на результатах численного моделирования турбулентных процессов в плазме, ограничивая таким образом список возможных причин. В данной работе представлены результаты численного исследования в рамках оболочечной МГД-модели.

Ключевые слова: Оболочечные модели, каскадные модели, колмогоровский спектр, физика плазмы, МГД-моделирование, параллельные вычисления, Parker Solar Probe.

Abstract. At the moment, there is no unity in determining the causes of the evolution of the spectrum of solar wind fluctuations. In many studies, interest is focused on markers characterizing the development of turbulence and energy transfer processes in such environment. Such markers are spectral breaks on the scale of large eddies, as well as on kinetic scales. In the absence of a consensus, we can make assumptions about the causes of certain changes in the spectrum during the evolution process, based on the results of numerical modeling of turbulent processes in plasma, thus limiting the list of possible causes. This paper presents the results of a numerical study within the framework of the shell MHD model.

Keywords: Shell-models, Kolmogorov's spectrum, plasma physics, MHD modeling, parallel computing, Parker Solar Probe.

Солнечный ветер — ключевое связующее звено в системе Солнце-Земля, однако ни физика его формирования, ни физика эволюции еще до конца не ясны [Bruno, Carbone, 2013]. Это факт являлся основной причиной запуска в 2018 году специальной спутниковой миссии Parker Solar Probe (PSP), по большей части, сконцентрированной на вопросе исследования солнечного ветра. За первые пять лет работы эта миссия обеспечила специалистам огромный приток новых данных с высоким временным разрешением и большой вариацией гелиоцентрических расстояний. В частности, она позволила в деталях изучить спектры флуктуаций полей солнечного ветра: поля скорости и магнитного поля, и по-новому взглянуть на турбулентный каскад, формирующийся в межпланетной плазме.

Данные PSP подтвердили ранее обнаруженное наличие в картине спектральной плотности флуктуаций энергии магнитного поля двух изломов, первый из которых расположен вблизи субионного масштаба, второй — на левом конце инерционного интервала, то есть в области вихрей большого масштаба [Chen et al, 2020]. Единого мнения на счет эволюции этих маркеров пока не сложилось, поэтому на данный момент изучение динамики этих изломов, ограничивающих инерционный интервал и определяющих турбулентный каскад, является ключевым. И если для описания около диссипативного излома необходимым кажется привлечение кинетического подхода, то эволюцию

крупномасштабного излома, видимо, можно описать, оставаясь в рамках магнитогидродинамической парадигмы. В настоящей работе, используя в качестве основы данные миссии PSP, мы описываем свободное вырождение турбулентного каскада с помощью оболочечной изотропной МГД-модели и стараемся повторить реально наблюдаемую эволюцию излома спектра.

Для описания турбулентного каскада мы используем оболочечную (от англ. Shell model) или, по-другому, каскадную модель, разработанную Ф. Плунианом и П.Г. Фриком [Фрик, 2003].

Класс оболочечных моделей для систем гидродинамического типа представляет из себя Фурье-образы системы МГД-уравнений, в которых образы нелинейных слагаемых приближены суммой квадратичных нелинейностей таким образом, чтобы в бездиссипативном случае выполнялись законы сохранения трехмерной МГД: сохранения полной энергии, магнитной и перекрестной спиральности. При этом непрерывная спектральная шкала заменяется набором дискретных спектральных оболочек, а в нелинейных слагаемых учитывается обмен энергией только между соседними оболочками. В таком подходе мы используем данные PSP вблизи Солнца как входные и изучаем в процессе свободного вырождения турбулентного каскада возможную эволюцию спектров и динамику движения крупномасштабного

излома. Полученные результаты каскадного моделирования сравниваются с данными PSP на оси Солнце-Земля и на основании сравнения делается вывод о применимости оболочечного анализа и гипотезы свободного вырождения.

Авторы хотели бы выразить искреннюю благодарность П.Г. Фрику за полезные советы и предоставленную модель, а также команде Parker Solar Probe и CDAWEB за предоставленные спутниковые данные [Bale et al., 2016].

Работа поддержана грантом фонда БАЗИС N 21-1-3-63-1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Фрик П. Г. Турбулентность: подходы и модели. 2003.
Bale S.D. et al. The FIELDS instrument suite for Solar Probe Plus: measuring the coronal plasma and magnetic field, plasma waves and turbulence, and radio signatures of solar transients // *Space science reviews*. 2016. V. 204. P. 49–82.
Bruno R., Carbone V. The solar wind as a turbulence laboratory // *Living Rev. Solar Phys.* 2013. V. 10. P. 1–208.
Chen C. H. K. et al. The evolution and role of solar wind turbulence in the inner heliosphere // *Astrophysical J. Supplement Ser.* 2020. V. 246, N 2. P. 53.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ СКОРОСТИ КВМ И СВЯЗАННОЙ С НИМ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

Я.И. Егоров, В.Г. Файнштейн

Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия,
egorov@iszf.irk.ru

VELOCITY OSCILLATIONS OF CME AND RELATED SHOCK

Ya.I. Egorov, V.G. Fainshtein

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, egorov@iszf.irk.ru

Аннотация. В ряде работ сделан вывод, что скорость корональных выбросов массы (КВМ) меняется со временем не монотонно, а совершает колебания. В отличие от предшествующих исследований колебаний скорости КВМ при его распространении в поле зрения коронографа, мы для относительно быстрых КВМ рассмотрели отдельно колебания скорости самого КВМ (т.е. тела КВМ) и скорости связанной с КВМ ударной волны. Оказалось, что характеристики колебаний двух структур заметно различаются.

Ключевые слова: Солнце, КВМ, ударная волна

Abstract. Several researchers have concluded that the velocity of coronal mass ejections (CME) has oscillations. Unlike the previous studies, we examined the velocity oscillations of a CME (i.e., its body) separately from the velocity of the CME-related shock, for relatively fast CMEs. The characteristics of the two structures have been found to differ noticeably.

Keywords: Sun, CME, shock wave

ВВЕДЕНИЕ

Корональные выбросы массы (КВМ) — магнитно-плазменные структуры, регулярно выбрасываемые из солнечной атмосферы в межпланетное пространство, выносят туда заметное количество энергии, массы и магнитного потока [Webb and Howard, 2012; Gopalswamy и др., 2016]. Множество сведений, касающихся свойств КВМ было получено с использованием Large Angle and Spectrometric Coronagraph [LASCO; Brueckner и др. 1995] на борту миссии Solar and Heliospheric Observatory [Domingo и др. 1995]. Характеристики КВМ, зарегистрированных LASCO, представлены в различных каталогах (см., например, SOHO LASCO CME CATALOG — CDAW DATA CENTER (nasa.gov) и SOHO/LASCO HALO CME Catalog (nasa.gov)). Отмеченные каталоги описаны в работах [Gopalswamy и др. 2009; Gopalswamy и др. 2010].

Самые быстрые КВМ оказываются связанными в короне с ударными волнами (УВ) [Vourlidas and Ontiveros, 2009; Vemporad and Mancuso 2010; Fainshtein and Egorov, 2019]. Кинематические характеристики таких УВ заметно отличаются от аналогичных характеристик тела КВМ [Fainshtein и др., 2018]. В цитируемой работе были получены отдельно зависимости от времени скорости тела КВМ и УВ для разных групп КВМ. При этом временные профили скорости двух структур сглаживались путем усреднения имеющихся возмущений.

Несколько исследований показали, что скорость КВМ по мере его удаления от Солнца меняется со временем не монотонно, а совершает квазипериодические колебания [Krahl и др., 2001; Shanmugaraju и др., 2010; Lee и др., 2015, 2018; Michalek и др., 2016, 2022]. Для разных КВМ периоды колебаний скорости варьировались от 24 мин. до 824 мин., т.е. до более 10 часов. Амплитуда колебаний скорости по данным первых двух цитируемых работ составляла 157–418 км/с. Авторы работ [Lee и др., 2015, 2018] показали, что колебания скорости КВМ

существуют как в радиальном, так и в азимутальном направлениях. В работе [Michalek и др., 2022] были рассмотрены все КВМ, зарегистрированные в 23–24 циклах солнечной активности, для которых имелось не менее 11 измерений высота–время. Авторы этой статьи отметили, что главным фокусом их работы было показать, что колебания скорости КВМ — это реальное явление, в значительной степени связанное с изменением физических свойств КВМ, зарегистрированных во время различных фаз солнечной активности. В работах [Michalek и др., 2016, 2022] высказано предположение, что свойства колебаний скорости КВМ определяются магнитной структурой жгута. Авторы этих работ отмечают, что природа колебаний скорости может быть интерпретирована в терминах нормальных мод колебаний натянутой магнитной струны неоднородной плотности.

Выше уже отмечалось, что в короне впереди быстрых КВМ может быть ударная волна.

В данной работе для 9 событий мы сравнили колебания скорости отдельно тела КВМ и связанной с ним УВ. Анализировались скорости полных гало КВМ. Оказалось, что характеристики колебаний скорости двух структур заметно различаются.

ДАнные И МЕТОды Их АНАЛИЗА

Анализировались колебания скорости КВМ, а также связанной с ним УВ, отобранных из каталога (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/HALO/halo.htm) за период с 2010 г. по июль 2023 г. и удовлетворяющих следующим требованиям:

(1). Линейная проекционная скорость гало КВМ превышала 1000 км/с.

(2). Связанная с КВМ вспышка имела долготу не более 70° к востоку и к западу от центрального меридиана.

(3). В поле зрения коронографа LASCO C3 можно надежно выделить 11 положений границы тела КВМ и связанной УВ.

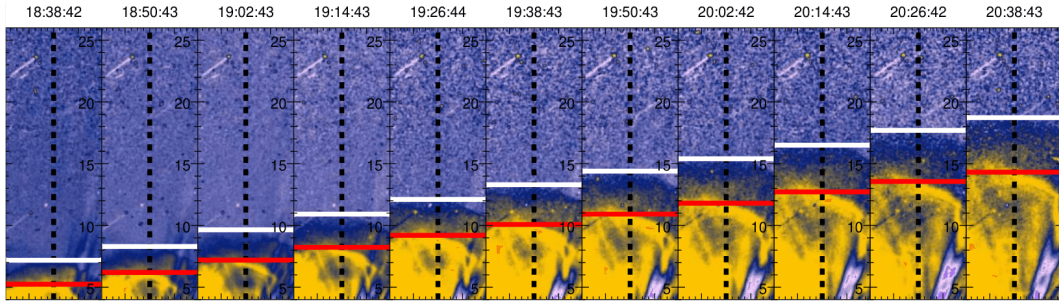


Рис. 1. Примеры нахождения границы тела КВМ и связанной ударной волны в выделенные моменты времени для события 2014-09-10. По горизонтальной и вертикальной оси на каждой последовательности изображений приведены расстояния в радиусах Солнца. Тело КВМ окрашено в желтый цвет, ударно-сжатая плазма за фронтом УВ окрашена в темно синий цвет. Граница тела КВМ показана горизонтальной линией красного цвета, УВ показана линией белого цвета

Заметим, что для событий с такими скоростями, впереди КВМ почти всегда оказывается УВ, скорость которой больше скорости тела КВМ [Fainshtein и др., 2018].

Ниже приведен список КВМ с указанием даты и (в скобках) времени первой регистрации КВМ в поле зрения коронографа LASCO C2: 2011-03-21(02:24); 2011-10-01(20:48); 2013-05-17(09:12); 2014-06-10(13:30); 2014-09-10(18:00); 2014-12-13(14:24); 2015-06-18(17:24); 2016-01-01(23:24); 2017-07-23(04:48).

Для нахождения характеристик колебаний скорости тела КВМ и УВ мы использовали зависимость скорости каждой структуры от времени в виде соотношения (1) из работы [Michalek и др., 2016, 2022]:

$$V(t) = a_0 \sin \sin(a_1 t + a_2) + a_3 + a_4 t, \quad (1)$$

где a_0 — это амплитуда колебаний, a_1 — частота колебаний, a_2 — фаза, a_3 — начальная скорость, and a_4 — ускорение, t — время. Как и в работе [Michalek и др., 2022], в своей работе мы сосредоточимся на коэффициентах a_0 и a_1 . Все параметры $a_0 - a_4$ находились с использованием метода наименьших квадратов для полученных из наблюдений значений скорости КВМ и УВ: $V_{cme}(t)$ и $V_{sh}(t)$. При этом, как и в работе [Michalek и др., 2016, 2022], накладывалось ограничение на периоды рассмотренных колебаний тела КВМ и УВ: полагалось, что периоды колебаний скорости каждой структуры не менее 60 минут

$$V_m = \frac{R_{i+1} - R_i}{t_{i+1} - t_i}, \quad (2)$$

где V_m — скорость КВМ или связанной УВ, R_i — положение тела КВМ или УВ, измеренное в момент t_i .

В качестве границы тела КВМ рассматривалось начало резкого увеличения яркости. В качестве УВ, связанной с КВМ, рассматривалась граница разреженной области яркости впереди тела КВМ, по аналогии, например, с [Ontiveros and Vourlidas, 2009]. При нахождении оптимальных параметров мы полагали, как и в работе [Michalek и др., 2016, 2022], погрешность нахождения скорости равной 80 км/с.

Положения границы тела КВМ и связанной с ним УВ находились с использованием разностных изображений короны, когда из изображений короны в поле зрения коронографа LASCO C3 в фиксированные моменты времени t вычитался фон — изображения короны, усредненные в течение нескольких часов до

момента первой регистрации КВМ коронографом LASCO C3. Примеры нахождения положения границы тела КВМ и связанной ударной волны показаны на рис. 1 для события 2014-09-10 для всех рассмотренных моментов времени.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2 показаны изменения со временем скоростей КВМ и УВ, определенных из наблюдений, в сравнении с зависимостью от времени скорости, найденной по формуле (1) с оптимальными параметрами (a_0, \dots, a_4).

Близость точек, характеризующих измеряемые значения скорости каждой анализируемой структуры, к зависимости скорости структуры, определяемой по формуле (1), свидетельствует о наличии колебаний скорости КВМ и УВ с одной стороны и о различии характера колебаний скорости КВМ и УВ с другой. Отсутствие для многих измерений скорости КВМ и УВ пересечений баров, характеризующих погрешность измерения скорости анализируемых структур, позволяет сделать вывод, что колебания скорости КВМ и УВ различаются.

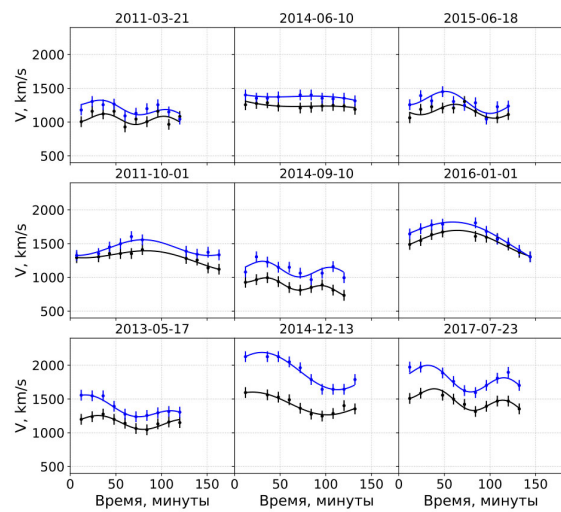


Рис. 2. Вариации со временем скорости тела КВМ (черные точки с барями, характеризующими погрешность измерения скорости) и УВ (синие точки с барями). Сплошными линиями показаны изменения скорости двух структур, рассчитанной по формуле (1) с оптимальными параметрами a_0, \dots, a_4

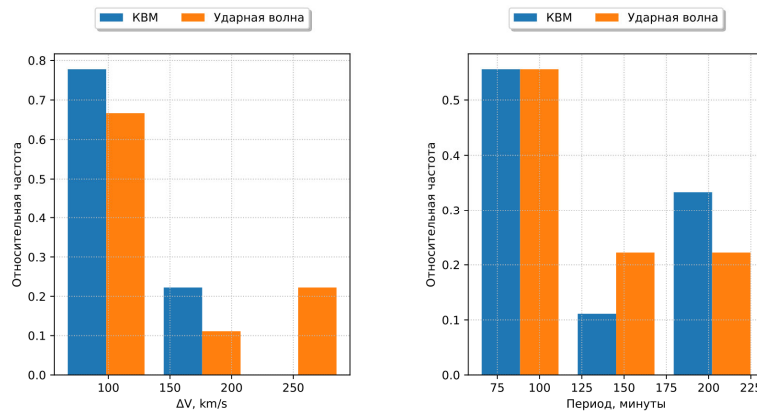


Рис. 3. Гистограммы распределений амплитуды колебаний скорости КВМ и УВ — левая панель, и периодов колебаний этих структур — правая панель.

На рис. 3 (левая панель) показаны гистограммы распределения доли событий по интервалам амплитуды колебаний для тела КВМ и для УВ (размер интервала приблизительно равен 45 км/с). Из этого рисунка следует, что амплитуды колебаний скорости КВМ в основном сосредоточены в области минимальных значений для КВМ и относительно равномерно уменьшается от промежуточных до маленьких значений для УВ. Средние значения амплитуды колебаний скорости оцениваются как 108 ± 44 км/с для КВМ и 145 ± 78 км/с для УВ.

На правой панели рис. 3 показаны гистограммы распределения количества событий по интервалам периодов колебаний для тела КВМ и для УВ (размер интервала приблизительно равен 33 мин). Видно, что, как для КВМ, так и для УВ в основном преобладают небольшие периоды колебаний скорости, а доля самых больших периодов больше для КВМ. Средние значения периода колебаний скорости оцениваются как 126 ± 65 мин для КВМ и 132 ± 65 мин для УВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере 9 быстрых гало КВМ и связанных с ними УВ показано, что скорость движения каждой из этих структур совершает колебания. Мы исследовали свойства колебаний скорости отдельно для тела КВМ и УВ. Определены для каждого события 5 параметров колебаний в соответствии с уравнением (1). Нас прежде всего интересовали амплитуда и период колебаний скорости. Оказалось, что для всех рассмотренных случаев амплитуда и период колебаний скорости для УВ больше, чем для тела КВМ. Для большинства измеренных скоростей КВМ и УВ (V_{CME} и V_{SH}) разность $V_{SH} - V_{CME}$ превышает сумму погрешностей измерения скорости каждой структуры равной $2 \cdot 80$ км/с (рис. 2). Это свидетельствует о надежности сделанного вывода о различии характера колебаний тела КВМ и связанной с ним УВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Bemporad A., Mancuso S. First Complete Determination of Plasma Physical Parameters Across a Coronal Mass Ejection-driven Shock // *Astrophysical J.* 2010. V. 720. 130.
 Brueckner G.E., Howard R.A., Koomen M.J., Korendyke

C.M. The large angle spectroscopic coronagraph (LASCO) // *Solar Phys.* 1995. 162. 357.

Domingo V., Fleck B., Poland A.I. The SOHO Mission: an Overview // *Solar Phys.* 1995. 162(1–2). 1.

Fainshtein V.G., Egorov Y.I. Onset of a CME-Related Shock Within the Large-Angle Spectrometric Coronagraph (LASCO) Field of View // *Solar Phys.* 2019. 294(9). 126.

Fainshtein V.G., Egorov Y.I., Zagainova Y.S. Kinematics of CMEs and related shocks from LASCO data: Comparative analysis // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Phys.* 2018. V. 179. 538.

Gopalswamy N. History and development of coronal mass ejections as a key player in solar terrestrial relationship // *Geoscientific Lett.* 2016. V. 3. 8.

Gopalswamy N., Yashiro S., Michalek G. et al. The SOHO/LASCO CME Catalog // *Earth Moon and Planets.* 2009. V. 104. 295.

Gopalswamy N., Yashiro S., Michalek G., Xie H. et al. A Catalog of Halo Coronal Mass Ejections from SOHO // *Sun and Geosphere.* 2010. V. 5. 7. ADS.

Krall J., Chen J., Duffin R.T. et al. Erupting Solar Magnetic Flux Ropes: Theory and Observation // *Astrophys. J.* 2010. V. 562 (2). 1045.

Lee H., Moon Y.-J., Nakariakov V.M. Radial and Azimuthal Oscillations of Halo Coronal Mass Ejections in the Sun // *Astrophys. J. Letters.* 2015. V. 803(1), L7.

Lee H., Moon Y.-J., Nakariakov V.M. et al. Three-dimensional Oscillations of 21 Halo Coronal Mass Ejections Using Multi-spacecraft Data // *Astrophys. J.* 2018. V. 868(1). 18.

Michalek G., Gopalswamy N., Yashiro S. Periodic Oscillations in LASCO Coronal Mass Ejection Speeds: Space Seismology // *Astrophys. J. Letters.* 2022. V. 927(1), L16.

Michalek G., Shanmugaraju A., Gopalswamy N. et al. Statistical Analysis of Periodic Oscillations in LASCO Coronal Mass Ejection Speeds // *Solar Phys.* 2016. V. 291(12), 3751.

Ontiveros V., Vourlidas A. Quantitative Measurements of Coronal Mass Ejection-Driven Shocks from LASCO Observations // *Astrophys. J.* 2009. V. 693. 267.

Shanmugaraju A. et al. Quasi-Periodic Oscillations in Lasco Coronal Mass Ejection Speeds // *Astrophysical J.* 2010. V. 708. 450.

Vourlidas A., Ontiveros V. A Review of Coronagraphic Observations of Shocks Driven by Coronal Mass Ejections. In: Ao, X., Burrows, G.Z.R. (eds.) American Institute of Physics Conference Series, American Institute of Physics Conference Series. 2009. 1183. 139.

Webb D.F., Howard T.A. Coronal Mass Ejections: Observations // *Living Reviews in Solar Physics.* 2012. V. 9. 3.

ВЛИЯНИЕ АТМОСФЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ НА ВАРИАЦИИ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА ЧАСТИЦ ШИРОКИХ АТМОСФЕРНЫХ ЛИВНЕЙ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ УСТАНОВКИ TUNKA-GRANDE

В.А. Ерофеева, С.Д. Малахов от коллаборации TAIGA

Научно-исследовательский институт прикладной физики иркутского государственного университета, Иркутск, Россия, lalala02-02@mail.ru

INFLUENCE OF ATMOSPHERIC EFFECTS ON VARIATIONS IN THE PARTICLE FLUX DENSITY OF EXTENSIVE ATMOSPHERIC SHOWERS ACCORDING TO EXPERIMENTAL DATA FROM THE TUNKA-GRANDE ARRAY

V.A. Erofeeva, S.D. Malakhov, collaboration TAIGA

Applied Physics Institute of Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

Аннотация. Сцинтилляционная установка Tunka-Grande предназначена для детектирования заряженной компоненты широких атмосферных ливней, инициированных космическими лучами высоких и сверхвысоких энергий. Ливни, в процессе своего развития в атмосфере Земли, претерпевают различные вариации, обусловленные ее состоянием. Учёт этих вариаций позволяет точнее определять параметры первичного космического излучения. В статье представлены результаты исследования барометрического и температурного эффектов по экспериментальным данным установки Tunka-Grande.

Ключевые слова: TAIGA, Tunka-Grande, космические лучи, широкие атмосферные ливни, барометрический коэффициент, температурный коэффициент

Abstract. Tunka-Grande scintillation array is constructed to detect the charged part of extensive air showers produced by high and ultra-high energy cosmic rays. Showers, in the process of their development in the Earth's atmosphere, undergo different variations due to its condition. Taking account of these variations makes it possible to determine the parameters of primary cosmic particle more accurately. This paper presents the results of a study of barometric and temperature effects based on experimental data from the Tunka-Grande array.

Keywords: TAIGA, Tunka-Grande, cosmic rays, extensive air shower, barometric coefficient, temperature coefficient

ВВЕДЕНИЕ

Исследование первичных космических лучей (ПКЛ) высоких и сверхвысоких энергий ($E > 10^{15}$ эВ) — актуальная задача современной астрофизики. Обладая недоступной в земных условиях энергией, ПКЛ являются ценными источниками информации о неизведанных процессах и взаимодействиях. Однако их поток настолько быстро уменьшается с ростом энергии, что прямые методы регистрации при текущем развитии науки и техники неэффективны. Поэтому возникает необходимость использовать косвенные методы. Попадая в атмосферу Земли, частицы ПКЛ запускают каскад взаимодействий, порождающий поток вторичных частиц и сопутствующие излучения (черенковское, радио, флуоресценция), которые доходят до поверхности Земли и покрывают площади до десятков и сотен квадратных километров. Данное явление называется широкими атмосферными ливнями (ШАЛ). Регистрируя частицы и излучения ШАЛ, возможно определять параметры первичного излучения. На данный момент задачи, направленные на повышение точности реконструкции характеристик ПКЛ, весьма актуальны. К одной из таких задач относится учет атмосферных явлений, а именно барометрического и температурного эффектов.

Расположенный в Тункинской долине астрофизический комплекс TAIGA (Tunka Advanced Instrument for cosmic rays and Gamma Astronomy) предназначен для исследования ПКЛ путём регистрации ШАЛ [Budnev, 2022]. Установка Tunka-Grande, являющаяся частью этого комплекса, создана для детектирования заряженной компоненты ШАЛ [Монхоев, 2023], состоит из 19 станций на площади ~ 1 км².

Расположенные внутри станций датчики давления и температуры позволяют оценить корреляции метеоэффектов и плотности потока частиц ШАЛ.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

На рис. 1 представлены графики изменения среднечасовых значений темпа счёта наземной части одной из станций установки Tunka-Grande, атмосферного давления и температуры внутри станции за период с февраля по апрель 2023 г., метеоданные взяты с датчиков установки Tunka-Grande. Можно увидеть антикорреляцию темпа счёта станции и давления, это подтверждает факт наличия барометрического эффекта. Следует отметить, что такое поведение характерно для всех станций установки Tunka-Grande.

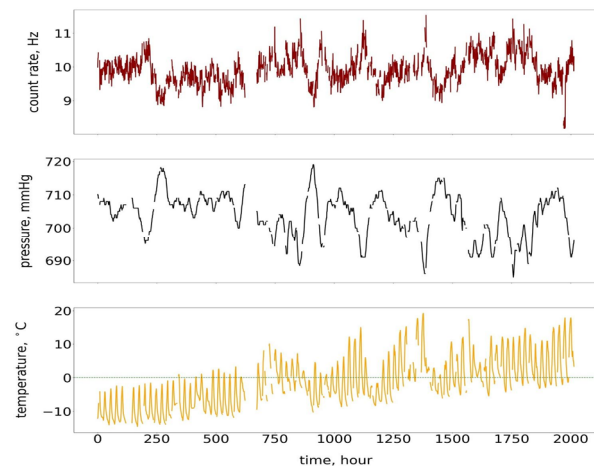


Рис. 1. График зависимости темпа счёта одной из станций, атмосферного давления и температуры от времени

БАРОМЕТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

На рис. 2 продемонстрирован график зависимости среднечасовых значений темпа счёта от атмосферного давления по аналогичным экспериментальным данным, на основе которого рассчитан барометрический коэффициент. Формула для расчета барометрического коэффициента:

$$\beta = \frac{k}{f_0} * 100\%,$$

где f_0 — значение среднего темпа счёта за период наблюдений, k — показатель наклона аппроксимирующей функции вида:

$$f(P) = k * P + b.$$

После анализа экспериментальных данных получено значение $k \approx -0.0528$ Гц/мм рт.ст., $b=47.1 \pm 0.697$ Гц и $f_0 \approx 9.9 \pm 0.7$ Гц. Учитывая это, значение барометрического коэффициента составило приблизительно $\beta = -0.53$ %/мм рт.ст.

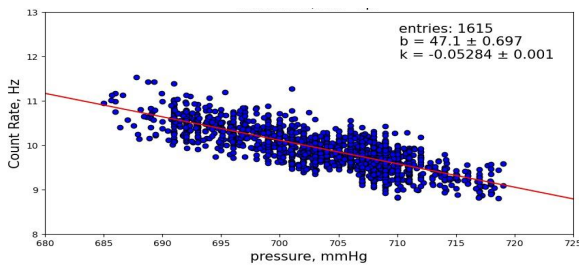


Рис. 2. График зависимости темпа счёта станции от атмосферного давления. Красная линия — линейная аппроксимация

Температурный эффект

Далее по данным темпа счёта с учетом барометрического коэффициента был построен график зависимости темпа счёта от температуры. График представлен на рис. 3. На основе этих данных был вычислен температурный коэффициент. Формула для расчета температурного коэффициента по аналогии с барометрическим коэффициентом:

$$\tau = \frac{k}{f_0} * 100\%,$$

где f_0 — значение среднего темпа счёта за период наблюдений, k — показатель наклона аппроксимирующей функции вида

$$f(T) = k * T + b.$$

После анализа экспериментальных данных получено значение $k \approx -0.00479 \pm 0.0009$ Гц/мм рт.ст.,

$b=9.89 \pm 0.0066$ Гц и $f_0 \approx 9.9 \pm 0.7$ Гц. Учитывая это, температурный коэффициент составил приблизительно $\tau = -0.048$ %/°C.

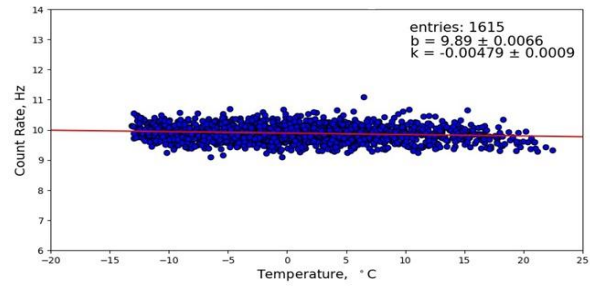


Рис. 3. График зависимости темпа счёта станции от температуры. Красная линия — линейная аппроксимация

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе было выполнено изучение влияния атмосферных эффектов на вариации плотности потока частиц ШАЛ по экспериментальным данным одной из станции установки Tunka-Grande за период с февраля по апрель 2023 года. Вычислен барометрический коэффициент, который составил $\beta = -0.53$ %/мм рт.ст. Учет влияния давления в экспериментальных данных позволил показать, что вклад температурного эффекта в вариации темпа счёта мал. Вычисленный при этом коэффициент составляет $\tau = -0.048$ %/°C.

Финансирование работы

Исследование поддержано грантом Иркутского государственного университета для молодых ученых № (091-23-306) «Определение барометрического коэффициента установки Tunka-Grande».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Монхоев Р.Д. Сцинтилляционная установка Tunka-Grande: статус, результаты и планы // Письма в ЭЧАЯ. 2023. V. 20, N 5. P. 1117–1136. DOI: 10.1134/S1547477123050552

Budnev N. et al. TAIGA - A hybrid array for high energy gamma-ray astronomy and cosmic-ray physics // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2022. V. 1039. P. 167047. DOI: 10.1016/j.nima.2022.167047

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ УСКОРЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ – ИСТОЧНИКОВ РАДИОВСПЛЕСКОВ III ТИПА ВО ВРЕМЯ МОЩНОЙ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ

А.Д. Жмуркина, Л.К. Кашапова

Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия,
angelina.zh22@gmail.com

INVESTIGATING PARAMETERS OF ACCELERATED ELECTRONS – SOURCES OF TYPE III RADIO BURSTS DURING A POWERFUL SOLAR FLARE

A.D. Zhmurkina, L.K. Kashapova

Institute of Solar-Terrestrial Physics of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia
angelina.zh22@gmail.com

Аннотация: Солнечная вспышка является феноменом, охватывающим все слои солнечной атмосферы, распространяется в межпланетную среду и оказывает влияние на околоземное космическое пространство. Электроны, ускоренные во время этого процесса до высоких энергий, взаимодействуя с плазмой солнечной атмосферы генерируют радиоизлучение, проявляющееся во всплесках разного типа. Связь между всплесками, произошедшими в разных областях радиоспектра может служить индикаторами распространения энергии во время вспышки от исходного места энерговыделения. В данной работе были проведены оценки скорости пучка ускоренных электронов и задержек радиоизлучения между разными спектральными диапазонами для мощной солнечной вспышки 9 мая 2023 г.

Ключевые слова: солнечные вспышки, радиовсплески III типа

Abstract: A solar flare is a phenomenon that involves all layers of the solar atmosphere, propagates into the interplanetary medium, and affects near-Earth space. Electrons accelerated to high energies during this process interact with the plasma of the solar atmosphere, generating radio emission manifested in bursts of various types. The relationship between bursts occurring in different regions of the radio spectrum can serve as an indicator of the energy propagation during a flare from the initial location of energy release. In this work, we have estimated the accelerated electron beam velocity and radio emission delays between different spectral bands for a powerful solar flare on 9 May 2023.

Keywords: solar flare, type III radio bursts

ВВЕДЕНИЕ

Всплески III являются распространенным видом радиовсплесков, возникающим как результат распространения ускоренных во время солнечной вспышки электронов. Радиовсплески классифицируются в соответствии с тем, как быстро меняется их частота максимума всплеска с течением времени, известная как скорость дрейфа частоты. Для всплесков типа III характерна самая высокая скорость дрейфа по частоте, среди всех известных типов радиовсплесков. Радиовсплески III типа часто возникают в самом начале солнечных вспышек и указывают на момент первичного энерговыделения, когда запускаются процессы распространения выделившейся энергии в различные слои солнечной атмосферы. Эта особенность позволяет использовать их для установления спектрального диапазона, связанного с место первичного энерговыделения.

АНАЛИЗ СОБЫТИЯ

Событие, которое мы исследовали, произошло 9 мая 2023 г. Это была мощная вспышка класса M6 по классификации GOES. Начальная фаза вспышки пришлась на 03:42 UT. Для анализа события использовались данные спектрополяриметра YAMAGAWA [<https://solarobs.nict.go.jp/>], спектрографа сети e-Callisto (ASSA, Австралия) [<https://www.e-callisto.org/>], и телескопа ASO-S/HXI [http://aso-s.pmo.ac.cn/en_index.jsp], который дает

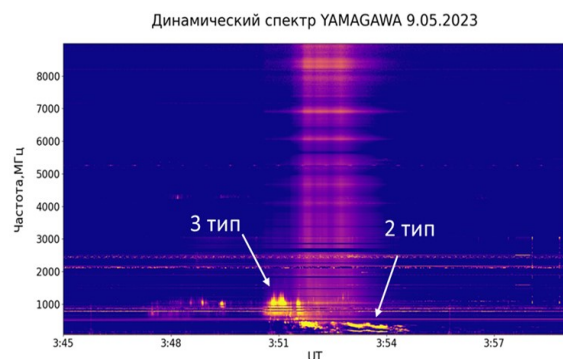


Рис. 1. Динамический спектр солнечной вспышки 9 мая 2023 г.

информацию об излучении в рентгеновском диапазоне. На динамическом спектре YAMAGAWA (рис. 1) можно увидеть серию всплесков III типа, а также всплеск II типа (рис. 1), связанный с выбросом корональной массы.

Для исследования скорости дрейфа радиовсплесков, наблюдавшихся в начале вспышки, были использованы динамические спектры одной из станций сети спектрографов e-Callisto (рис. 2) в диапазоне частот до 100 МГц. Мы видим, что мощные радиовсплески III типа наблюдались в период с 03:51 до 03:53 UT. Задержка между максимумами первого всплеска на частотах 50 МГц и 80 МГц была 4.8 сек, что дает скорость дрейфа равную -6.3 МГц/с.

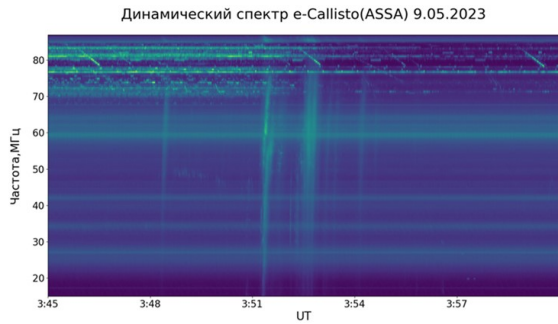


Рис. 2. Динамический спектр в диапазоне 10–90 МГц по данным спектрографа сети e-Callisto

Известно, что основным механизмом появления радиовсплесков III типа является плазменное излучение. Согласно теории, поток ускоренных электронов генерирует ленгмюровские волны. Часть энергии волн Ленгмюра преобразуется в электромагнитные волны, которые могут регистрироваться радиотелескопами. [Dulk, 1985] Так как ленгмюровские волны — это колебания плазмы с плазменной частотой f_p , то мы можем использовать выражение для связи плазменной частоты с электронной концентрацией N_e

$$f_p = \sqrt{\frac{N_e e^2}{4\pi \epsilon_0 m_e}}, \quad (1)$$

где m_e — масса электрона, ϵ_0 — электрическая постоянная.

Для связи концентрации и расстояния, на которое пролетел поток электронов, использовалась модель распределения электронной плотности Ньюкирка, с коэффициентом $\alpha = 3$, что соответствует умеренно активному Солнцу. [Newkirk, 1961]

$$N_e = N_0 \cdot \alpha \cdot \left(10^{4,32 \frac{R_0}{R}}\right), \quad (2)$$

где α — коэффициент увеличения электронной плотности, R — расстояние от центра Солнца, R_0 — радиус Солнца.

Согласно нашим расчетам скорости движения потока ускоренных электронов получились $v \approx 0.22c$, где c — скорость света в вакууме; и энергия $E \approx 12$ кэВ. Оценка времени пролета от места первичного энерговыделения до области формирования излучения на частоте 80-МГц составляет 22 сек. Сдвиг на это время указывает на всплеск на частоте 1 ГГц (см. рис. 3). Этот спектральный диапазон наиболее вероятно связан с местом первичного энерговыделения.

Сравнение временных профилей в диапазоне рентгеновского излучения (20–50 кэВ) и излучения в спектральном диапазоне предполагаемого места

формирования первичного энерговыделения показано на рис. 3 и также подтверждает эту гипотезу. Мы видим хорошее соответствие между рентгеновским и микроволновым временными профилями в области роста потока, это свидетельствует о том, что частота первичного энерговыделения действительно находится в области 1 ГГц.

Временные профили по данным разных инструментов

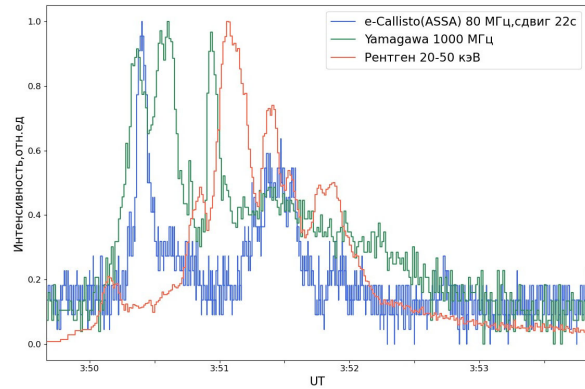


Рис. 3. Эволюция излучения в разных спектральных диапазонах

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Скорости потоков электронов близки к среднестатистическим значениям, полученным ранее другими авторами, 0.3 с, где c — скорости света. Энергии электронов генерировавших радиовсплески в начале вспышке 10–20 кэВ. Анализ теоретически полученных и измеренных задержек между временными профилями в разных спектральных диапазонах, место первичного энерго выделения находилось в области формирования микроволнового излучения на частоте 1 ГГц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Dulk G.A. Radio emission from the sun and stars // Annu. Rev. Astrophys. 1985. V. 23. P. 169–224.
- Newkirk G. The solar corona in active regions and the thermal origin of the slowly varying component of solar radio radiation // Astrophys. J. 1961. V. 133. P. 983–1013.
- URL: http://aso-s.pmo.ac.cn/en_index.jsp (дата обращения 23.05.2024).
- URL: <https://solarobs.nict.go.jp/> (дата обращения 23.05.2024).
- URL: <https://www.e-callisto.org/> (дата обращения 23.05.2024).

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ СЛАБОГО ВОЗМУЩЕНИЯ ИНДУЦИРОВАННОГО НА ГРАНИЦЕ ГОРЯЧЕЙ КОРОНАЛЬНОЙ ПЕТЛИ В СИЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Д.И. Завершинский^{1,2}, А.С. Фролова¹, Д.В. Агапова^{1,2}

¹Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, Самара, Россия, zavershinskiy.di@ssau.ru

²Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Самара, Россия

STUDYING EVOLUTION OF A WEAK PERTURBATION INDUCED AT THE BOUNDARY OF A HOT CORONAL LOOP IN A STRONG MAGNETIC FIELD

D.I. Zavershinskii^{1,2}, A.S. Frolova¹, D.V. Agapova^{1,2}

¹Samara National Research University, Samara, Russia, zavershinskiy.di@ssau.ru

²Samara Branch of P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Samara, Russia

Аннотация. В ходе проведенных исследований было получено решение граничной задачи для линейного дифференциального уравнения, описывающее динамику возмущения скорости в медленных магнитоакустических (МА) и энтропийных волнах в корональных петлях в рамках приближения бесконечно сильного поля с учетом диссипации и дисперсии за счет теплопроводности. Показано, что эволюция возмущения сжатия в условиях солнечной короны может в значительной мере определяться не только вкладом медленных МА волн, но и энтропийных волн.

Ключевые слова: МГД-волны, солнечная корона, корональная петля.

Abstract. In the course of our study, we obtained a solution to the boundary value problem for a linear evolutionary equation describing the dynamics of the velocity perturbation in slow MA and entropy waves in coronal loops in the framework of the infinitely strong magnetic field approximation, taking into account dissipation and dispersion due to thermal conduction. It is shown that the evolution of the compression perturbation in the solar corona can be largely determined not only by the contribution of slow MA waves but also of entropy waves.

Keywords: MHD waves, solar corona, coronal loop.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее распространённых типов магнитных структур в солнечной короне являются корональные петли. Фактически, данные структуры являются хорошим волноводом естественного происхождения для различных магнитогазодинамических (МГД) волн. Достаточно часто в таких структурах детектируются быстро затухающие возмущения сжатия [de Moortel, 2009], видимые как возмущение интенсивности, перемещающиеся вдоль петли. В некоторых случаях подобные возмущения можно проассоциировать с медленным магнитоакустическими (МА) волнами и использовать для задач МГД-сейсмологии [Taroyan, Erdélyi, 2009].

Для практических задач МГД-сейсмологии могут применяться различные математические модели, в зависимости от параметров, изучаемой плазмы и требуемой точности. Одним из наиболее распространённых подходов является приближение тонких потоковых трубок [Zhugzhda, 1996; Zhugzhda, Goossens 2001]. Важным преимуществом данного приближения, является тот факт, что оно позволяет в простой форме описывать влияние геометрической дисперсии. Тем не менее, в случае сильных магнитных полей, влияние геометрической дисперсии становится пренебрежимо мало по сравнению с эффектами дисперсии, связанными с теплопроводностью и неадиабатическими процессами нагрева, и для описания свойств медленных МА волн, оказывается достаточным использовать уравнения Навье-Стокса [Wang et al., 2018, Zavershinskii et al., 2019].

Когда исследуемые возмущения являются слабыми, по отношению к стационарным значениям

параметров плазмы, то решение исходной системы обычно не требуется. В этом случае для описания динамики возмущения достаточным является анализ посредством линейного эволюционного уравнения, которое может быть получено в первом приближении теории возмущений. Для задач МГД-сейсмологии достаточно часто используется не само эволюционное уравнение, а соответствующее ему дисперсионное уравнение. (см., например, [Wang et al., 2015]). Кроме того, наблюдаемые возмущения интенсивности, во многих работах, ассоциируют с динамикой только медленной МА волны, и применяют частное решение дисперсионного уравнения только для данной моды, для диагностики параметров плазмы, таких, например, как температура, коэффициент теплопроводности и т.д. Однако, возмущение, которое индуцируется в среде в строгом смысле является суперпозицией двух медленных магнитоакустических волн, и одной энтропийной волны, которые одновременно с медленными волнами возбуждаются в системе. В связи с этим прямая связь между наблюдаемым возмущением и медленной волной, бегущей на фоне стационарного профиля, не всегда в полной мере обоснована. Для корректного описания, в общем случае, требуется точное решение эволюционного уравнения, способное описать совместный вклад собственных мод в наблюдаемое возмущение.

Ранее, нами были получены решения задачи об эволюции начального возмущения в случае определяющего вклада теплового дисбаланса [Zavershinskii et al., 2021] и в случае определяющего вклада от процесса теплопроводности [Zavershinskii et al., 2023].

Однако, интерес представляет также и задача об индицировании возмущения на границе. Так, например, магнитоакустические моды могут быть индуцированы фотосферными р-модами, распространяющимися вверх в корону [Jess et al., 2011, Krishna Prasad et al., 2015]. Кроме того, возмущение сжатия может быть индуцировано как следствие впрыскивания горячей плазмы в основании петли [Selwa et al., 2015] или могут быть вызваны и вспышечными событиями [Taroyan et al., 2005]. В ходе проведенных исследований авторами было получено решение граничной задачи для эволюционного уравнения (1), описывающего динамику возмущения продольной компоненты скорости в случае определяющего вклада от процесса теплопроводности, которое в безразмерных переменных может быть записано как:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^3 \tilde{u}}{\partial \tilde{t}^3} - \gamma \frac{\partial^3 \tilde{u}}{\partial \tilde{t} \partial \tilde{z}^2} &= \frac{1}{\tilde{\tau}_{cond}} \left(\frac{\partial^4 \tilde{u}}{\partial \tilde{t}^2 \partial \tilde{z}^2} - \frac{\partial^4 \tilde{u}}{\partial \tilde{z}^4} \right), \\ \frac{\partial^3 \tilde{u}}{\partial \tilde{t}^3} - \gamma \frac{\partial^3 \tilde{u}}{\partial \tilde{t} \partial \tilde{z}^2} &= \tilde{d} \left(\frac{\partial^4 \tilde{u}}{\partial \tilde{t}^2 \partial \tilde{z}^2} - \frac{\partial^4 \tilde{u}}{\partial \tilde{z}^4} \right). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь введены следующие обозначения:

$$\begin{aligned} \tilde{u} &= \frac{v_z}{c_{si}}, \tilde{z} = \frac{z}{l}, \tilde{t} = \frac{t}{t_l}, t_l = \frac{l}{c_{si}}, c_{si} = \sqrt{\frac{k_B T_0}{m}}, \tilde{\tau}_{cond} = \\ &= \frac{\tau_{cond}}{t_l}, \tau_{cond} = \frac{l^2 C_V \rho_0}{\kappa}, \gamma = \frac{C_P}{C_V}, \tilde{u} = \frac{v_z}{c_{si}}, \tilde{z} = \frac{z}{l}, \tilde{t} = \\ &= \frac{t}{t_l}, t_l = \frac{l}{c_{si}}, c_{si} = \sqrt{\frac{k_B T_0}{m}}, \tilde{\tau}_{cond} = \frac{\tau_{cond}}{t_l}, \tau_{cond} = \\ &= \frac{l^2 C_V \rho_0}{\kappa}, \gamma = \frac{C_P}{C_V}, \\ \frac{\partial^3 \tilde{u}}{\partial \tilde{t}^3} - \gamma \frac{\partial^3 \tilde{u}}{\partial \tilde{t} \partial \tilde{z}^2} &= \tilde{d} \left(\frac{\partial^4 \tilde{u}}{\partial \tilde{t}^2 \partial \tilde{z}^2} - \frac{\partial^4 \tilde{u}}{\partial \tilde{z}^4} \right). \end{aligned} \quad (2)$$

где C_V, C_P — удельная теплоемкость при постоянном объеме и давлении, ρ_0, T_0 — плотность и температура плазмы, l — длина корональной петли, κ — коэффициент теплопроводности плазмы, k_B — постоянная Больцмана, m — средняя масса одной частицы. Далее будем полагать все величины безразмерными и опустим знак волны над переменными.

Для демонстрации важности рассмотрения полного решения для описания динамики волн, покажем результаты расчёта (см. рис. 1) на основе полученного решения уравнения (1) при значении параметра $\tilde{\tau}_{cond} = 20$, что соответствует плотным горячим петлям (см. таблицу 1 в [9]) и полагая, что на границе возбуждается вторая гармоника $u(t, 0) = A_0 \sin(2\pi t)$.

Легко заметить, что при существенном влиянии теплопроводности, что зачастую имеет место в солнечной короне, полное решение может являться результатом сопоставимого вклада от магнитоакустических и энтропийных волн. Динамика существенно

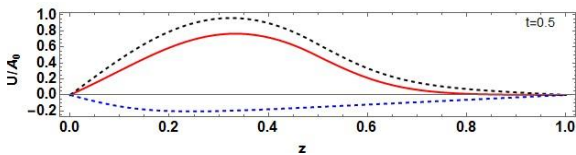


Рис. 1. Пример расчета динамики возмущения, заданного на границе. Красная сплошная линия соответствует полному решению, черная штриховая линия — двум медленным волнам, синяя штриховая линия — энтропийной моде

зависит, от соотношения характерного периода возбуждаемой волны и характерного масштаба, связанного с теплопроводностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе получено решение граничной задачи для линейного дифференциального уравнения, описывающее динамику возмущения скорости в медленных МА и энтропийных волнах в корональных петлях в рамках приближения бесконечно сильного поля с учетом диссипации и дисперсии за счет теплопроводности. Показано, что эволюция возмущения сжатия в условиях солнечной короны может в значительной мере определяться не только вкладом медленных МА волн, но и энтропийных волн.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 23-22-10008 (<https://rscf.ru/project/23-22-10008/>) и Правительства Самарской области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- de Moortel I. Longitudinal Waves in Coronal Loops // Space Science Reviews. 2009. V. 149. N 1–4. P. 65–81.
- Jess D.B., De Moortel I., Mathioudakis M., Christian D.J., Reardon K.P., Keenan F.P. The Source of 3 Minute Magnetoacoustic Oscillations in Coronal Fans // Astrophysical Journal, 2012. V. 757. N 2. P. 160.
- Krishna Prasad S., Jess D.B., Khomenko E. On the Source of Propagating Slow Magnetoacoustic Waves in Sunspots // Astrophysical Journal Letters. 2015. V. 812. N 1. P. L15.
- Selwa M., Murawski K., Solanki S.K. Excitation and damping of slow magnetosonic standing waves in a solar coronal loop // Astron. Astrophys. 2005. V. 436. P. 701.
- Taroyan Y., Erdélyi R. Heating Diagnostics with MHD Waves // Space Science Reviews. 2009. V. 149. N 1–4. P. 229–254.
- Taroyan Y., Erdélyi R. i, Doyle J.G., Bradshaw S.J. Footpoint excitation of standing acoustic waves in coronal loops // Astronomy and Astrophysics. 2005. V. 438. N 2. P. 713–720.
- Wang T., Ofman L., Sun X., Provornikova E., Davila J.M., Evidence of thermal conduction suppression in a solar flaring loop by coronal seismology of slow-mode waves // Astrophysical Journal Letters. 2015. V. 811. N 1. P. L13.
- Wang T., Ofman L., Sun X., Solanki S.K., Davila J.M. Effect of Transport Coefficients on Excitation of Flare-induced Standing Slow-mode Waves in Coronal Loops // Astrophysical Journal. 2018. V. 860. N 2. P. 107.
- Zavershinskii D.I., Kolotkov D.Y., Nakariakov V.M., Molevich N.E., Ryashchikov D.S. Formation of quasi-periodic slow magnetoacoustic wave trains by the heating/cooling misbalance // Phys. Plasmas. 2019. V. 26. N 8. P. 82113.
- Zavershinskii D.I., Kolotkov D.Y., Riashchikov D.S., Molevich N.E. Mixed Properties of Slow Magnetoacoustic and Entropy Waves in a Plasma with Heating/Cooling Misbalance // Sol. Phys. 2021. V. 296. N 6. P. 96.
- Zavershinskii D.I., Molevich N.E., Riashchikov V., Belov S.A. Exact solution to the problem of slow oscillations in coronal loops and its diagnostic applications // Front. Astron. Sp. Sci. 2023. V. 10. P. 1167781.
- Zhugzhda Y.D. Force-free thin flux tubes: Basic equations and stability // Physics of plasmas. 1996. N 1 (3). P. 10–21.
- Zhugzhda Y.D. Goossens M. Hidden problems of thin-flux-tube approximation // Astronomy & Astrophysics. 2001. N 1. (377). P. 330–342.

МАЙСКИЙ ВСПЫШЕЧНЫЙ ЭКСЦЕСС 2024 Г.

Е.С. Исаева¹, С.А. Язев^{1,2}

¹Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

²Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

THE FLARE EXCESS OF MAY 2024

E.S. Isaeva¹, S.A. Yazev^{1,2}

¹Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, ele3471@yandex.ru

²Irkutsk State University, Irkutsk, Russia, ele3471@yandex.ru

Аннотация. В мае 2024 г. на Солнце наблюдался значительный всплеск вспышечной активности, сопровождавшийся многочисленными выбросами коронального вещества. Следствием явилась сильнейшая за последние два десятилетия магнитная буря 10–12 мая, достигшая высшего балла G5. Настоящая работа посвящена результатам предварительного анализа указанного вспышечного эксцесса.

Ключевые слова: Солнце, вспышки, магнитные бури, активные области.

Abstract. In May 2024, the Sun experienced a significant increase in flare activity, accompanied by numerous coronal matter ejections. The consequence was the magnetic storm on May 10–12 which became the strongest storm observed in the last two decades and which reached the highest G5 level. This work is devoted to the results of a preliminary analysis of this flare excess.

Keywords: Sun, flare, magnetic storms, active areas.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно общепринятому подходу, 25-ый солнечный цикл начался с января 2020 г. Появлению первых групп пятен 25 цикла предшествовало возникновение так называемых эфемерных активных областей (без пятен), начиная с 2017 г. [Golovko, 2020]. Фактически первые пятна 25 цикла появились на фазе глубокого спада предыдущего 24 цикла, в июле 2019 г.

За первый год цикла произошло всего 88 вспышечных событий, из которых всего две вспышки относились к рентгеновскому классу M (остальные — C). В 2021 году количество вспышек увеличилось в 5 раз, были отмечены две вспышки класса X (X1.0 и X1.5). Количество вспышек класса M увеличилось до 27, но все они были сравнительно маломощные и не превышали значения класса M5.0. В 2022 г. Произошло 2297 вспышек всех классов, из них 7 вспышек класса X. [<https://xras.ru/>]

В 2023 г. вспышечная активность продолжала нарастать, общее количество вспышек достигло 3170. Увеличилось и число сильных вспышек. Отмечены вспышки M5.0 – M8.0 (вспышки класса, превышающего M5.0, считаются сильными). Также выросла мощность самых сильных вспышек. В ночь с 31 декабря 2023 г. на 1 января 2024 г. произошла вспышка класса X5.0, которая стала первой вспышкой высокой мощности, начиная с 10 сентября 2017 г. (тогда был зафиксирован класс события X6.7). Всего с начала 2020 г. на Солнце произошло 6010 вспышек, из них 566 вспышек класса M и 22 класса X. Это существенно превысило показатели предыдущего 24-го цикла за такой же интервал времени от начала цикла в январе 2009 г. (всего — 3006, класса M — 258, класса X — 15) (см. рис. 1).



Рис. 1. Количественное сравнение вспышек в 24-м (серый цвет) и 25-м циклах (черный цвет), 1 — 2009/2020; 2 — 2010/2021; 3 — 2011/2022; 4 — 2012/2023)

ВСПЫШЕЧНЫЙ ВСПЛЕСК НАЧАЛА 2024 г.

Рассмотрим подробнее первые месяцы 2024 г. С учетом мощного всплеска активности пятен в июне–июле 2023 г., можно считать, что цикл находится на стадии максимума. Соответственно, выросла и интенсивность генерации вспышек. Общее число вспышек с 1 января по 22 мая 2024 г. составило 1406 событий. При этом три активные области (далее АО) продемонстрировали крайне высокую вспышечную продуктивность, зафиксировали — более 100 вспышек на одну группу пятен. Это АО 13576 (123 вспышки), АО 13615 (157 вспышек) и АО 13664 (101 вспышка). При этом АО 13576 (максимальная площадь группы пятен — 660 миллионных долей полусферы, далее мдп) произвела две очень сильные вспышки — M9.0 и X2.5 соответственно 11 и 16 февраля 2024 г. Еще одна группа пятен с высокой вспышечной продуктивностью — АО 13615 (максимальная площадь группы пятен около 1000 мдп) — явилась источником пяти сильных вспышек (M7.4, M7.1, M6.1, M9.4 в период с 20 по 31 марта, а также вспышка X 1.1 28 марта 2024 г.).

Сильные вспышки в мае 2024 г.

1	2	3	4	1	2	3	4
30	X1.6	03.05.2024	3663	38	X2.2	09.05.2024	3664
	M9.1	04.05.2024	3663	39	X1.1.	09.05.2024	3664
	M9.0	05.05.2024	3663	40	X3.9	10.05.2024	3664
	M8.4	05.05.2024	3663		M5.9	10.05.2024	3664
31	X1.3	05.05.2024	3663	41	X5.8	11.05.2024	3664
	M7.4	05.05.2024	3663	42	X1.5	11.05.2024	3664
32	X1.2	05.05.2024	3663		M8.8	11.05.2024	3664
33	X4.5	06.05.2024	3663	43	X1.0	12.05.2024	3664
	M5.1	07.05.2024	3663		M6.6 LDE	13.05.2024	3664
	M8.2	07.05.2024	3663	44	X1.7	14.05.2024	3664
34	X1.0	08.05.2024	3663	45	X1.2	14.05.2024	3664
35	X1.0	08.05.2024	3664	46	X8.7	14.05.2024	3664
36	X1.0	09.05.2024	3664	47	X3.5	15.05.2024	3664
37	X1.0	09.05.2024	3664	48	X2.9	15.05.2024	3685

Подобные АО привлекают внимание, однако считаются хоть и несчастными, но нормальными явлениями, особенно на фазах максимума и начала спада циклов солнечной активности. В группах пятен большой площади со сложной топологией магнитного поля (прежде всего типа «бета-гамма-дельта») одна — две вспышки класса X выглядят как естественное явление.

Сравнительно неожиданным вспышечным эксцессом, по-видимому, следует считать наблюдавшиеся в мае 2024 г. многочисленные вспышки наивысшего класса X, которые произошли в двух активных областях – 13663 и 13664. Данные о сильных вспышках в указанных группах пятен приведены в таблице 1. В первом столбце указан номер вспышки класса X, считая от начала текущего 25-го цикла, во втором столбце показан рентгеновских класс сильной вспышки, в третьем столбце – дата вспышки, в четвертом – группа пятен, где произошла вспышка.

АО 13663 наблюдалась в северном полушарии Солнца в период с 1 по 11 мая вплоть до захода за западный лимб. Максимальной площади (600 мдп) группа пятен достигла 7 мая. В этой группе пятен во время пребывания на видимом полушарии Солнца произошло 80 вспышек всех классов, в том числе, как видно из таблицы 1, 11 сильных вспышек, в том числе 5 вспышек класса X. Следует отметить, что вспышечная активность АО 13663 продолжалась и после момента захода за западный лимб Солнца 12 мая, не исключено, что уже за лимбом здесь также произошли сильные вспышки, не наблюдавшиеся с Земли.

АО 13664 наблюдалась в южном полушарии Солнца в период со 2 по 14 мая 2024 г., фактически весь процесс роста группы пятен происходил на глазах наблюдателей. Максимального значения площади (2400 мдп) группа пятен достигла 11 мая, уже вблизи западного лимба. Отметим, что значение площади этой группы пятен лидирует с большим (двойным) отрывом в списке АО в текущем цикле. В этой группе пятен на видимом

полушарии произошла 101 вспышка, в том числе 16 сильных, включая 13 вспышек класса X. 14 мая здесь произошла вспышка класса X8.7 – вторая по мощности за семь лет после вспышки X9.3, наблюдавшейся 6 сентября 2017 г. и семнадцатая в рейтинге вспышек за весь период наблюдений, начиная с 1976 г. Важно отметить, что промежутки времени между двумя последовательными вспышками класса X составляли всего несколько часов. Четыре вспышки класса X подряд в течение суток (9 мая) выглядят крайне редкой аномалией. Подобная скважность мощных вспышечных событий указывает на чрезвычайно высокий запас энергии, и/или эффективную подпитку энергией магнитных структур обсуждаемой АО.

В качестве аналога АО 13664 можно назвать только АО 486, наблюдавшуюся с 23 октября по 11 ноября 2003 г., (максимальная площадь — 2610 мдп) и генерировавшую 17 сильных вспышек, включая 8 класса X (табл. 2). [<https://www.spaceweatherlive.com/>]

Таблица 2.

Сравнение количества вспышек в группах 00486 и 13664

	C	M	X
00486	10	23	9
13664	36	52	13

Впрочем, надо заметить, что, хотя по числу X-вспышек АО 13664 превосходит АО 486, но значительно уступает по их мощности: в АО 486 отмечены сильнейшие за всю историю наблюдений вспышки классов X40+, X24+, X14 и X12, при этом оценки самых мощных из них условны, поскольку являются косвенными (наблюдалось зашкаливание сенсоров).

Для оценки энергетики солнечных вспышек традиционно применяется так называемый вспышечный индекс. Как известно (например, см. [Ишков, 2010]), с 1976 г. в качестве такого индекса используется значение потока мягкого

рентгеновского излучения вспышки в диапазоне 0.1 – 0.8 нм (12.5 эВ – 1 кэВ) по данным спутников серии GOES. Введены классы, оценивающие диапазоны максимальной интенсивности рентгеновского излучения вспышек в соответствии со следующими правилами $(1-9) \times 10^{-6}$ Вт/м² (класс C), $(1-9) \times 10^{-5}$ Вт/м² (класс M), $(1-n) \times 10^{-4}$ Вт/м² (класс X), где n ограничено возможностями сенсора. Согласно этой методике вычисления вспышечного индекса, нами был произведен расчет вспышечных индексов, отражающих энергетику майского вспышечного эксцесса 2024 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, следует отметить, что в течение двух недель, в первой половине мая 2024 г., две группы пятен 13663 и 13664 произвели 30 сильных вспышек, в том числе 18 класса X, что является рекордным показателем за полувековую историю наблюдений рентгеновских вспышек на Солнце. Суммарный вспышечный индекс, отражающий энергетику событий, для указанных двух групп пятен составляет 98,005 — это 56,4 % от интегрального вспышечного индекса текущего 25-го цикла, начиная с января 2020 г.

Отметим морфологическое сходство событий мая 2024 г. и октября–ноября 2003 г. (рис. 2). В обоих случаях одновременно наблюдались по крайней мере две крупные группы пятен большой максимальной площади (одна из двух — превышавшей 2400 мдп) при одновременном практическом отсутствии на диске других малых групп пятен. В обоих случаях вспышечноактивные группы (в 2003 г., 13663 и 13664 в 2024 г. — 486 и 488) находились в разных (северном и южном) полушариях), в обоих случаях превалировала вспышечная активность в южной, более крупной группе пятен.

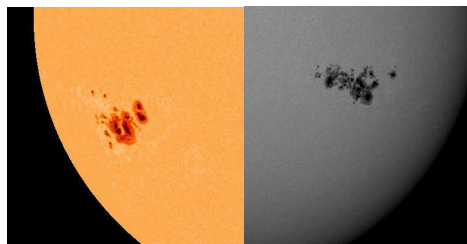


Рис. 2. Слева: группа пятен 00486. Справа: группа 13664

Если продолжать указанную аналогию, можно отметить, что вспышечный эксцесс 2003 г. произошел на фазе спада цикла, после максимума. Это обстоятельство позволяет предположить, что указанный выше всплеск пятенной активности летом 2023 г. в действительности является максимумом текущего цикла, который уже миновал. Огромные объемы высвободившейся во время вспышек майского эксцесса 2024 г. магнитной энергии также позволяет ожидать дальнейшего спада активности Солнца и предполагать, что достигнутое в июне–июле 2023 значение Международного числа солнечных пятен в текущем цикле уже не повторится.

Работа выполнена на УНУ «Астрофизический комплекс МГУ-ИГУ», поддержана Минобрнауки России (соглашение 13.УНУ.21.0007, Госзадание FZZE-2020-0017, FZZE-2020-0024).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ишков В.Н. Солнце в декабре 2009 – январе 2010 гг. // Земля и Вселенная. № 3. С. 22–24.
Golovko A.A. The beginning of 25-th Solar Cycle /// SCOSTEP Presto Newsletter. 2020. V. 24. P. 4–5.
Space Weather Prediction Centre NOAA
<https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression>
URL: <https://www.spaceweatherlive.com/>
URL: <https://xras.ru/>

АНАЛИЗ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ КЛАССА M3.0 ПО ДАННЫМ МИКРОВОЛНОВОГО И УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Р.Р. Каракотов, А.А. Кузнецов, С.А. Анфиногентов

Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской Академии Наук, Иркутск, Россия,
r.r.karakotov97@iszf.irk.ru

INVESTIGATION OF M3.0 CLASS SOLAR FLARE IN THE MICROWAVE AND ULTRAVIOLET EMISSION

R.R. Karakotov, A.A. Kuznetsov, S.A. Anfinogentov

Institute of Solar-Terrestrial Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia,
r.r.karakotov97@iszf.irk.ru

Аннотация. В работе проведен анализ солнечной вспышки класса M3.0 6 апреля 2023 г. по данным наблюдений в ультрафиолетовом (Solar Dynamics Observatory/Atmospheric Imaging Assembly — SDO/AIA) и микроволновом (Сибирский Радиогелиограф — СРГ) диапазонах. Два эпизода медленных волн, возбужденных вспышкой, были зафиксированы в канале 131 Å SDO/AIA. Параметры колебаний согласуются с параметрами, приведенными в других работах. Микроволновые наблюдения показали, что динамика источника радиоизлучения отражает процесс энерговыделения: в разное время доминируют разные вспышечные петли. Корреляции между движениями источников микроволнового и ультрафиолетового излучения не было обнаружено. Колебания потока радиоизлучения, которые могли бы быть связаны с медленными волнами, не обнаружены, что можно объяснить амплитудой МГД-волны, недостаточно высокой, чтобы вызвать заметную для СРГ модуляцию потока.

Ключевые слова: магнитная гидродинамика (МГД) — Солнце: корона — Солнце: колебания — волны — Солнце: радиоизлучение

Abstract. Analysis of the M3.0 class solar flare on 2023-04-06 was performed using the ultraviolet (Solar Dynamics Observatory/Atmospheric Imaging Assembly — SDO/AIA) and microwave (Siberian Radio Heliograph — SRH) data. Two cases of slow magnetoacoustic waves triggered by the flare were detected in SDO/AIA 131 Å channel. The properties of oscillations are consistent with the results reported by other researchers. Microwave observations show that the dynamics of the radio source reflects the process of energy release: different flaring loops dominate at different times. No correlation was found between the movements of microwave and ultraviolet sources. We have found no slow-wave-associated fluctuations in the microwave flux, which can be explained by the amplitude of the MHD wave being insufficient to cause a noticeable (by the SRH) flux modulation.

Key words: magnetohydrodynamics (MHD) – Sun: corona – Sun: oscillations – waves – Sun: radio radiation

В работе рассматривается солнечная вспышка класса M3.0, произошедшая 2023-04-06T05:36:00 — 06:10:00 UT на юго-восточном лимбе. Используются данные наблюдений в ультрафиолетовом диапазоне на канале 131 Å (10^7 К и 1.58×10^7 К) прибора SDO/AIA и в микроволновом диапазоне на двух решетках Сибирского Радиогелиографа (3–6 ГГц, 6–12 ГГц).

Вспышечная область в ультрафиолетовом диапазоне представляла собой систему петель, из которой две пересекающиеся в проекции петли поочередно проявляли активность, визуально увеличивая свою яркость (рис. 1). В ходе вспышечной активности в 2-х корональных петлях зафиксированы 2 эпизода медленных магнитозвуковых волн (рис. 1, правая панель, и рис. 2).

Построенные пространственно-временные диаграммы показывают, что перемещающаяся область повышенной яркости практически не меняет свою интенсивность со временем, что является признаком медленных магнитозвуковых волн.

Интересным является то, что в колебание во второй петле не проходит полный путь по петле (40 % петли до первого отражения). Вид колебания на диаграмме говорит о том, что возмущение, возникшее в основании петли, прошло часть петли, отразилось в середине петли (назовем это место «зеркальной

точкой 1»), прошло часть обратного пути, после чего снова отразилось («зеркальная точка 2»). Положение второй зеркальной точки изменяется со временем и становится ближе к середине петли, в то время как первая зеркальная точка практически не меняет своего положения. Уменьшение наклона линии перемещения возмущения на пространственно-временной диаграмме говорит о том, что проекция скорости возмущения на плоскость наблюдения уменьшается, что, вероятно, соответствует уменьшению температуры петли, в которой происходит распространение.

Параметры колебаний приведены в табл. 1. Они находятся в согласии с ранее приведенными результатами, например, [Kumar et al., 2013], [Kumar et al., 2015], [Wang et al., 2015] и [Mandal et al., 2016].

Таблица 1.

Параметры колебаний по данным канала 131 Å SDO/AIA

Петля	Длина петли L, Мм	Период колебания P, с	Скорость v, км/с	Ширина возмущения δ, Мм	δ / L, %
1	71.4±1.6	346±13	413±24	12.2	17±0.7
2	123.7±2.1	250–360 (после 1-го полупериода)	81–380 (после 1-го полупериода)	8.9	7.3±0.6

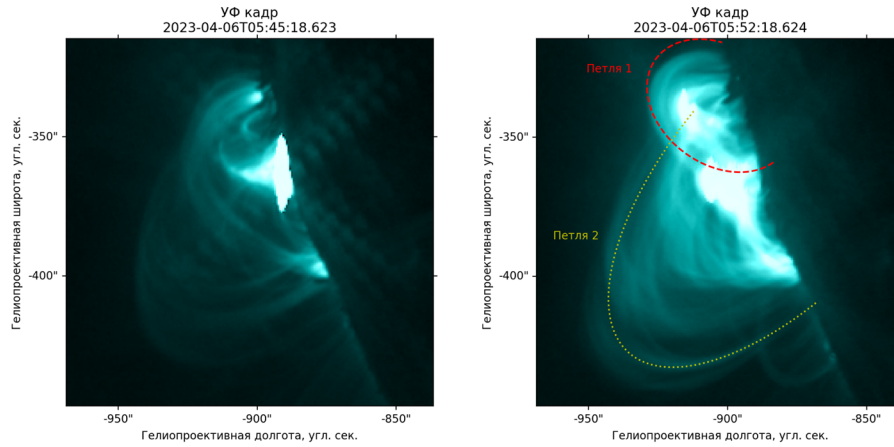


Рис. 1. Участок солнечной короны по наблюдениям в канале 131 Å SDO/AIA. На левой панели показано уярчение в первой вспышечной петле (в центре изображения), на правой — уярчение во второй петле. Линиями отмечены петли, в которых были замечены периодические изменения яркости

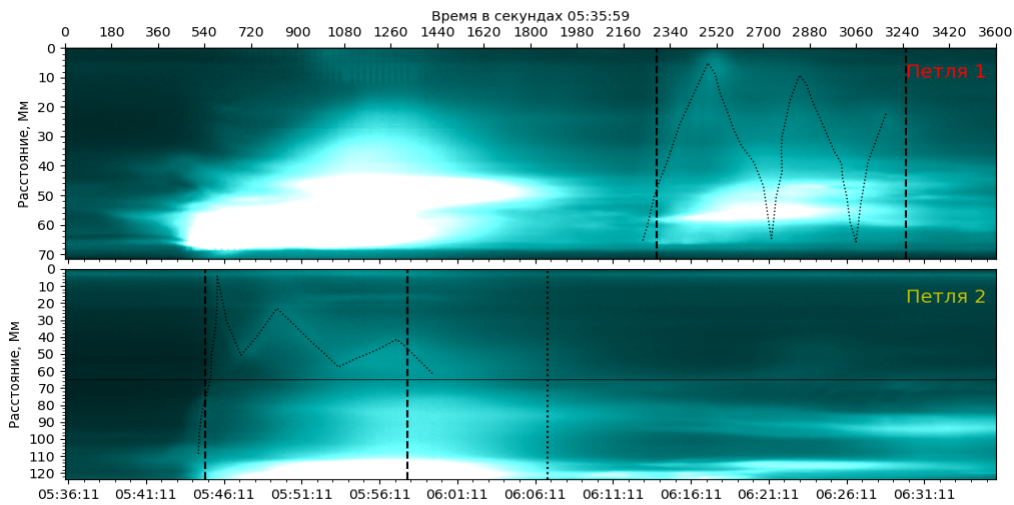


Рис. 2. Пространственно-временные диаграммы по данным канала 131 Å SDO/AIA, построенные для двух корональных петель. Верхняя панель: колебание зафиксировано в промежутке 6:14–6:28 UT с периодом ~6 мин. Нижняя панель: временной промежуток 5:45–6:07 UT. Виден рост периода колебаний со временем

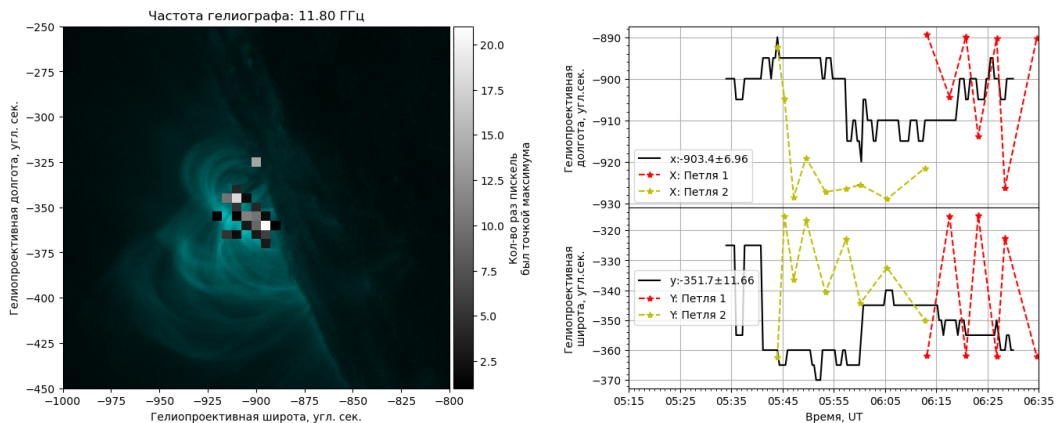


Рис. 3. Левая панель: участок солнечной короны по данным канала 131 Å SDO/AIA и положения максимума радиосточника на частоте 11.8 ГГц по данным СРГ (оттенки серого). Правая панель: координаты положения максимума радиосточника на частоте 11.8 ГГц (чёрная линия) и уярчения в ультрафиолетовом диапазоне по данным канала 131 Å SDO/AIA (красная и жёлтая линия показывают соответственно параметры уярчений в петлях 1 и 2), в зависимости от времени

Вспышка наблюдалась в микроволновом диапазоне Сибирским Радиогелиографом. Данные в ультрафиолетовом диапазоне показали, что сначала доминировала южная петля, потом загоралась более

северная петля, спустя время она затухала. Движения микроволнового источника отражают эту динамику: наблюдалось смещение максимума излучения от одной петли к другой и обратно (рис. 3).

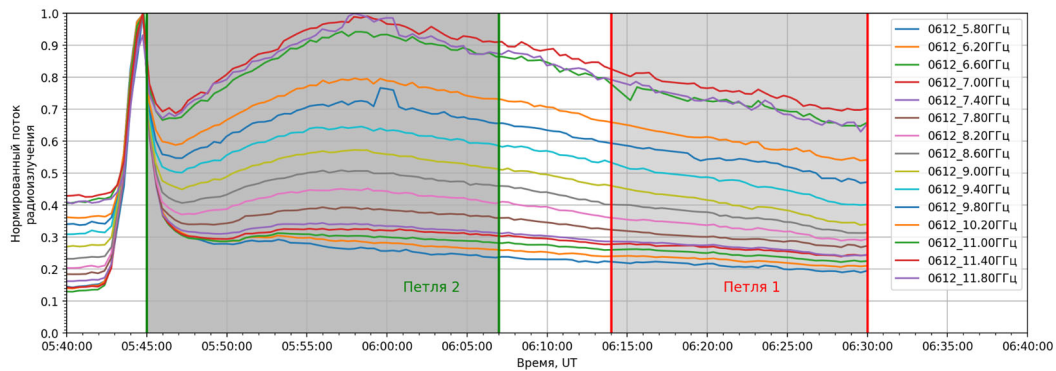


Рис. 4. Нормированный поток радиоизлучения на частотах Сибирского Радиогелиографа. Серая область с красными границами — временной промежуток колебаний в первой петле, область с зелеными границами — колебания во второй петле

По результатам анализа временных профилей потока радиоизлучения (рис. 4), колебательные процессы (соответствующие или аналогичные колебаниям в УФ диапазоне), не были обнаружены. Это можно объяснить, во-первых, амплитудой МГД-волны, которая, по-видимому, была недостаточно высокой, чтобы вызвать заметный для СРГ отклик в микроволновом диапазоне. С другой стороны, угловой размер МГД-неоднородности мог быть меньше диаграммы направленности радиогелиографа. Оценка размера неоднородности по данным SDO/AIA дает величину ~ 17 и 12 угловых секунд для 1-й и 2-й петли, соответственно, что меньше характерных размеров главного максимума диаграммы направленности СРГ (24–12 угловых секунд на решетке 6–12 ГГц) или сравнимо с ними; в результате наблюдаемая на СРГ амплитуда возмущения существенно уменьшается и, вероятно, не фиксируется. Тем не менее, данные наблюдений в микроволновом диапазоне показали, что в ходе вспышки происходит изменение геометрии источника радиоизлучения — смещение его максимума.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, впервые были проведены наблюдения плещущихся колебаний по данным СРГ и SDO/AIA. Были найдены два эпизода медленных волн, проведена оценка параметров зафиксированных колебаний. Параметры колебаний согласуются с параметрами, приведенными в других

работах. Динамика источника микроволнового излучения отражает процесс энерговыделения, показывая, что в разное время доминируют разные петли. Корреляция между движениями источников микроволнового и ультрафиолетового излучения не была обнаружена. Колебания потока радиоизлучения, которые могли бы быть связаны с медленными волнами, не обнаружены; это можно объяснить амплитудой МГД-волны, недостаточно высокой, чтобы вызвать заметную для СРГ модуляцию потока и/или малым размером МГД-неоднородности в сравнении с размерами диаграммы направленности радиогелиографа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Kumar P., Nakariakov V.M., Cho K.-S. X-Ray and EUV observations of simultaneous short and long period oscillations in hot coronal arcade loops // *Astrophysical J.* 2015, V. 804. Iss. 1.
- Kumar P., Innes D.E., Inhester B. Solar Dynamics Observatory/Atmospheric Imaging Assembly Observations of a Reflecting Longitudinal Wave in a Coronal Loop // *Astrophysical J. Lett.* 2013. V. 779, Iss. 1.
- Wang T., Ofman L., Sun X., Provornikova E., Davila J.M. Evidence of Thermal Conduction Suppression in a Solar Flaring Loop by Coronal Seismology of Slow-mode Waves // *Astrophysical J. Lett.* 2015. V. 811, Iss. 1.
- Mandal S., Yuan D., Fang X. et al. Reflection of Propagating Slow Magneto-acoustic Waves in Hot Coronal Loops: Multi-instrument Observations and Numerical Modeling // *Astrophysical J.* 2016. V. 828, Iss. 2.

ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУР ХРОМОСФЕРНОЙ СЕТКИ ПО ДАННЫМ С КИТАЙСКОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ ASO-S: ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Н.В. Карачик, Е.П. Миненко

Астрономический институт Академии наук Республики Узбекистан, Ташкент, Узбекистан,
ninakarachik@mail.ru

INVESTIGATION OF THE CHROMOSPHERIC NETWORK STRUCTURES USING DATA FROM THE CHINESE SPACE OBSERVATORY ASO-S: PRELIMINARY RESULTS

N.V. Karachik, E.P. Minenko

Ulugh Beg Astronomical Institute of Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan, ninakarachik@mail.ru

Аннотация. Первая комплексная китайская космическая солнечная обсерватория ASO-S (Advanced Space-based Solar Observatory), запущенная 8 октября 2022 г., имеет на борту три основных инструмента. Нами были использованы данные с солнечного телескопа Лайман- α (LST — Lyman- α Solar Telescope) для исследования структур хромосферной сетки. С помощью разработанной нами методики на основе функции WATERSHED были автоматически определены контуры хромосферной сетки и оценены типичные размеры ее ячеек.

Ключевые слова: хромосферная сетка, супергранулы, хромосфера

Abstract. The first comprehensive Chinese dedicated solar observatory in space ASO-S (Advanced Space-based Solar Observatory), launched on October 8, 2022, has three main instruments on board. We used data from the Lyman- α Solar Telescope (LST) to study the structures of the chromospheric network. Using the developed method based on the WATERSHED function, we automatically determined the contours of the chromospheric network and estimated the typical sizes of its cells.

Keywords: chromospheric network, supergranules, chromosphere

ВВЕДЕНИЕ

ASO-S (Advanced Space-based Solar Observatory) — первая комплексная китайская передовая космическая солнечная обсерватория, успешно запущенная 8 октября 2022 г. с космодрома Цзюцюань, Китай [Gan et al., 2023]. К основным научным целям ASO-S относятся изучение солнечного магнитного поля и два самых сильных вида извержений на Солнце — солнечных вспышек и корональных выбросов массы. Другими словами, обсерватория призвана наблюдать и изучать их формирование, эволюцию, взаимодействие и взаимное влияние. Для реализации этих научных целей ASO-S использует три инструмента на своем борту:

- векторный магнитограф полного диска (FMG — Full disc vector MagnetoGraph) для измерения векторного магнитного поля полного диска;
- устройство для формирования изображения жесткого рентгеновского излучения (HXI — Hard X-ray Imager) для наблюдения нетепловых сигналов от ≈ 30 до 200 кэВ, излучаемых энергичными электронами;
- и солнечный телескоп Лайман- α (LST — Lyman- α Solar Telescope) для наблюдения как солнечного диска, так и внутренней короны на расстоянии до 2,5 солнечных радиусов в Лайман- α и видимом свете.

В свою очередь телескоп LST состоит из следующих инструментов: Solar Disk Imager (SDI), Solar Corona Imager (SCI), White-light Solar Telescope (WST), и двух направляющих телескопов [Li et al., 2019].

Хромосферная сетка является связующим звеном между корональными магнитными структурами и их фотосферными основаниями, т.е. образуют переход

от фотосферных силовых трубок к корональным петлям и открытым силовым линиям. Изучение эволюции, динамики и взаимосвязи ячеек хромосферной сетки с другими образованиями солнечной атмосферы (например, корональными дырами, активными областями, протуберанцами, корональными яркими точками и др.) является актуальной и важной задачей солнечной физики.

В данном докладе мы представляем методику выделения границ хромосферной сетки на снимках с солнечного телескопа Лайман- α (LST инструмента SDI) на борту обсерватории ASO-S и полученные первые результаты анализа размеров ячеек хромосферной сетки.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Нами были использованы цифровые снимки с космической обсерватории ASO-S телескопа LST с инструмента SDI, предназначенного для формирования снимков Солнца от центра диска до 1,2 солнечных радиусов в диапазоне волн Лайман-альфа ($\text{Ly}\alpha$) $121,6 \pm 4,5$ нм. Размер цифровых снимков 4608×4608 пикселей, апертура инструмента 60 мм. Были использованы снимки за период с 1 апреля 2023 г. по 1 апреля 2024 г. с частотой примерно 1 снимок в сутки.

Предварительная обработка снимков (исправление темного тока, выравнивание поля, коррекция плохих/битых пикселей и т.д.) выполнена согласно предложенной разработчиками процедуре [http://asos.pmo.ac.cn/asoswebsite/guide/LST_Userguide_20230625.pdf].

Для изучения размеров и особенностей

распределения ячеек хромосферной сетки нами был разработан независимый от наблюдателя надежный алгоритм определения их границ. Наша методика основана на таком методе сегментации изображений как watershed или водораздел. Коротко суть метода водораздела можно объяснить следующим образом. Предлагается рассматривать изображение как некоторую карту местности, где значения яркостей представляют собой значения высот относительно некоторого уровня. Если эту местность заполнять водой, тогда образуются бассейны. При дальнейшем заполнении водой, эти бассейны объединяются. Места объединения этих бассейнов отмечаются как линии водораздела. Метод водораздела является одним из наиболее эффективных методов сегментации изображений.

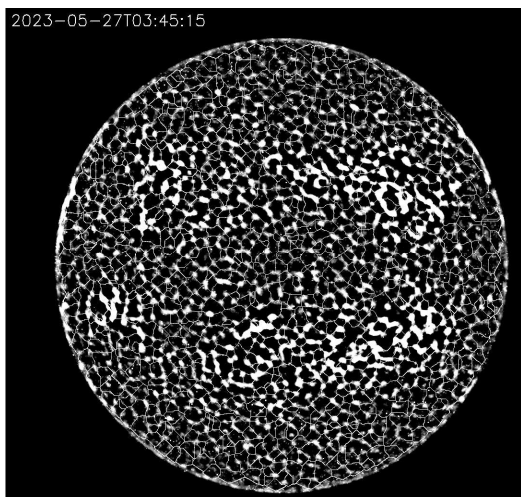


Рис. 1. Пример изображения LST/ASO-S за 27 мая 2023 г. с выделенными границами хромосферной сетки

Реализованная нами процедура выделения границ сетки состоит из следующих последовательных этапов:

- Вычитание из исходного изображения сглаженного с использованием фильтра размером 100 пикселей для удаления глобальных изменений фона на диске;
- Формирование бинарного изображения;
- Применение функции MORPH_CLOSE к полученному изображению для формирования более замкнутой структуры хромосферной сетки;
- Сегментация полученного изображения с помощью функции WATERSHED.

Разработанный алгоритм реализован в среде программирования IDL [Galloy, 2015]. С помощью созданной программы были обработаны 369 цифровых снимков телескопа LST/SDI.

На рис. 1 представлен пример изображения с выделенными с помощью разработанной нами методики границ хромосферной сетки. Как видно из рисунка, разработанная нами программа достаточно точно обрисовывает границы ячеек.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно описанной выше методике были определены границы хромосферной сетки и оценены

типичные размеры ее ячеек. Размер ячеек определялся как диаметр круга с площадью равной площади ячейки. На рис. 2 представлена гистограмма распределения диаметра ячеек за весь рассматриваемый период.

Как видно из графика, максимум распределения диаметра ячеек соответствует значению 38 Мм, что очень близко к указанному в недавней обзорной работе по супергранулам [Rincon, Rieutord, 2018] пиковому значению в 30–36 Мм, полученному другими исследователями. Немного завышенное значение среднего диаметра может быть вызвано трудностями корректного определения границ хромосферной сетки на некоторых снимках со слабым контрастом особенно вблизи полюсов, а также различием в методах выделения и определения самих структур.

В дальнейшем мы планируем применять данную программу для исследования вариаций размера ячеек хромосферной сетки в зависимости от напряженности окружающего магнитного поля, фазы цикла солнечной активности, внутри корональных дыр и вблизи комплексов солнечной активности, а также особенностей локализации корональных ярких точек двух типов относительно границ сетки.

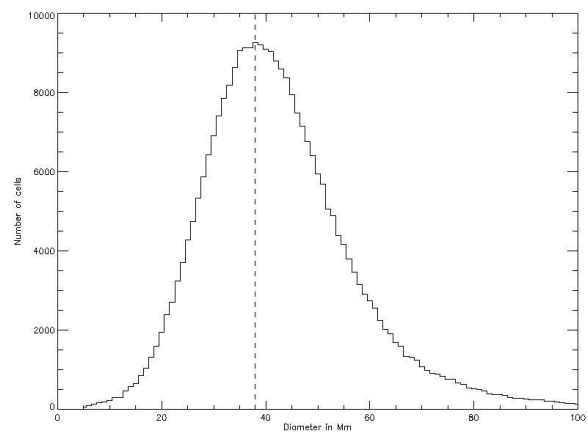


Рис. 2. Распределение диаметра ячеек хромосферной сетки

Миссия ASO-S поддерживается Программой стратегических приоритетных исследований в области космических наук Китайской академии наук, грант № XDA15320000.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Galloy M. Modern IDL: A Guide to IDL Programming // Boulder. Colorado. 2015.
- Gan W.Q., Zhu C., Deng Y.Y. et al. The Advanced Space-Based Solar Observatory (ASO-S) // Solar Phys. 2023. V. 298, N. 5. article id. 68.
- Li H., Chen B., Feng L. et al. The Lyman-alpha Solar Telescope (LST) for the ASO-S Mission I. Scientific Objectives and Overview // Res. Astronomy and Astrophysics. 2019. V. 19, N. 11. article id. 158.
- Rincon F., Rieutord M. The Sun's supergranulation // Living Reviews in Solar Physics. 2018. V. 15. N. 1. article id. 6. URL: http://aso-s.pmo.ac.cn/asoswebsite/guide/LST_Userguide_20230625.pdf (дата обращения 13.06.2024).

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ И СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА НА ОСНОВЕ СИНОПТИЧЕСКИХ КАРТ РАЗНЫХ ОБСЕРВАТОРИЙ

П.Н. Киричков, М.Л. Демидов

Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия,
kpn@iszf.irk.ru

FORECASTING SPACE WEATHER AND SOLAR WIND BASED ON SYNOPTICAL MAPS OF DIFFERENT OBSERVATORIES

P.N. Kirichkov, M.L. Demidov

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia,
kpn@iszf.irk.ru

Аннотация. В данной работе рассматривается исследование магнитного поля Солнца и расчет солнечного ветра на основе синоптических магнитных карт.

Ключевые слова: Космическая погода, солнечный ветер.

Abstract. This paper examines the study of the solar magnetic field and the calculation of the solar wind based on synoptic magnetic maps.

Keywords: space weather, solar wind

ВВЕДЕНИЕ

Прогнозирование космической погоды в околоземной среде является актуальной научной и практической задачей, и в мире уже существует несколько коллективов, активно работающих в этой области.

Для решения данной задачи используются различные модельные подходы, часто связанные с огромными численными расчетами. Но все это имеет смысл только в том случае, когда имеются в наличии надежные источники исходных данных — синоптические карты магнитных полей Солнца. Результаты прогнозирования, сделанные SWPC в США, основаны в основном на наблюдениях, предоставленных GONG (Global Oscillation Network Group).

Но есть и другие наборы данных с полномасштабными наблюдениями магнитного поля Солнца, например, WSO (Wilcox Solar Observatory), SDO (Solar Dynamics Observatory), STOP (Solar Telescope for Operative Prediction) (Россия) [Demidov et al., 2022]. Кроме того, сравнивая смоделированные параметры с наблюдаемыми, можно сделать вывод о том, какие наблюдения являются лучшими с этой точки зрения. В качестве примера сравниваются наблюдения 2164 оборота Керрингтона.

МОДЕЛЬ ИСТОЧНИКА ПОВЕРХНОСТИ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО ПОЛЯ

Топология линий открытых магнитных полей, вдоль которых потоки солнечного ветра ускоряются до сверхзвуковых скоростей, играет фундаментальную роль в понимании явлений, которые управляют космической погодой [Reiss et al., 2019]. Наблюдения солнечного магнитного поля не ведутся отдельно, а выполняются в комплексе с другими научными задачами. Чтобы получить наиболее точную картину, в модели расчета используется магнитное поле Солнца вблизи фотосферы. Наиболее широко применяемым методом экстраполяции для восстановления глобальной картины коронального магнитного поля является

модель поверхности источника потенциального поля PFSS [Shatten, 1971].

В качестве данных используются синоптические карты Солнца, которые показывают топологию магнитного поля на фотосфере звезды. На рис. 1 изображена синоптическая карта Солнца для 2164 оборота Керрингтона, полученная обсерваториями SDO/HMI и GONG.

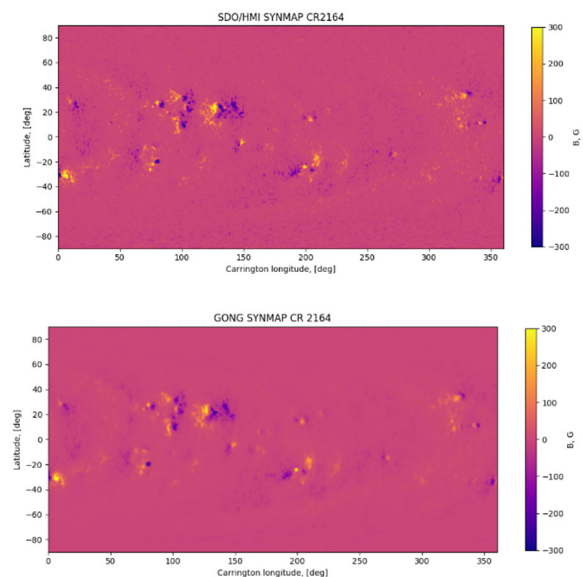


Рис. 1. Синоптические карты радиальной компоненты магнитного поля Солнца для данных SDO/HMI (верхняя панель) и GONG (нижняя панель)

Исходные данные отличаются численно и разрешением (у SDO/HMI разрешение 1800 на 3600 пиксель/градус, GONG 180 на 360 пиксель/градус). В работе они сведены к одному разрешению. Для расчета модели поверхности источника используется пакет программ, написанных на языке Python [Stansby et al., 2020]. Результаты представлены на рис. 2.

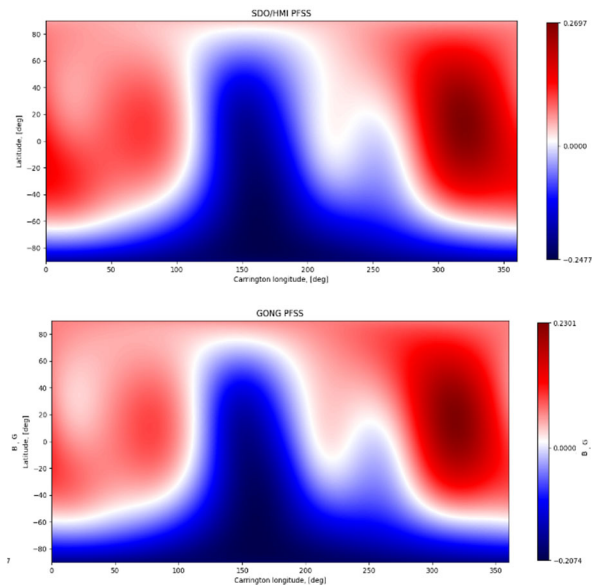


Рис. 2. Распределение радиальной составляющей солнечного магнитного поля на поверхности источника для данных наблюдений SDO/HMI (верхняя панель) и GONG (нижняя панель)

СКОРОСТЬ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Полученные результаты представляют собой топологию магнитного поля корональных областей Солнца. Связь между газодинамическим разрешением, корональным магнитным полем, величиной расширения силовых магнитных линий и скоростью солнечного ветра вблизи звезды известна как модель Wang-Sheeley [Wang and Sheeley, 1990]. Результаты расчетов показаны на рис. 3.

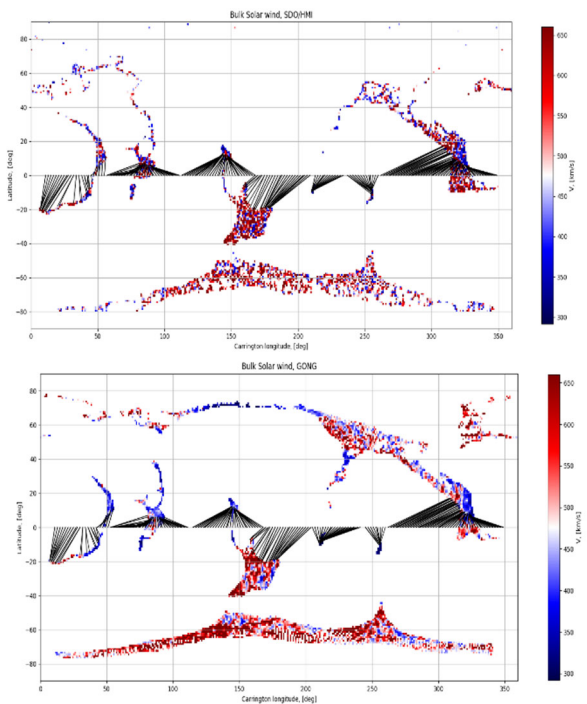


Рис. 3. Скорость солнечного ветра вблизи Солнца, полученная с помощью модели Wang-Sheeley, черные линии показывают силовые магнитные линии, приходящие на плоскость солнечного экватора, SDO/HMI (верхняя панель) и GONG (нижняя панель)

Дальнейшим развитием является применение расширенной модели Wang-Sheeley-Argе, которая является гибридом модели Wang-Sheeley и модели Distance from the Coronal Hole Boundary (DCHB) [Argе et al., 2003]. В данной модели учитывается минимальное расстояние между координатой открытой силовой магнитной линии на фотосфере и границей корональной дыры. Это позволяет определить влияние расположения корональных дыр на величину скорости солнечного ветра в зависимости от географических координат на поверхности Солнца.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе описаны математические модели, которые широко применяются для расчета скорости солнечного ветра, используя синоптические наблюдения магнитного поля звезды. Полученные в результате расчетов данные позволяют составлять прогноз космической погоды, ведь солнечный ветер и связанные с ним процессы оказывают большое влияние на Землю с точки зрения магнитосферы, ионосферы и атмосферы. Дальнейшая работа предполагает расчет параметров солнечного ветра на основе других наблюдений и их сравнение с эмпирическими данными.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Argе Ch.N., Odstrcil D., Pizzo V.J. et al. Improved Method for Specifying Solar Wind Speed Near the Sun // AIP Conf. Proc. 2003. 679: 190–193. <https://doi.org/10.1063/1.1618574>

Demidov M.L., Hanaoka Y., Wang X., Kirichkov P. On the differences in the space weather forecasting caused by different low boundary conditions // 44th COSPAR Scientific Assembly 2022. 16–24 July. Athens, Greece: abstracts. 2022. D2.5-0007-22. - <https://www.cosparathens2022.org/>.

Reiss M.A., MacNeice P.J., Mays L.M. et al. Forecasting the Ambient Solar Wind with Numerical Models: I. On the Implementation of an Operational Framework // Astrophysical J. Supplement Series. 2019. V. 240, N. 2. DOI:10.3847/1538-4365/aaf8b3.

Stansby D., Yeates A., Badman S. A Python package for potential field source surface modelling // Journal of Open Source Software. 5(54). 2732. <https://doi.org/10.21105/joss.02732>

Schatten K.H. Current sheet magnetic model for the solar corona // Cosmic Electrodynamics. 1971.

Wang Y.-M., Sheeley N.R. Solar wind speed and coronal flux-tube expansion // ApJ, 355:726–732. 1990. <https://doi.org/10.1086/168805>.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА БАРОМЕТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА НЕЙТРОННОЙ КОМПОНЕНТЫ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ПО ДАННЫМ ДЕТЕКТОРОВ ТАШКЕНТ И АЛМА-АТА

П.Г. Кобелев¹, Ю.Б. Хамраев², В.Г. Янке¹

¹ Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова
Российской Академии наук (ИЗМИРАН), Москва, Троицк, Россия kobelev@izmiran.ru

² Узбекско-Финский пединститут, Самарканд, Узбекистан

EXPERIMENTAL EVALUATION OF BAROMETRIC EFFECT OF THE NEUTRON COMPONENT OF COSMIC RAYS ACCORDING TO THE TASHKENT AND ALMA-ATA DETECTORS

P.G. Kobelev¹, Y.B. Hamraev², V.G. Yanke¹

¹ Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radiowave Propagation of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Troitsk, Russia, kobelev@izmiran.ru

² Uzbek-Finnish Pedagogical Institute

Аннотация. Целью работы является оценка барометрического эффекта нейтронной компоненты космических лучей для низкоширотных станций Ташкент и Алма-Ата, включая периоды максимально высокой солнечной активности. Разработанная методика применима для обработки данных любых детекторов Мировой сети нейтронных супермониторов. В результате получены среднегодовые барометрические коэффициенты нейтронной компоненты на станциях Ташкент и Алма-Ата.

Ключевые слова: Нейтронный монитор, барометрический эффект.

Abstract. The purpose of this work is to assess the barometric effect of the neutron component of cosmic rays for the low-latitude stations Tashkent and Alma-Ata, including periods of maximum solar activity. The developed technique is applicable for processing data from any detectors of the World Network of Neutron Supermonitors. As a result, the average annual barometric coefficients of the neutron component at the Tashkent and Alma-Ata stations were obtained.

Keywords: Neutron monitor, barometric effect.

ВВЕДЕНИЕ

При мониторинге космического излучения одновременно наблюдаются вариации различных типов — атмосферного, магнитосферного и первичного происхождения [Дорман, 1957]. Современный подход состоит в формировании полной модели вариаций, учитывающей все типы вариаций, характерных для рассматриваемого детектора. Для нейтронных детекторов в модель входят вариации первичного и атмосферного происхождения [Дорман, 1957]. На интенсивность нейтронной компоненты в основном влияют барометрический эффект и эффект влажности воздуха. Отрицательный барометрический эффект обусловлен поглощением нейтронной компоненты в атмосфере. Отрицательный эффект влажности обусловлен замедлением нейтронов ядрами водорода водяного пара в толще атмосферы и переходом нейтронов в область энергии ниже порогового значения нейтронного супермонитора [Natton, Carmichael, 1964]. В настоящее время в большинстве случаев коррекция данных нейтронных супермониторов ограничивается только поправкой на барометрический эффект. В работе [Янчуковский и др., 2024] исследовался вклад влажности воздуха в приближении приземного слоя с постоянной влажностью в изменения интенсивности нейтронной компоненты.

Целью данной работы является оценка барометрического эффекта нейтронной компоненты космических лучей на примере станций Ташкент и Алма-Ата. Работа базировалась на часовых данных непрерывного мониторинга нейтронной компоненты

за период 1975–1992 гг. на станции Ташкент и 1973–2023 гг. на станции Алма-Ата и на данных локальных метеостанций.

В настоящей работе невозможно было учесть влияние влажности воздуха даже в приближении приземного слоя, поскольку для станций Алма-Ата и Ташкент отсутствуют данные о влажности воздуха и приземной температуры в рассматриваемый период.

МЕТОДЫ АНАЛИЗА И КОРРЕКЦИИ АТМОСФЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ

Измеренную нейтронным супермонитором скорость счета необходимо исправить на барометрический и на эффект влажности воздуха. Для оценки исправленной скорости счета детектора N_C необходимо измеренную скорость счета детектора N_U привести к среднему атмосферному давлению P_0 и к стандартным атмосферным условиям (20° С, 50 %) при которых значение абсолютной влажности воздуха равно $H_0 = 8.7 \text{ г/м}^3$. При известном барометрическом коэффициенте $\beta > 0$ и коэффициенте влажности $\varepsilon > 0$, исправленная на эти эффекты скорость счета равна

$$N_C^i = N_U^i \exp[-\beta(P_0 - P^i)] \times [1 - \varepsilon(H_0 - H^i)] / (I_E^i / I_{Base}^i). \quad (1)$$

В последнем выражении P^i и H^i часовые значения атмосферного давления на уровне наблюдения и эффективные значения абсолютной влажности воздуха, учитывающее высотное распределение влажности в атмосфере [Zreda et al., 2012; Kobelev et al., 2021]. Из данных наблюдений следует также

исключить ожидаемые для данного детектора вариации космических лучей первичного происхождения, что отражает последний множитель уравнения (1), который, по определению, связан с ожидаемыми вариациями v_E первичного происхождения как $(I_E/I_{Base})^{-1} = (1 + v_E)^{-1} \cong (1 - v_E)$. Ожидаемые вариации связаны через вариации опорного детектора как $v_E = \delta v_S$. Логарифмируя выражение (1) и раскладывая в ряд Тейлора-Маклорена по малому параметру z логарифмы $\ln(1 \pm z) \cong \pm z$, мы приходим к линейному выражению

$$\ln N_U = \ln N_C + \beta(P_0 - P) + \varepsilon(H_0 - H) + \delta v_S, \quad (2)$$

т.е. поправки вычитаются из вариаций неисправленной скорости счета детектора. В итоге получаем систему линейных уравнений регрессии. Число уравнений определяется длиной исследуемого ряда данных и на практике достигает 10^4 . В качестве опорного детектора для детекторов Ташкент и Алма-Ата можно привлечь нейтронный монитор Рим.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Основные параметры рассматриваемых нейтронных детекторов Ташкент и горной станции Алма-Ата и параметры опорного детектора приведены в табл. 1. Мы располагаем полным набором данных (неисправленные и давление) только для 1991–1992 гг.

Таблица 1.

Основные параметры нейтронных детекторов

	λ°	φ°	Rc (1987), GV	h, м	P_0 , mb	N , pps
Ташкент	41.20	69.37	7.199	565	960	132
Алма-Ата	43.25	76.92	6.428	3340	675	1335

Нами построена многофакторная модель вариаций космических лучей (2) для оценок и объяснения роли привлекаемых факторов β и δ и для исследования их взаимосвязи. Результат приведен ниже в табл.2 и табл.3.

Таблица 2.

Корреляционная матрица для нейтронных супермониторов Алма-Ата (вверх) и Ташкент (низ).

	P	v_S	N_u
P	1	0.096	0.574
v_S		1	0.849
N_u			1

	P	v_S	N_u
P	1	-0.372	0.512
v_S		1	0.588
N_u			1

Результат регрессионного анализа для нейтронных супермониторов Алма-Ата и Ташкент.

	N , pps	R^2	σ_ε , %	$a_0 \pm 1$	$\beta \pm 0.016$, %/hPa	$\mu \pm 1$, г/см ²	$\delta \pm 0.014$, %/%	cond
Алма-Ата	1335	0.966	1.16	1223	0.668	155	1.126	125
Ташкент	132	0.967	0.98	117	0.686	151	1.096	213

Как следует из табл. 2, что ожидаемо, не наблюдается (<0.5) взаимной корреляции между исследуемыми параметрами P и v .

При проведении регрессионного анализа установлены коэффициент детерминации и коэффициенты регрессии линейной системы уравнений (2) и их ошибки. Результат сведен в табл. 3. Качество модели, например, для Ташкента характеризует параметр $R^2=0.972$, откуда следует, что 97 % вариаций объясняется построенным регрессионным уравнением, и только 3 % объясняется неучтенными нами факторами и ошибками. Коэффициенты регрессии также приведены в табл. 3.

В табл. 3 приведено число обусловленности cond, которое выступает в качестве теста на мультиколлинеарность системы уравнений (в нашем случае 16000 уравнений) и определяет чувствительность выходной функции к изменениям на входе; в идеальном случае $\text{cond}=1$, в нашей практике несколько сотен. Также в ней приведен пробег для поглощения $\mu=1/\beta$.

На рис. 1 приведены диаграммы рассеяния для среднесуточных значений параметров. В верхней части рисунка показаны зависимости освобожденной от первичных вариаций скорости счета от атмосферного давления, в нижней части – исправленные на атмосферное давление зависимости скорости счета от первичных вариаций. Статистическая точность детектора выше статистики Алма-Ата по сравнению со станцией Ташкент. Однако построенная модель для станции Алма-Ата работает несколько хуже. Следовательно, в модели не были учтены некоторые факторы. Возможно, что это эффект снега в осенне-весенний период, коррекция которого требует специального подхода [Кобелев и др., 2022].

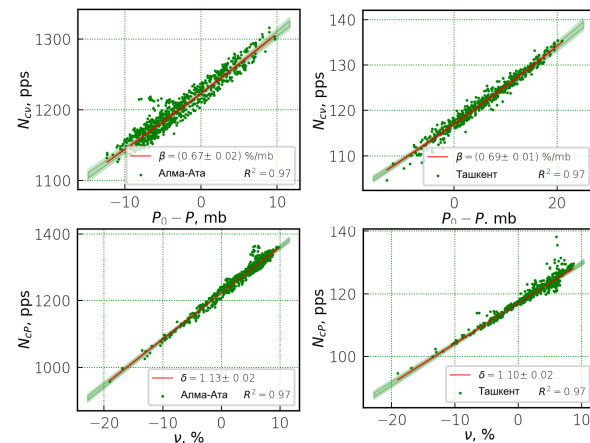


Рис. 1. Диаграммы рассеяния, формируемые при анализе данных детекторов Алма-Ата (слева) и Ташкент (справа) для периода 1991–1992 гг.

Таблица 3.

ВЫВОДЫ

1) Разработана линейная трехпараметрическая модель вариаций космических лучей, учитывающая все характерные для нейтронной компоненты типы вариаций.

2) Барометрический коэффициент определяется с хорошей точностью и для Ташкента равен 0.666 ± 0.016 %/hPa. Коэффициент вклада первичных вариаций близок к единице и равен 1.096 ± 0.014 %/%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Дорман Л.И. Вариации космических лучей. М.: Гос-техиздат, 1957. с. 285.

Кобелев П.Г., Трефилова Л.А., Оленева В.А., Янке В.Г. Метод коррекции данных нейтронных мониторов на эффект снега // Геомагнетизм и аэрономия. 2022. Т. 62, № 6. Р. 737–742. <https://doi.org/10.31857/S0016794022060086>

Янчуковский В.Л., Калужная М.А., Хисамов Р.З. Интенсивность нейтронной компоненты космических лучей и влажность воздуха. Солнечно-земная физика. 2024. Т. 10, № 1. С. 37–43. <https://doi.org/10.12737/szf-101202405>.

Hatton C.J., Carmichael H. Experimental investigation of the NM-64 Neutron monitor. Canadian Journal of Physics. 1964. V. 42. P. 2443–2472. <https://doi.org/10.1139/p64-222>

Kobelev P.G., Dorman L.I., Trefilova L.A., Belov S.M., Yanke V.G. Monitoring of the thickness of the snow cover based on the neutron component data of cosmic rays // Proc. 37th ICRC. Berlin. PoS(ICRC2021)282. 2021. <https://pos.sissa.it/395/282/pdf>

Zreda, M., W. J. Shuttleworth, X. Xeng, C. Zweck, D. Desilets, T. E. Franz, R. Rosolem, and P. A. Ferre (2012), COSMOS: The Cosmic-ray Soil Moisture Observing System, Hydrol. Earth Syst. Sci. 9, 4505–4551. 2012. <https://doi.org/10.5194/hessd-9-4505-2012> .

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДВУХ СЛАБЫХ GLE В МАЕ И АВГУСТЕ 1998 г.
МЕТОДОМ СПЕКТРОГРАФИЧЕСКОЙ ГЛОБАЛЬНОЙ СЪЕМКИ**

И.И. Ковалев, М.В. Кравцова, С.В. Олемской, В.Е. Сдобнов

Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской Академии наук, Иркутск, Россия,
ivankov@iszf.irk.ru

**COMPARATIVE ANALYSIS OF TWO WEAK GLEs IN MAY AND AUGUST 1998
BY SPECTROGRAPHIC GLOBAL SURVEY METHOD**

I.I. Kovalev, M.V. Kravtsova, S.V. Olemskoy, V.E. Sdobnov

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia

Аннотация: Методом спектрографической глобальной съемки проведен анализ двух слабых наземных возрастаний интенсивности космических лучей (КЛ): 2 мая (GLE56) и 24 августа (GLE58) 1998 г. Используются данные мировой сети станций нейтронных мониторов (5-минутные) и данные космических аппаратов GOES-9 и 10. Получены дифференциальные жесткостные спектры солнечных КЛ и определены максимальные жесткости, до которых произошло ускорение протонов в этих событиях. Установлено, что максимальная жесткость ускоренных частиц для обоих GLEs не превысила ~2–3 ГВ. Приведены пространственные распределения первичных частиц с жесткостью 2 ГВ. Обнаружена двунаправленная анизотропия, которая свидетельствует о нахождении Земли в петлеобразной структуре межпланетного магнитного поля.

Ключевые слова: космические лучи, наземные повышения интенсивности

Abstract: Using a spectrographic global survey method, we carried out an analysis of two weak ground-level enhancements of cosmic rays: May 2 (GLE56) and August 24 (GLE58). We used data from the worldwide network of neutron monitors (time definition of 5 minutes) and data from GOES 9 and 10 spacecraft. Differential rigidity spectra of solar cosmic rays were obtained, and the maximum rigidities of particle acceleration in these events were determined. We confirmed that the maximum rigidity of accelerated particles for both GLEs is below ~2–3 GV. We also demonstrate spatial distributions of 2-GV primary particles. Bidirectional anisotropy has been found, which gives evidence of the Earth’s presence in a loop-like structure of the interplanetary magnetic field.

Keywords: cosmic rays, ground level enhancements

ВВЕДЕНИЕ

Солнечные протонные события (СПС) представляют собой протоны, ускоренные во вспышечных процессах на Солнце. Ускорение протонов может происходить до релятивистских энергий. Такие СПС приводят к наземным возрастаниям интенсивности космических лучей (КЛ) или в английской интерпретации к GLE (Ground Level Enhancement). GLE довольно редкие явления. За всю историю наблюдений с 1942 г. по настоящее время было зарегистрировано всего 73 события [https://gle.oulu.fi], но в [https://www.nmdb.eu] обсуждается возможное появление GLE74 (11 мая 2024 г.).

В данной работе мы рассматриваем два слабых GLE, произошедших 2 мая и 24 августа 1998 г., входящих в число GLEs, которыми был богат 23-ий солнечный цикл (16 событий). В базе данных GLE

[https://gle.oulu.fi] события записаны под номерами 56 и 58. Следует отметить, то в 23-м солнечном цикле можно выделить еще два небольших события: GLE57 (6 мая 1998 г.) [Луковникова, Сдобнов, 2022] и GLE68 (17 января 2005 г.) [Gopalswamy et al., 2012].

С физической точки зрения слабые GLE важны для понимания механизмов ускорения и разделения возможных вкладов от различных источников [Miroshnichenko and Yanke, 2016; Mishev et al., 2017]. Особое значение в этом вопросе имеет форма энергетического/жесткостного спектра ускоренных частиц.

В таблице 1 приведена основная информация об обстановке в межпланетном пространстве (вспышки, корональные выбросы массы (КВМ)) и максимальное возрастание КЛ на нейтронных мониторах (НМ).

Таблица 1.

Основные характеристики ассоциированных источников GLE и регистрация события на НМ

GLE			¹ Мах поток протонов, pfu (IMP, GOES)		Вспышка		КВМ V, км/с
№	Дата	Мах, % (НМ)	> 10 МэВ	> 700 МэВ	Класс/Балл	Радиовсплеск	
			56	02.05.1998			7 (Оулу)
58	24.08.1998	4 (Мыс Шмидта)	200	5.1	X1.0/3B	II–IV	² 1420

1 – [Белов и др., 2010], 2 – [Gopalswamy et al, 2012]

Согласно данным таблицы 1 исследуемые GLE качественно похожи друг на друга: источник события находился в области Солнца, не связанной с Землей спиралью Паркера, подобно, как и GLE64 (24 августа 2002 г.) [Kovalev et al., 2024]; сходство по энергетике (вспышка X1.0/3B, быстрый KBM, сильное радиоизлучение) и наблюдается небольшая амплитуда возрастания интенсивности КЛ с максимумом на высокоширотных НМ.

В работах [Луковникова, Сдобнов, 2022; Kravtsova, Sdobnov, 2023] выполнен анализ этих GLEs по данным мировой сети станций КЛ с часовым разрешением (39 НМ). Интересно было посмотреть, совпадут ли результаты анализа при использовании 5-минутных данных, когда количество НМ много меньше: для GLE56 5-минутные данные доступны с 20 НМ, для GLE58 — лишь с 16 НМ [https://www.nmdb.eu/, https://cr0.izmiran.ru]. Данные по измерениям протонов на орбите Земли, полученные с космических аппаратов (GOES-9 и 10) взяты с сайта [http://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes]. Амплитуды модуляций отсчитывались от средней скорости счета за час, предшествующий началу события.

Анализ выполнен методом спектрографической глобальной съемки (СГС) [Dvornikov, Sdobnov, 1997; Kovalev et al., 2022]. В отличие от существующих методов исследования КЛ [например, Вашенюк и др., 2009; Григорьев, Стародубцев, 2015; Mishev et al., 2018], СГС позволяет использовать для анализа весь имеющийся комплекс наземной регистрирующей аппаратуры (мировую сеть НМ, расположенных на разных уровнях в атмосфере Земли, а также наземные и подземные мезонные телескопы и т. д.) Данное обстоятельство дает возможность наряду с фазами первой и второй гармоник питч-угловой анизотропии определять жесткостной спектр изотропной составляющей, анизотропии, получать информацию об ориентации межпланетного магнитного поля.

Целью данной работы является сравнение спектров и анизотропии ускоренных солнечных КЛ двух GLE с близкими начальными условиями на Солнце с использованием 5-минутных данных наблюдений КЛ на мировой сети станций НМ.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

Используя выражение для жесткостного спектра КЛ, полученного в рамках модели модуляции КЛ регулярными электромагнитными полями гелиосферы [Дворников и др., 2013] мы рассчитаны дифференциальные жесткостные спектры протонов на орбите Земли в разные моменты GLE56 и GLE58. Считая, что спектр галактических КЛ слабо меняется за время события, мы оценили дифференциальный спектр ускоренных в окрестностях Солнца частиц путем вычитания из полученных дифференциальных жесткостных спектров в разные моменты события спектр первичных КЛ, усредненного за час, предшествующий началу GLE. Полученные таким образом дифференциальные жесткостные спектры ускоренных частиц приведены на рис. 1.

Для обоих событий можно отметить предельную жесткость ускоренных в окрестностях Солнца частиц около 2–3 ГВ. Это согласуется с оценками, полученными в работах [Stoker, 2002; Луковникова, Сдобнов, 2022; Kravtsova, Sdobnov, 2023].

На рис. 2 приведено пространственное распределение первичных КЛ с жесткостью 2 ГВ в солнечно-эклиптической геоцентрической системе координат во время исследуемых GLEs. Для GLE56 наблюдается чередование двунаправленной и однонаправленной анизотропии КЛ. Наличие двунаправленной анизотропии КЛ в период GLE56 отмечалось в работе [Белов и др., 2000; Данилова и др., 2002; Луковникова, Сдобнов, 2022]. Направления повышенного потока частиц в 14:15 UT согласуются с направлениями анизотропии, полученными в 14:00 UT по часовым данным [Луковникова, Сдобнов, 2022].

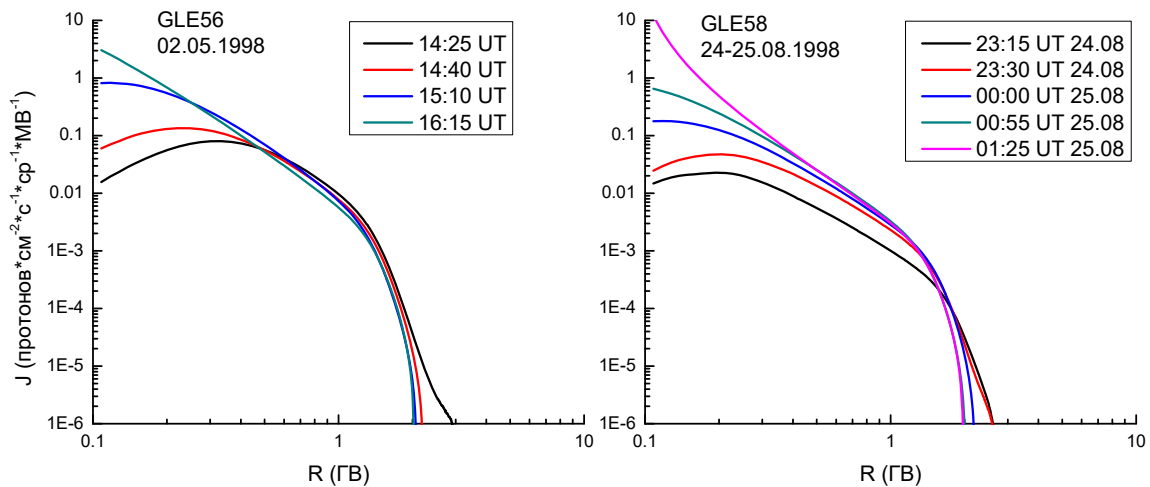


Рис. 1. Дифференциальные жесткостные спектры ускоренных в окрестностях Солнца частиц в разные моменты GLE56 (слева) и GLE58 (справа)

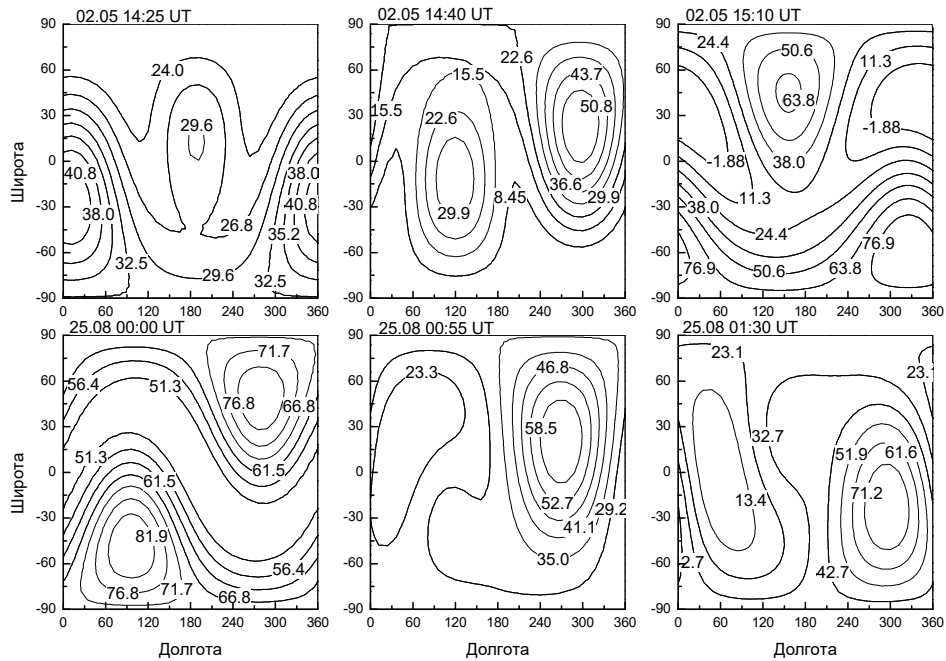


Рис. 2. Пространственное распределение частиц с жесткостью 2 ГВ в разные моменты GLE56 (верхний ряд) и GLE58 (нижний ряд)

Для GLE58 установлено, что двунаправленная анизотропия в начале события переходит в однонаправленную в районе 00:00 UT 25 августа 1998 г. В работе [Kravtsova, Sdobnov, 2023] обнаружена только однонаправленная анизотропия в 00:00 UT 25 августа 1998 г., что согласуется с полученными нами результатами для 00:55 UT. В обоих случаях двунаправленная анизотропия КЛ свидетельствует о наличии на орбите Земли образований типа «магнитная петля» [Richardson et al., 2000].

ВЫВОДЫ

На основании приведенных результатов можно заключить:

- Рассчитаны дифференциальные жесткостные спектры ускоренных в окрестности Солнца частиц в периоды GLE56 и GLE58;
- Показана динамика изменений в дифференциальных жесткостных спектрах ускоренных частиц в течение рассмотренных событий. Эта информация может помочь в выборе возможных механизмов ускорения СКЛ;
- Установлено, что дифференциальные жесткостные спектры ускоренных частиц в событиях GLE56 и GLE58 подобны. Максимальная жесткость ускоренных протонов не превышает $\sim 2\text{--}3$ ГВ;
- Поведение питч-угловой анизотропии в периоды GLE56 и GLE58 различается, что зависит от конкретных условий межпланетной среды;
- При рассмотрении GLE58 по 5-минутным данным выявлена двунаправленная анизотропия, которая не была обнаружена при расчетах по часовым данным НМ;
- Наличие двунаправленной анизотропии в событиях GLE56 и GLE58 указывает на то, что Земля находилась в петлеобразных структурах ММП.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России. Результаты получены с использованием оборудования ЦКП «Ангара» <http://ckp-rf.ru/ckp/3056/> и Уникальной научной установки «Российская национальная наземная сеть станций космических лучей» (Сеть СКЛ) [<https://ckp-rf.ru/usu/433536/>].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белов А.В., Вашенюк Э.В., Ерошенко Е.А., Пчелкин В.В. Возрастание космических лучей и структура возмущений солнечного ветра 2 мая 1998 г. // *Астроном. вестник*. 2000. Т. 34, № 2. С. 169–172.
- Белов А.В., Ерошенко Е.А., Крякунова О.Н. и др. Наземные возрастания солнечных космических лучей в последних трех циклах солнечной активности // *Геомагнетизм и аэрномия*. 2010. Т. 50, № 1. С. 23–36.
- Вашенюк Э.В., Балабин Ю.В., Гвоздевский Б.Б., Германенко А.В. Релятивистские СКЛ в событиях 19-го солнечного цикла // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2009. Т. 73, № 3. С. 318–320.
- Григорьев В.Г., Стародубцев С.А. Метод глобальной съемки в режиме реального времени и прогноз космической погоды // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2015. Т. 79, № 5. С. 703–707.
- Данилова О.А., Тясто М.И., Вашенюк Э.В. и др. Отклик магнитосферы на наземное возрастание СКЛ 2 мая 1998 г. // *Геомагнетизм и аэрномия*. 2002. Т. 42, № 1. С. 32–35.
- Луковникова А.А., Сдобнов В.Е. Питч-угловая анизотропия и дифференциальные жесткостные спектры космических лучей во время GLE 2 и 6 мая 1998 г. // *Солнечно-земная физика*. 2022. Т. 8, № 2. С. 29–33.
- Dvornikov V.M., Sdobnov V.E. Time variations of the cosmic ray distribution function during a solar event of September 29, 1989 // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102, A11. P. 24209–24219.
- Gopalswamy N., Xie H., Yashiro S. et al. Properties of ground level enhancement events and the associated solar eruptions during solar cycle 23 // *Space Sci. Rev.* 2012. V. 171. P. 23–60.

- Kovalev I.I., Olemskoy S.V., Sdobnov V.E. A proposal to extend the spectrographic global survey method // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2022. V. 235. P. 105887.
- Kovalev I.I., Kravtsova M.V., Olemskoy S.V., Sdobnov V.E. Spectra and Anisotropy of Cosmic Rays during GLE64 // *Geomagnetism and Aeronomy.* 2024. V. 64, N. 1. P. 44-48.
- Kravtsova M.V., Sdobnov V.E. Cosmic Ray Ground Level Enhancement on August 24, 1998 // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2023. V. 87, N 7. P. 1063–1065.
- Mishev A., Usoskin I., Raukunen O. et al. First analysis of ground-level enhancement (GLE) 72 on 10 September 2017: Spectral and anisotropy characteristics // *Solar Phys.* 2018. V. 293. P. 136.
- Mishev A., Poluianov S., Usoskin I. Assessment of spectral and angular characteristics of sub-GLE events using the global neutron monitor network // *J. Space Weather and Space Climate.* 2017. V. 7. A28.
- Miroshnichenko L.I., Yanke V.G. Size distributions of solar proton events: methodological and physical restrictions // *Solar Phys.* 2016. V. 291. P. 3685–3704.
- Richardson I.G., Dvornikov V.M., Sdobnov V.E., Cane H.V. Bidirectional particle flows at cosmic ray and lower (~1 MeV) energies and their association with interplanetary coronal mass ejections/ejecta // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105A. P. 12579–12591.
- Stoker P.H. Proton ground-level enhancements of the 23rd solar cycle // *South Afr. J. Sci.* 2002. V. 98, N 5. P. 289–292.
- URL: <https://gle oulu.fi> (дата обращения 20.05.2024).
- URL: <https://www.nmdb.eu/> (дата обращения 20.05.2024).
- URL: <https://cr0.izmiran.ru> (дата обращения 20.05.2024).
- URL: <http://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes> (дата обращения 20.05.2024).
- URL: <https://ckp-rf.ru/usu/433536/>

ВЫДЕЛЕНИЕ СИГНАЛА И РЕКОНСТРУКЦИЯ ОКОЛОВЕРТИКАЛЬНЫХ МЮОННЫХ ТРЕКОВ ПО ДАННЫМ ОДНОЙ ГИРЛЯНДЫ УСТАНОВКИ BAIKAL-GVD

М.Г. Крестьянских, И.А. Первалова

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет», Иркутск, Россия,
quatumax@gmail.com

HIT SELECTION AND RECONSTRUCTION OF NEAR-VERTICAL MUON TRACKS BASED ON DATA FROM ONE STRING OF THE BAIKAL-GVD

M.G. Krestyanskikh, I.A. Perevalova

Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

Аннотация. Байкальский нейтринный телескоп является глубоководной установкой, используемой для обнаружения астрофизических нейтрино сверхвысоких энергий вплоть до 10^{18} эВ. Нейтрино крайне слабо взаимодействует с веществом, поэтому процесс его регистрации достаточно сложен. Пролетая сквозь Землю, нейтрино может вступить в слабое взаимодействие со средой с образованием вторичной частицы, например, мюона, который сохраняет направление первоначального нейтрино, а также известную часть его энергии. Порождённый таким образом мюон, двигаясь в воде, обладает скоростью, превышающей фазовую скорость света и поэтому производит черенковское излучение. Работа посвящена выделению сигнальных данных от мюонов с энергией 100 ГэВ и реконструкции их треков на одной гирлянде установки Baikal-GVD. Процедура отбора основана на циклическом построении теоретических временных окон, в которые должны укладываться сигналы на соответствующих каналах. Процедура была применена к модельным данным. Исследуется интервал малых зенитных углов (от 0 до 30 градусов).

Ключевые слова: нейтрино, Байкальский Нейтринный Телескоп, обработка данных, реконструкция мюонного трека, фитирование.

Abstract. Baikal neutrino telescope is a deep water installation used for detection of high-energy astrophysical neutrinos, with energies up to 10^{18} eV. Neutrinos interact with matter extremely weakly, so the process of its registration is quite complicated. Flying through the Earth, a neutrino can interact weakly with the matter, with secondary particle appearing, for example muon, which keeps direction the first neutrino direction, and its known energy part as well. Moving in water, a muon that appeared this way has the speed exceeding the phase speed of light and, therefore, outputs Cherenkov radiation. The work is devoted to the isolation of signal data from muons with an energy of 100 GeV and the reconstruction of their tracks on one string of the Baikal-GVD. The selection procedure is based on the cyclic construction of theoretical time windows, in which the signals on the corresponding channels should fit. The procedure was applied to the model data. The interval of small zenith angles (from 0 to 30 degrees) is investigated.

Keywords: neutrino, Baikal Neutrino Telescope, Baikal-GVD, data analysis, muon track reconstruction, fit.

ВВЕДЕНИЕ

Целью данной работы являлась реализация процедуры реконструкции околорвертикальных мюонных треков по одной гирлянде нейтринного телескопа и применение процедуры к данным Монте-Карло с использованием нового моделирования. Байкальский нейтринный телескоп может восстанавливать большую часть высокоэнергичных событий, однако вблизи зенита имеется «слепое пятно» и низкоэнергичные околорвертикальные события отбрасываются вместе с шумом на этапе обработки. Отсюда возникает необходимость реконструкции треков с малыми зенитными углами.

ЧТО ЗНАЧИТ РЕКОНСТРУИРОВАТЬ ТРЕК?

Нейтрино летят со всех возможных направлений, и два параметра: зенитный угол θ и азимутальный угол ϕ однозначно определяют направление трека мюона (а вместе с ним и нейтрино). Зная времена срабатывания оптических модулей и их координаты можно определить траекторию мюона. Полное восстановление траектории возможно только при условии, что ОМ разнесены в пространстве и образуют трехмерную структуру. Стандартная процедура реконструкции включает события, зарегистрированные как минимум на

двух различных гирляндах, и нацелена на анализ частиц и каскадов сверхвысоких энергий. В данной же работе рассматривается реконструкция на одной гирлянде, рассматриваются мюоны с энергией 100 ГэВ и исследуется диапазон малых зенитных углов мюона (от 0 до 30 градусов). Данное значение энергии расположено вблизи порога чувствительности ФЭУ. На одной гирлянде возможно восстановление только по зенитному углу θ и невозможно по азимутальному углу ϕ из-за радиальной симметрии гирлянды.

РЕКОНСТРУКЦИЯ МЮОННОГО ТРЕКА

Трек мюона можно задать четырьмя величинами: u_z — косинусом зенитного угла θ ; Наименьшим расстоянием между треком и гирляндой d_c ; Соответствующей высотой z_c ; Моментом времени, когда мюон максимально приближается к гирлянде t_c .

Эти параметры входят в функцию зависимости времени сигнала от высоты, на которой расположен ОМ [1]:

$$t_\gamma(z) = t_c - t_0 + \frac{1}{c} \left((z - z_c)u_z + \frac{n^2 - 1}{n} d_\gamma(z) \right),$$
$$d_\gamma(z) = \frac{n}{\sqrt{n^2 - 1}} \sqrt{d_c^2 + (z - z_c)^2 (1 - u_z^2)},$$

Зная времена срабатывания ОМ и высоты, на которых они расположены, можно восстановить косинус зенитного угла (u_z) фитированием функции $t_\gamma(z)$.

Процедура реконструкции была применена к модельным данным. Моделировались мюонные треки с зенитными углами в диапазоне от 0 до 30 градусов и энергиями 100 ГэВ.

ОТБОР ДАННЫХ

Цель выбора сигнала — выбрать попадания (хиты), обусловленные фотонами Черенкова, и избежать случайных хитов оптического фона или рассеянных поздних хитов.

Для треков, которые не параллельны линии детектора, большая часть черенковского излучения ожидается вблизи точки наибольшего приближения трека к линии детектора. Таким образом, первый шаг выбора хита состоит в нахождении «горячей точки» света на линии детектора, которая возникает из черенковского света, индуцированного пролетающей частицей. При наличии фонового освещения единичный хит высокого заряда не обеспечивает достаточной чистоты «горячей точки»; необходимо как минимум два хита высокого заряда на соседних и смежных каналах. Каналы нумеруются последовательно по оси z . Для данного канала i соседние и смежные каналы имеют номера $i \pm j$ с $j = 1, 2$. Чтобы гарантировать, что хиты на каналах i и $i \pm j$ были вызваны одной и той же частицей, накладывается следующее условие на абсолютную разницу во времени двух хитов Δt (условие причинности):

$$\Delta t < j\Delta z \frac{n}{c} + t_s,$$

где Δz — абсолютное расстояние по вертикали между соседними каналами, c — скорость света в вакууме, n — показатель преломления среды и t_s — дополнительная временная задержка, компенсирующая упрощение геометрии детектора. Здесь рассматриваются только объединенные хиты, которые происходят от разных ФЭУ или с зарядом более 2,5 фотоэлектронов, поскольку они с высокой вероятностью могут быть вызваны треком частицы. Новые попадания рекурсивно ищутся в узком временном окне вокруг времени уже выбранных попаданий. Из анализа разности времен срабатывания двух соседних и смежных ОМ следует, она не превышает 60 нс для соседних каналов и 105 нс для смежных (рис. 1). Тогда границы временных окон для соседних каналов будут следующие:

$$t_{early} = t_i - 60,$$

$$t_{late} = t_i + 60,$$

Данные с временными окнами приведены на рис. 2.

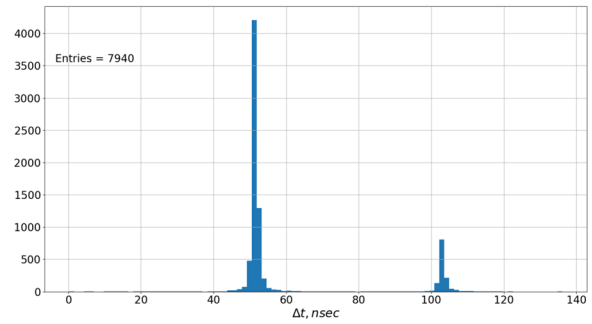


Рис. 1. Гистограмма распределения разности времен срабатывания двух ОМ

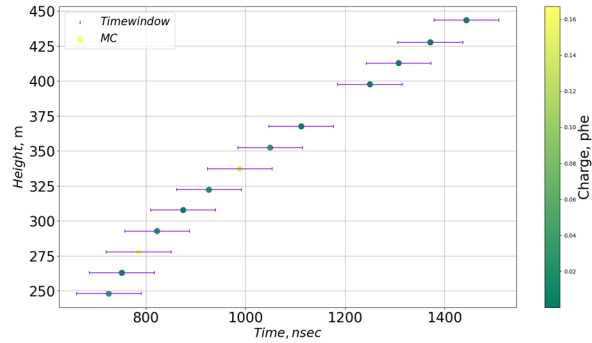


Рис. 2. Мюонное событие по данным МС с зенитным углом 29.01 градусов. Фиолетовыми линиями отображены временные окна.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате работы была проведена реализована процедура отбора и реконструкции околоразвертикальных мюонных треков по данным одной гирлянды. Пример восстановленного события представлен на рис. 3. Для оценки точности были построены гистограммы разности восстановленных и модельных параметров трека (рис. 4). Описанная процедура фитирования позволяет восстанавливать зенитный угол околоразвертикальных мюонных треков.

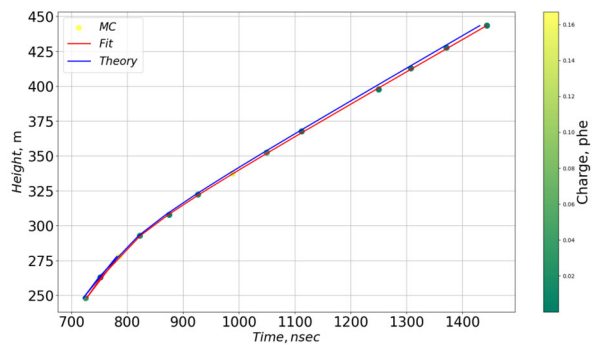


Рис. 3. Восстановленное мюонное событие по данным МС с зенитным углом 29.01 градусов. Кривая, полученная при подстановке параметров моделирования в выражение зависимости $t_\gamma(z)$ представлена синим цветом.

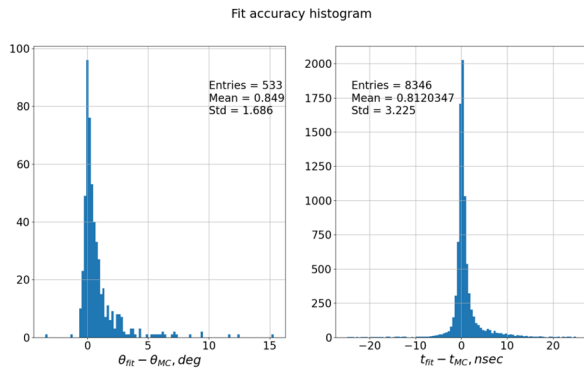


Рис. 4. Гистограммы точности восстановления зенитного угла (слева) и времени (справа) по 533 событиям

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, проект FZZE-2022-0001

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ageron M. et al. Performance of the First ANTARES Detector Line // *Astroparticle Phys.* 2009. V. 31(4). P. 277–283.
- Aguilara J.A. et al. A Fast Algorithm for Muon Track Reconstruction and its Application to the ANTARES Neutrino Telescope // *Astroparticle Phys.* 2011. N 34. P. 652–662.
- Arends H. et al. Muon Track Reconstruction and Data Selection Techniques in AMANDA // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment.* 2004. V. 524(1–3). P. 169–194.

КРИВАЯ ПОГЛОЩЕНИЯ И УГЛОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ АТМОСФЕРНЫХ МЮОНОВ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ В ВОДНОЙ СРЕДЕ: НОВЫЙ РАСЧЕТ

А.В. Кузьмицкий, А.А. Кочанов

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия,
a.kuzmitskiy@iszf.irk.ru

DEPTH INTENSITY RELATION AND ANGULAR DISTRIBUTION OF THE HIGH-ENERGY ATMOSPHERIC MUONS IN WATER MEDIUM: NEW CALCULATION

A.V. Kuzmitskiy, A.A. Kochanov

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, a.kuzmitskiy@iszf.irk.ru

Аннотация. Одной из актуальных задач астрофизики высоких энергий является поиск космических нейтрино и определение их источников. Для решения этой задачи создаются детекторы большого объема – нейтринные телескопы, которые регистрируют черенковское излучение от заряженных частиц, генерируемых во взаимодействиях нейтрино в среде. Черенковский свет могут давать не только рожденные от нейтрино мюоны или адронные ливни, но и транзитные атмосферные мюоны. Поэтому анализ событий, зарегистрированных в нейтринных телескопах, требуют тщательного исследования фона мюонов. Необходимо знать характеристики потоков мюонов, рожденных в атмосфере Земли, и их зенитно-угловые распределения вблизи детектора. В настоящей работе представлены кривая поглощения и зенитно-угловое распределение атмосферных мюонов в водной среде озера Байкал для детектора Baikal-GVD. Расчеты выполнены с новыми граничными спектрами атмосферных мюонов на уровне моря, полученными в рамках моделей адрон-ядерных взаимодействий Кимеля-Мохова и кварк-глюонных струн QGSJET-II-03, а также параметризации спектра первичных космических лучей Хилласа-Гайсера.

Ключевые слова: атмосферные мюоны, нейтринный телескоп

Abstract. One of the important tasks of high-energy astrophysics is the search for cosmic neutrinos and the determination of their sources. To solve this problem, large-volume detectors are being created – neutrino telescopes that register Cherenkov light from charged particles generated by neutrino interactions in the medium. Cherenkov light can be produced not only by muons from neutrinos or hadron showers, but also by transit atmospheric muons. Therefore, the analysis of events, recorded in neutrino telescopes, requires a thorough study of the background of muons. It is necessary to know the characteristics of muon fluxes generated in the Earth's atmosphere and their zenith-angular distributions near the detector. In this paper, we present the depth intensity relation and zenith-angular distribution of atmospheric muons in the water medium of Lake Baikal for the Baikal-GVD detector. Calculations were performed with new boundary spectra of atmospheric muons at sea level within the hadronic models of Kimel-Mokhov and quark-gluon strings QGSJET-II-03, as well as parameterization of the Hillas-Gaisser spectrum of primary cosmic rays.

Key words: atmospheric muons, neutrino telescope

ВВЕДЕНИЕ

Для поиска и регистрации астрофизических нейтрино высоких энергий были построены крупные нейтринные телескопы: NT-200+ (оз. Байкал) [Aynutdinov et al., 2008], IceCube (Южный полюс) [Abbasi R. et al., 2011; Aartsen M. G. et al., 2013], ANTARES (Средиземное море) [Adrian-Martinez S. et al., 2013] и сооружаются новые: Baikal-GVD [Аворин и др., 2019] и KM3NeT 2.0 (телескопы ORCA и ARCA (Средиземное море) [Adrian-Martinez et al., 2016]. Центральной задачей таких телескопов является измерение диффузного потока нейтрино от астрофизических источников, поиск галактических и локальных внегалактических источников нейтрино. Для анализа событий, зарегистрированных нейтринным телескопом, необходимо выполнить моделирование отклика детектора на прохождение через его рабочий объем мюона, нейтрино и других частиц, рождающихся в результате взаимодействия с веществом атмосферного или астрофизического нейтрино и первичного мюона, генерируемого космическими лучами в атмосфере. В результате такого моделирования вырабатываются критерии отбора полезных событий, отвечающих поставленной задаче.

В настоящей работе выполнен расчет спектров и зенитно-угловых распределений атмосферных

мюонов вблизи детектора Baikal-GVD. В качестве основного инструмента расчета потоков мюонов в водной среде выступает численно-аналитический метод решения транспортных уравнений [Naumov et al., 1994; Bugaev et al., 1998]. Граничные спектры атмосферных мюонов на уровне моря получены в работе [Kochanov et al., 2019] с помощью метода $Z(E, h)$ [Naumov, Sinegovskaya, 2000; Kochanov et al., 2008] решения уравнений адронного каскада в атмосфере Земли. Расчет граничных спектров выполнен для моделей адрон-ядерных взаимодействий Кимеля-Мохова (KM), кварк-глюонных струн QGSJET-II-03, а также параметризации спектра первичных космических лучей Хилласа-Гайсера (вариант H3a).

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА И СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТОМ

На рис. 1 изображены дифференциальные спектры атмосферных мюонов на уровне моря, используемые в качестве граничных в задаче прохождения мюонов в водной среде оз. Байкал. Как видно, граничные спектры мюонов (сплошные кривые) заметно отличаются от классических расчетов работы [Bugaev et al., 1998] (штриховая кривая; вариант расчета — $I: \pi, K$ -мюоны). Спектр космических лучей имеет явный излом («колени») при энергиях

вблизи 3 ПэВ, который ярко проявляется в расчетах потоков мюонов на уровне моря. Неопределенности моделей адрон-ядерных взаимодействий также затрудняют задачу вычисления потоков мюонов. Граничный спектр, полученный в рамках модели кварк-глюонных струн QGSJET-II-03 и первичного спектра НЗа дает нижнюю оценку потока атмосферных мюонов на уровне моря.

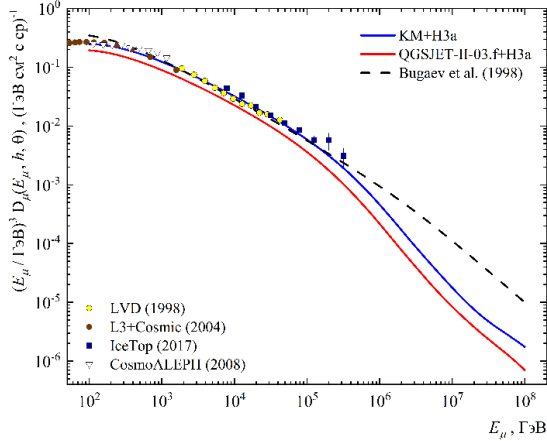


Рис. 1. Граничные спектры атмосферных мюонов на уровне моря

На рис. 2 представлены расчеты настоящей работы кривой поглощения атмосферных мюонов для приведенных на рис. 1 граничных спектров. Показаны характерные глубины 700–1300 м, где расположены оптические модули телескопа Baikal-GVD. Черными кружками нанесены данные предварительной обработки эксперимента Baikal-GVD, полученные в рамках магистерской работы [Ульзутуев, 2023]. Автору [Ульзутуев, 2023] с помощью моделирования по методу Монте-Карло и анализа эксперимента удалось воспроизвести зависимость потока мюонов от глубины, за исключением общей нормировки, которая была взята им из работы [Klimushin et al., 2001]. Как видим, наши расчеты с граничным спектром в модели KM + H3a дают меньший на $\approx 16\%$ (относительно данных Baikal-GVD) интегральный поток атмосферных мюонов;

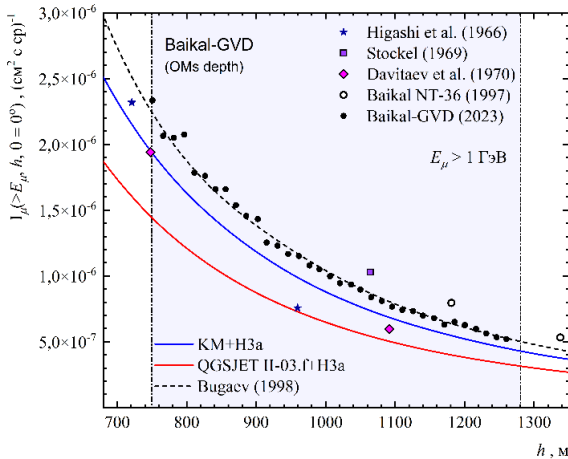


Рис. 2. Кривая поглощения атмосферных мюонов для глубин 700–1300 м

расчет QGSJET-II-03 + H3a дает меньший на $\approx 38\%$ поток. В итоге видно, что до сих пор сохраняется значительный разброс в предсказаниях потока мюонов как неустранимого фона для проведения экспериментов по регистрации астрофизических нейтрино. При этом модельная нормировка экспериментальных данных играет ключевую роль.

Для сравнения, на рис. 3 мы приводим расчеты кривой поглощения мюонов для больших глубин (до 7 км). Видно, что результаты расчета с граничным спектром в модели QGSJET-II-03 хорошо согласуются с данными телескопа ANTARES и эксперимента NEMO, а расчет с моделью KM воспроизводит данные измерений Baikal NT-36 [Belolaptikov et al., 1997] и AMANDA [Desiati et al., 2003] для глубин $h > 2.5$ км.

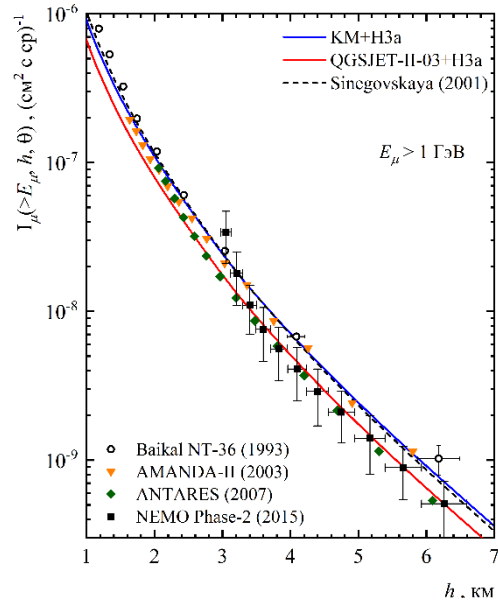


Рис. 3. Кривая поглощения атмосферных мюонов для глубин 1–7 км

На рис. 4 представлено зенитно-угловое распределение мюонов для глубины 1.15 км. Как видим, различие в моделях KM и QGSJET-II-03 в среднем составляет 28%. Для сравнения приведены расчеты работ [Sinegovskaya, Sinegovsky, 2001; Klimushin et al., 2001] и данные Baikal NT-36.

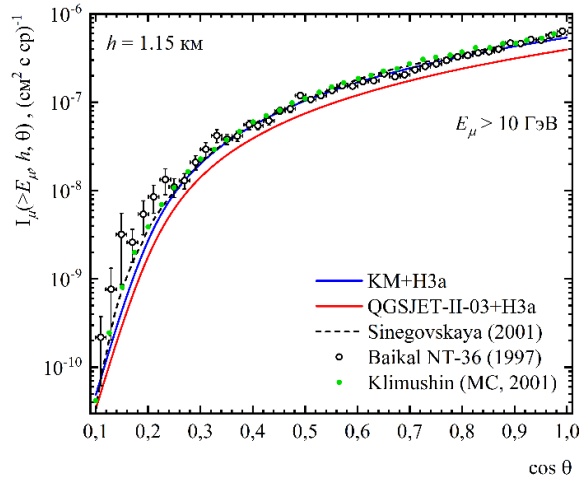


Рис. 4. Зенитно-угловое распределение атмосферных мюонов на глубине 1.15 км

Результаты расчета зенитно-угловых распределений мюонов представлены с точностью до 5 % в виде параметризации для $h = 1.15$ км:

$$I_{\mu}(E_{\mu} > 10_{\text{ГэВ}}, h = 1.15_{\text{км}}, \cos \theta \geq 0.3) = C(\cos \theta - a)^n,$$

где параметры C , a и n для соответствующих моделей адрон-ядерных взаимодействий:

$$\begin{aligned} \text{KM: } C &= 7.40 \times 10^{-7}, \\ a &= 0.16, n = 1.78, 0.3 \leq \cos \theta \leq 1.0 \\ \text{QGSJET-II-03: } C &= 5.39 \times 10^{-7}, \\ a &= 0.15, n = 1.83, 0.3 \leq \cos \theta \leq 1.0 \end{aligned}$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью численно-аналитического метода решения транспортных уравнений для мюонов и новых граничных спектров выполнены абсолютные (избавленные от нормировок) расчеты потоков высокоэнергетических мюонов для условий телескопа Baikal-GVD; дана параметризация зенитно-углового распределений мюонов. Проведено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными и расчетами разных авторов. По-прежнему сохраняется значительный разброс предсказаний потока мюонов (до 40 %) как фона для поиска и регистрации сигналов от астрофизических нейтрино.

Авторы с благодарностью вспоминают своего учителя С. И. Синеговского за выдвинутые им идеи и инициацию данного исследования. А. Кузьмицкий благодарит В. А. Наумова за полезные советы и обсуждение.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аворин А.В. и др. Baikal-GVD – нейтринный телескоп следующего поколения на озере Байкал // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83, № 8. С. 1016–1018.

Ульзутуев Б.Б. Измерение потока атмосферных мюонов на Байкальском нейтринном телескопе Baikal-GVD: Магистерская диссертация: 03.04.01. Москва. 2023.

Aartsen M.G. et al. Measurement of the Atmospheric ν_e flux in IceCube // Phys. Rev. Letters. 2013. V. 110, N 15. P. 151105.

Abbasi R. et al. Measurement of the atmospheric neutrino energy spectrum from 100 GeV to 400 TeV with IceCube // Phys. Rev. D. 2011. V. 83, N 1. P. 012001.

Adrian-Martinez S. et al. Measurement of the atmospheric ν_{μ} energy spectrum from 100 GeV to 200 TeV with the ANTARES telescope // Eur. Phys. J. C. 2013. V. 73. P. 1–12.

Adrian-Martinez S. et al. Letter of intent for KM3NeT 2.0 // J. Phys. G. 2016. V. 43, N 8. P. 084001.

Ageron M. et al. Dependence of atmospheric muon flux on seawater depth measured with the first KM3NeT detection units // Eur. Phys. J. C. 2020. V. 80. P. 1–11.

Aynutdinov V. et al. The Baikal neutrino experiment: Status, selected physics results, and perspectives // Nucl. Instrum. Meth. A. 2008. V. 588, Iss. 1–2. P. 99–106.

Belolaptikov I. A. et al. The Baikal underwater neutrino telescope: Design, performance, and first results // Astropart. Phys. 1997. V. 7, N 3. P. 263282.

Bugaev E.V. et al. Atmospheric muon flux at sea level, underground, and underwater // Phys. Rev. D. 1998. V. 58. P. 054001.

Desiati P. et al. Response of AMANDA-II to Cosmic Ray Muons // 28th International Cosmic Ray Conference. 2003. V. 3. P. 1373–1376.

Klimushin S.I., Bugaev E.V., Sokalski I.A. Parametrization of atmospheric muon angular flux underwater // Phys. Rev. D. 2001. V. 64, ISS. 1. P. 014016.

Kochanov A.A., Morozova A.D., Sinegovskaya T.S., Sinegovsky S.I. High-energy atmospheric muon flux calculations in comparison with recent measurements // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. V.1181. P.012054.

Kochanov A.A., Sinegovskaya T.S., Sinegovsky S.I. High-energy cosmic-ray fluxes in the Earth atmosphere: Calculations vs experiments // Astropart. Phys. 2008. V. 30, N 5. P. 219–233.

Naumov V.A., Sinegovsky S.I., Bugaev E.V. High-energy cosmic-ray muons under thick layers of matter // Phys. of Atom. Nucl. 1994. V.57, N 3. P. 412–424.

Naumov V.A., Sinegovskaya T.S. Simple method for solving transport equations describing the propagation of cosmic-ray nucleons in the atmosphere // Phys. Atom. Nucl. 2000. V.63, N 11. P. 1927–1935.

Sinegovskaya T.S., Sinegovsky S.I. Prompt muon contribution to the flux underwater // Phys. Rev. D. 2001. V.63. P. 096004.

ЭВОЛЮЦИЯ СПЕКТРА ПРОТОНОВ В СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКЕ: СЛУЧАЙ ТОНКОЙ И ТОЛСТОЙ МИШЕНИ

А.В. Кузьмицкий, А.А. Кочанов

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия,
a.kuzmitskiy@iszf.irk.ru

PROTON SPECTRUM EVOLUTION IN SOLAR FLARE: THIN AND THICK TARGET REGIMES

A.V. Kuzmitskiy, A.A. Kochanov

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, a.kuzmitskiy@iszf.irk.ru

Аннотация. Одной из актуальных задач физики солнечных вспышек является выяснение механизмов ускорения заряженных частиц, особенностей их генерации и временной эволюции их спектра. Единственным источником информации об ускоренных в атмосфере Солнца протонах с энергиями ≥ 300 МэВ является широкая линия гамма-излучения распада пионов. Для решения задачи восстановления спектра протонов по наблюдаемому спектру гамма-излучения необходимо иметь надежные теоретические расчеты спектра протонов для набора входных параметров: показатель спектра, величина магнитного поля, плотность мишени и др. В работе рассмотрено решение транспортного уравнения Гинзбурга-Сыроватского для двух предельных режимов — «тонкой» и «толстой» мишени, показаны результаты численного счета эволюции спектра ускоренных протонов в хромосфере Солнца.

Ключевые слова: солнечная вспышка, спектр протонов

Abstract. One of the important tasks in physics of solar flares is to elucidate the mechanisms of charged particle acceleration, the features of their production and the temporal evolution of their spectrum. The only source of information about protons accelerated in the atmosphere of the Sun to energies ≥ 300 MeV is the broad gamma-ray emission line from pion decay. To address the problem of reconstructing the proton spectrum from the observed gamma-ray spectrum, it is necessary to have reliable theoretical calculations of the proton spectrum for a set of input parameters: spectral index, magnetic field strength, target density, and others. This work considers the solution of the Ginzburg-Syrovatsky transport equation for two limiting regimes — "thin" and "thick" targets, presenting the results of numerical calculations of the evolution of the accelerated proton spectrum in the solar chromosphere.

Key words: solar flare, proton spectrum, gamma rays

ВВЕДЕНИЕ

Мощные солнечные вспышки часто являются источником частиц, ускоренных до высоких энергий. Выяснение механизмов ускорения частиц, уточнение особенностей их генерации и временной эволюции их спектра является актуальной задачей. В отличие от электронов, проявляющихся во всем диапазоне электромагнитного излучения, протоны можно удаленно обнаружить лишь по γ -излучению. Протоны с энергией < 10 МэВ и между 30 и 300 МэВ невидимы в солнечной атмосфере, поскольку отсутствуют ядерные реакции для генерации γ -излучения. Информация об ускорении протонов до 10–30 МэВ основана на наблюдениях линий γ -квантов в диапазоне энергий 2–7 МэВ. Появление же протонов с энергиями > 300 МэВ можно идентифицировать по появлению специфической особенности в спектре высокоэнергетического γ -излучения — широкой линии распада пионов $p + A \rightarrow \pi^0 + A$; $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ [Murphy et al., 1987].

Спектр гамма-излучения зависит от спектра ускоренных протонов и характеристик той среды, в которой они оказались. В случае прямой инжекции ускоренных протонов в нижние, более плотные слои атмосферы Солнца, происходит сравнительно быстрая потеря их энергии за счет ионизации атомов и кулоновских столкновений со свободными электронами среды. При энергиях > 300 МэВ протоны теряют энергию преимущественно за счет генерации пионов. В сценарии захвата протонов в магнитную ловушку (рис. 1), эволюция их спектра может происходить длительное время непосредственно в ней с

постепенным высыпанием частиц в хромосферу [Mandzhavidze, Ramaty, 1992; Hudson, 2018]. В этом случае гамма-излучение вспышки имеет продолжительный характер. В качестве ловушки могут выступать корональные петли, имеющие магнитную связь с областью вспышки.

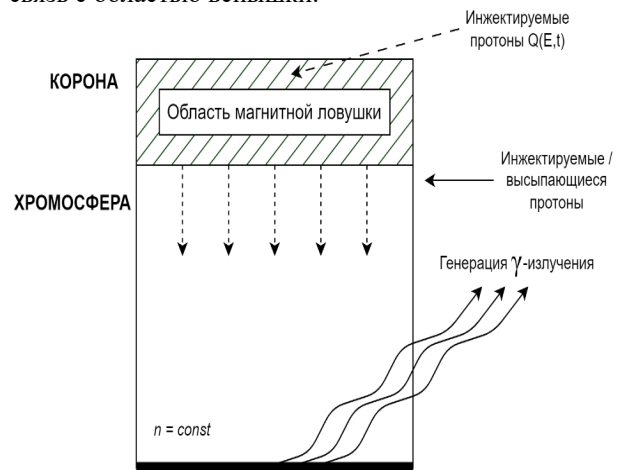


Рис. 1.

КИНЕТИЧЕСКОЕ УРАВНЕНИЕ ПЕРЕНОСА

Перенос частиц в атмосфере Солнца можно описать с помощью кинетического уравнения Гинзбурга-Сыроватского [Гинзбург, Сыроватский 1963], имеющего смысл уравнения непрерывности в фазовом пространстве с учетом столкновений:

$$\frac{\partial N(E, t)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial E} (b(E)N(E, t)) + \frac{N(E, t)}{\tau_{ext}} = Q(E, t),$$

где $N(E, t)$ — локальная энергетическая функция распределения протонов, коэффициент $b(E)$ равен среднему приращению энергии частицы в единицу времени ($b < 0$ — частица отдает свою энергию):

$$b(E) = \left\langle \frac{dE}{dt} \right\rangle \approx \frac{E}{\tau_{loss}},$$

τ_{ext} — среднее время пребывания ускоренных протонов в области взаимодействия или в области ловушки, $Q(E, t)$ — интенсивность источников или скорость инжекции частиц в единицу времени в единицу объема. Время τ_{ext} складывается из времени жизни протонов τ_{pp} до их неупругого столкновения с ядрами среды и времени τ_{esc} удержания частиц в области захвата:

$$\frac{1}{\tau_{ext}} = \frac{1}{\tau_{pp}} + \frac{1}{\tau_{esc}}.$$

В работе [Kafexhiu et al., 2018] дается оценка времени удержания частиц в магнитной петле с характерным полем 100 Гс: $\tau_{esc} \approx 50$ с. В работе [Kocharov et al., 2000] приведены оценки τ_{esc} в зависимости от энергии и параметров магнитной петли (пробочное отношение магнитного поля, высота петли и т.д.).

Уравнение записано для частиц одного сорта, без учета флуктуаций энергии (для протонов и тяжелых ядер ввиду малой поправки можно пренебречь этим членом). Полагается случай однородного в пространстве процесса, где интенсивность источников не зависит от координат x . В общем виде, кулоновские потери энергии в частично ионизованной среде можно рассматривать как сумму вкладов от взаимодействия со связанными и свободными электронами. Так, для непрерывных потерь $b(E)$ можно использовать формулу Бете-Блоха [Workman et al., 2022] с поправкой на степень ионизации χ плазмы [Emslie 1978; Belyaev 1996]. В расчетах ниже рассматривался случай полностью ионизованной среды, т.е. $\chi = 1$ (см. рис. 2). Вклад радиационных (синхротронных) потерь протонов пренебрежимо мал.

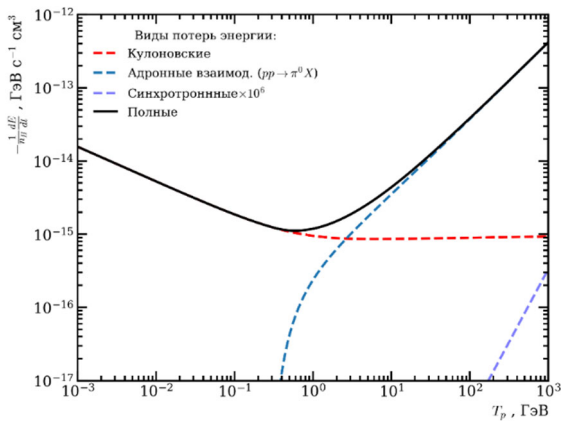


Рис. 2. Полные потери (сплошная линия) протонов и два основных вклада: кулоновские потери за счет взаимодействия со свободными электронами среды и потери на ядерные взаимодействия

Полученное с помощью метода функции Грина решение уравнения имеет вид (см., например, [Cheng, 1972]):

$$N(E, t) = \frac{1}{|b(E)|} \int_E^\infty dE_0 Q(E_0, t - \tau)$$

$$\exp\left(-\int_{E_0}^E \frac{dE}{\tau_{ext} b(E)}\right) \theta(\tau),$$

$$\tau(E, E_0) = \int_{E_0}^E \frac{dE}{b(E)},$$

где τ имеет смысл времени, за которое энергия протона уменьшится с E до E_0 , $\theta(\tau)$ — функция Хэвисайда.

От общего решения можно перейти к двум разным предельным случаям [Ramaty et al., 1975] тонкой и толстой мишени. Будем рассматривать непрерывную инжекцию частиц $Q(E, t) = Q(E)$. В режиме «тонкой» мишени время покидания частицами фазового объема τ_{ext} меньше времени потерь энергии τ_{loss} ($\tau_{loss} > \tau_{ext}$). Ускоренные частицы быстро покидают область взаимодействия, так что за время τ_{ext} источник $Q(E)$ не сильно изменяется в интервале энергии δE , где δE — потери энергии за время τ_{ext} . В этом же интервале энергий произведение $\tau_{ext} \cdot b(E)$ также является постоянной величиной. Тогда решение имеет вид:

$$N(E) \underset{\text{тонкая мишень}}{\approx} Q(E) \tau_{ext},$$

В режиме «толстой» мишени время потерь энергии частицами τ_{loss} меньше времени покидания области взаимодействия τ_{ext} ($\tau_{loss} < \tau_{ext}$). Решение в этом случае:

$$N(E, t) \underset{\text{толстая мишень}}{\approx} \frac{1}{|b(E)|} \int_E^{E_{max}} dE_0 Q(E_0, t - \tau), \text{ где } E_{max} \text{ из } t = \int_E^{E_{max}} \frac{dE}{b(E)}.$$

На рис. 3 представлен расчет спектра протонов по формуле в сравнении с результатом из [Kafexhiu et al., 2018]. На графике «катастрофические потери» энергии (рождение нейтральных пионов) включены как непрерывные, что, вообще говоря, неверно, т.к. рассматриваются протоны в том числе с энергиями < 1 ГэВ, где при единичном акте взаимодействия протон выбывает из рассматриваемого фазового пространства. Однако видно, что асимптотика решения совпадает с [Kafexhiu et al., 2018], где эти потери учтены как «катастрофические».

Как видно из рис. 3, с течением времени спектр протонов приходит в состояние насыщения

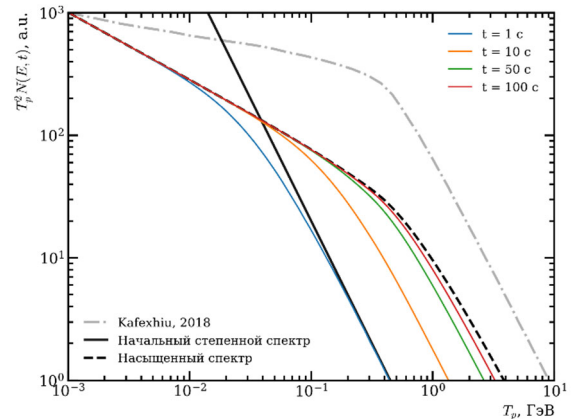


Рис. 3. Эволюция степенного спектра протонов в режиме толстой мишени

(через $t \approx 200$ с). Также наблюдается эффект излома и ужесточение спектра за счет эволюции, т.е. уменьшения показателя степени спектра с течением времени.

$$c Q(E) = C \cdot E^{-\alpha}, \alpha = 4, n = 10^{13} \text{ см}^{-3}$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе транспортного уравнения Гинзбурга-Сыроватского для двух предельных режимов – «тонкой» и «толстой» мишени были сделаны расчеты спектра энергичных протонов. Предполагалась непрерывная инжекция частиц. Полученный результат можно использовать для расчета спектров гамма-излучения и анализа экспериментальных данных.

Авторы благодарят В.В. Гречнева и В.И. Киселева за полезные советы и обсуждение работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гинзбург В.Л., Сыроватский С.И. Происхождение космических лучей. Москва: Изд-во АН СССР, 1963. 385 с.

Belyaev G. et al. Measurement of the Coulomb energy loss by fast protons in a plasma target // *Phys. Rev. E*. 1996. V. 53, N 3. P. 2701–2707.

Cheng C.C. Theoretical studies of the flux and energy spectrum of gamma radiation from the Sun // *Space Sci. Rev.* 1972. V. 13, N 1. P. 3–123.

Emslie A.G. The collisional interaction of a beam of charged particles with a hydrogen target of arbitrary ionization level // *Astrophys. J.* 1978. V. 224. P. 241–246.

Hudson H.S. The relationship between long-duration gamma-ray flares and solar cosmic rays // in *Space Weather of the Heliosphere: Processes and Forecasts*, IAU Symp., Cambridge University Press, Cambridge 2018. V. 335. P. 49–53.

Hulot E., Vilmer N., Trotter G. Relative timing of solar prompt gamma-ray line and X-ray emission expected from a trap plus precipitation model for protons and electrons // *A&A*. 1989. V. 213, N 1–2. P. 383–396.

Kocharov L., Kovaltsov G.A., Torsti J. Trapping and precipitation of protons during stochastic acceleration in magnetic loops // *Astrophys. J.* 2000. V. 543. P. 438–446.

Kafexhiu E., Romoli C., Taylor A.M., Aharonian F. Energetic Gamma-Ray Emission from Solar Flares // *Astrophys. J.* 2018. V. 864, N 2. P. 148.

Mandzhavidze N., Ramaty R. Gamma rays from pion decay-Evidence for long-term trapping of particles in solar flares // *Astrophys. J. Part 2-Letters*. 1992. V. 396, N 2. P. L111–L114.

Murphy R. J., Dermer C. D., Ramaty R. High-energy processes in Solar flares // *Astrophys. J.* 1987. V. 63. P. 721–748.

Ramaty R., Kozlovsky B., Lingenfelter R.E. Solar gamma rays // *Space Sci. Rev.* 1975. V. 18, N 3. P. 351–388.

Workman R. L. et al. Review of Particle Physics // *Prog. Theor. Exp. Phys.* 2022. V. 2022. P. 083C01.

МЕТОД ОЦЕНКИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПЕРИОДА ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШКАХ

Л.С. Леденцов

Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга
Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия,
leonid.ledentsov@gmail.com

Институт космических исследований Российской академии наук, Москва, Россия

A METHOD FOR ESTIMATING THE SPATIAL PERIOD OF ENERGY RELEASE IN SOLAR FLARES

L.S. Ledentsov

Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University, Moscow, Russia,
leonid.ledentsov@gmail.com
Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Аннотация. С целью анализа современных спутниковых наблюдений аркад вспышечных корональных петель предложен метод оценки пространственного периода энерговыделения в солнечных вспышках. Метод основывается на применении анализа Фурье к разностным изображениям вспышечных аркад в далеком ультрафиолетовом диапазоне. Работа метода продемонстрирована на примере наблюдения Бастильской вспышки с космического аппарата TRACE в канале 171 Å. Среднее значение пространственного периода энерговыделения в Бастильской вспышке, определенное предложенным методом, составляет 5–8 Мм, что хорошо согласуется со сценарием развития тепловой неустойчивости предвспышечного токового слоя в солнечных вспышках.

Ключевые слова: солнечные вспышки, тепловая неустойчивость, вакуумный ультрафиолет, анализ Фурье.

Abstract. A method for estimating the spatial period of energy release in solar flares is proposed to analyze the present-day satellite observations of arcades of flare coronal loops. The method is based on the application of a Fourier analysis to the difference images of flare arcades in the far ultraviolet. The operation of the method is demonstrated with the observations of the Bastille Day flare from the TRACE spacecraft in the 171 Å channel. The mean spatial period of energy release in the Bastille Day flare determined by the proposed method is 5–8 Mm, in good agreement with the scenario for the development of thermal instability of the preflare current layer in solar flares.

Keywords: solar flares, thermal instability, vacuum ultraviolet, Fourier analysis

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия космические обсерватории позволили изучать развитие солнечных вспышек во всех диапазонах электромагнитного излучения [Benz, 2017]. Яркие корональные вспышечные петли в крайнем ультрафиолете — одно из наиболее зрелищных проявлений солнечной активности, доступное для детальных наблюдений. Сложная структура распределения ярких петель в пространстве указывает на неоднородность первичного энерговыделения во вспышке [Krucker et al., 2003; Reva et al., 2015]. Тем не менее зачастую можно отметить некоторую квазипериодичность в пространственном распределении ярких петель во вспышечной аркаде. Отличным примером вспышки с хорошо структурированной вспышечной аркадой и квазипериодическим расположением ярких петель служит Бастильская вспышка, произошедшая 14 июля 2000 г. [Aulanier et al., 2000; Somov et al., 2002].

НАБЛЮДЕНИЯ

Солнечные вспышки — сложный многоступенчатый процесс преобразования свободной энергии магнитного поля в энергию электромагнитного излучения, а также теплового и направленного движения частиц. Электроны, ускоренные в процессе первичного энерговыделения, опускаясь вдоль линий магнитного поля в хромосферу, вызывают ее нагрев и дальнейшее расширение вдоль соответствующих трубок

магнитного поля. Тепловое излучение расширяющейся плазмы подсвечивает отдельные яркие петли во вспышечной аркаде. Таким образом, расположение ярких магнитных петель во вспышечной аркаде несет в себе информацию о расположении областей первичного энерговыделения. Однако первичное ускорение электронов носит импульсный характер, в то время как остывание горячих магнитных петель в результате излучения электромагнитных волн происходит медленно. Солнечная вспышка в процессе своего развития содержит серию актов импульсного ускорения частиц. Подсвеченные петли магнитного поля, пересекаясь по времени своего существования, формируют видимую картину вспышечной аркады. Таким образом, в каждый отдельный момент времени вспышечная аркада состоит из ярких петель, подсвеченных различными элементарными актами энерговыделения во вспышке.

В качестве примера для демонстрации метода определения межпетельного расстояния используем наблюдения Бастильской вспышки с космического аппарата TRACE в дальнем ультрафиолетовом диапазоне, а именно, в линии 171 Å [Handy et al., 1999]. В этом канале наиболее отчетливо наблюдались вспышечные петли, именно поэтому он был выбран для демонстрации работы метода. В дальнейших исследованиях метод можно применять к другим ультрафиолетовым каналам. Пример одного изображения Бастильской вспышки можно видеть на рис. 1 слева.

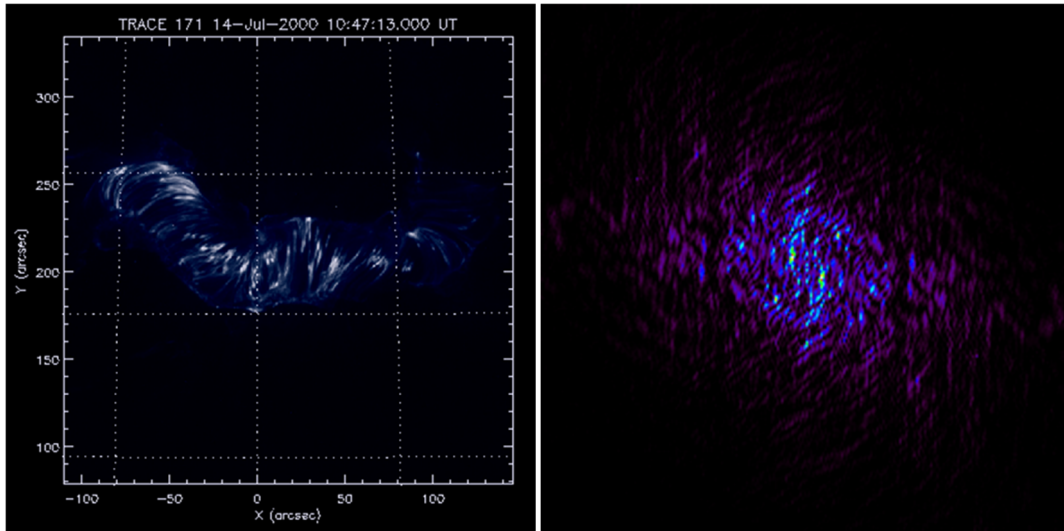


Рис. 1. Слева изображение Бастильской вспышки в канале 171 Å, спутника TRACE. Справа увеличенная центральная часть спектра мощности возмущений разностного изображения

МЕТОД

Исходными данными для поиска пространственного периода первичного энерговыделения служит серия снимков вспышечной аркады. Прежде всего снимки нормализуются по времени экспозиции. Затем на каждом снимке необходимо выделить новые образования, для этого используем попарную разность между последовательными кадрами серии. Пространственный период возмущений на разностных изображениях будем выделять с помощью анализа Фурье. Для этого из каждого разностного изображения вычитается среднее по изображению, а затем к результату применяется быстрое преобразование Фурье. На рис. 1 справа представлен пример двумерного спектра мощности разностного изображения S . Цветом отмечена мощность возмущения с индексами волновых чисел k_x и k_y , отложенными в горизонтальном и вертикальном направлениях соответственно. В центре рисунка отмечена мощность возмущения с $k_x = k_y = 0$, т.е. средняя мощность интенсивности всего изображения. Чем дальше от центра, тем меньшие пространственные периоды $\lambda = L/k$ видны на спектре

мощности. Здесь L — размер участка Солнца, видимый на изображении по обеим координатам, λ — пространственный период возмущения. При наличии выделенного направления у возмущения спектр мощности теряет радиальную симметрию, вытягиваясь вдоль волнового вектора доминирующего возмущения. Однако на спектре сохраняются центральная симметрия и зеркальная симметрия относительно направления доминирующего волнового вектора. Последнее свойство позволяет нам свернуть двумерный спектр мощности по направлению, ортогональному к доминирующему волновому вектору (рис. 2).

РЕЗУЛЬТАТЫ

В табл. 1 представлены средние значения пространственных периодов наблюдаемых возмущений и их среднеквадратичные отклонения, количество найденных возмущений, удовлетворяющих пороговому критерию, а также количество разностных изображений, на которых эти возмущения обнаружены. Наблюдается постепенный рост

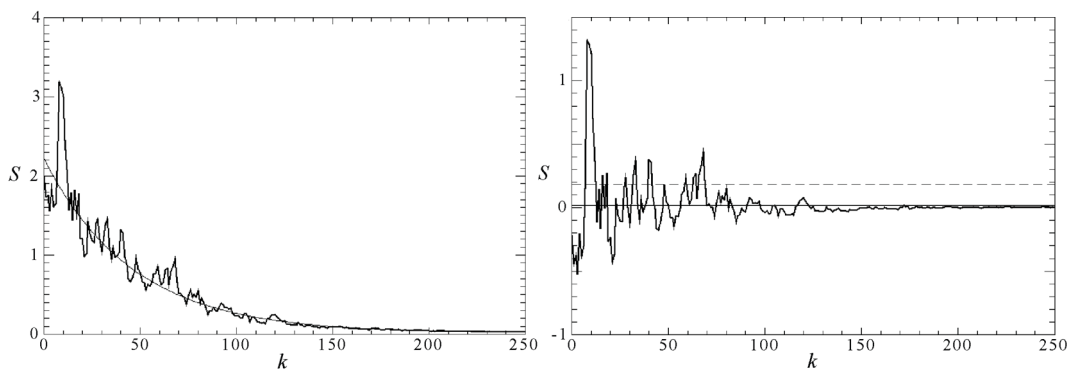


Рис. 2. Слева одномерный спектр мощности возмущений, тонкой линией нанесен фитированный экспоненциальный тренд. Справа одномерный спектр мощности возмущений за вычетом экспоненциального тренда, тонкой сплошной линией нанесено среднее значение мощности, штриховой — уровень 1σ над средним

среднего периода от ~ 5 до ~ 8 Мм при увеличении порогового критерия от 1σ до 5σ . Критерий 6σ снижает средний период до ~ 7 Мм. Описанное поведение соответствует теоретическому представлению о работе предложенного метода поиска пространственных периодов энерговыделения в солнечных вспышках. Одномерный спектр мощности содержит набор возмущений при разных индексах k . Из-за наблюдаемой экспоненциальной структуры спектра возмущения с меньшим пространственным периодом λ (большим индексом k) в среднем имеют меньшую амплитуду. Поэтому при увеличении порогового критерия первыми отсеиваются именно они, что приводит к росту среднего периода возмущений. Более подробное исследование метода оценки пространственного периода энерговыделения можно прочитать в [Леденцов, 2023].

Таблица 1.

Пространственные периоды энерговыделения.

Пороговый критерий	1σ	2σ	3σ	4σ	5σ	6σ
Средний пространственный период, Мм	5.6	6.7	7.9	7.8	8.3	7.2
Среднеквадратичное отклонение, Мм	3.0	2.9	2.8	2.5	2.8	2.5
Число детектированных возмущений	514	208	91	34	12	5
Число возмущенных кадров	58	49	42	27	12	5

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан метод поиска пространственных периодов энерговыделения в солнечных вспышках, основанный на применении анализа Фурье к разностным изображениям вспышечных аркад в далеком ультрафиолетовом диапазоне. Показана эффективность метода на примере анализа вспышечной аркады Бастильской вспышки. Среднее значение

пространственного периода энерговыделения в Бастильской вспышке, определенное предложенным методом, составило 5–8 Мм, что хорошо согласуется со сценарием развития тепловой неустойчивости предвспышечного токового слоя в солнечных вспышках [Ledentsov, 2021a–c].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-72-30002, <https://rscf.ru/project/23-72-30002/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Леденцов Л.С. Метод оценки пространственного периода энерговыделения в солнечных вспышках // Письма в Астрон. журн. 2023. Т. 49, № 11. С. 819–828.
- Aulanier G., DeLuca E.E., Antiochos S.K. et al. The Topology and Evolution of the Bastille Day Flare // *Astrophys. J.* 2000. V. 540. P. 1126.
- Benz A.O. Flare Observations // *Liv. Rev. Solar Phys.* 2017. V. 14. N. 2.
- Handy B.N., Acton L.W., Kankelborg C.C. et al. The Transition Region and Coronal Explorer // *Solar Phys.* 1999. V. 187. P. 229.
- Krucker S., Hurford G.J., Lin R.P. Hard X-Ray Source Motions in the 2002 July 23 Gamma-Ray Flare // *Astrophys. J.* 2003. V. 595, N L103.
- Ledentsov L. Thermal Trigger for Solar Flares I: Fragmentation of the Preflare Current Layer // *Solar Phys.* 2021. V. 296. N. 74.
- Ledentsov L. Thermal Trigger for Solar Flares II: Effect of the Guide Magnetic Field // *Solar Phys.* 2021. V. 296, N. 93.
- Ledentsov L. Thermal Trigger for Solar Flares III: Effect of the Oblique Layer Fragmentation // *Solar Phys.* 2021. V. 296, N 117.
- Reva A., Shestov S., Zimovets I. et al. Wave-like Formation of Hot Loop Arcades // *Solar Phys.* 2015. V. 290. P. 2909.
- Somov B.V., Kosugi T., Hudson H.S. et al. Magnetic Reconnection Scenario of the Bastille Day 2000 Flare // *Astrophys. J.* 2002. V. 579. P. 863.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОТОНОВ СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ НА СКОРОСТЬ ИОНИЗАЦИИ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

Е.А. Маурчев, К.А. Диденко, Н.С. Шлык, М.А. Абунина, А.А. Абунин, А.В. Белов

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,
Москва, Троицк, Россия, maurchev@izmiran.ru

INVESTIGATION OF THE SOLAR COSMIC RAY PROTONS IMPACT ON THE EARTH'S ATMOSPHERE IONIZATION RATE

E.A. Maurchev, K.A. Didenko, N.S. Shlyk, M.A. Abunina, A.A. Abunin, A.V. Belov

Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS, Moscow, Troitsk,
maurchev@izmiran.ru

Аннотация. В работе проведено моделирование прохождения протонов космических лучей, а также вторичной компоненты через атмосферу Земли для периодов, соответствующих реальным событиям солнечных энергетических частиц (SEP). Приводится анализ спектральных характеристик потоков первичных протонов. В качестве основного результата работы показаны количественные оценки расчетной скорости ионизации в большом диапазоне высот (0–100 км). Оценивается разница во влиянии солнечных протонов на атмосферу Земли для событий SEP с аналогичными источниками, но с различающимися спектральными энергетическими характеристиками потоков первичных частиц.

Ключевые слова: скорость ионизации, солнечные энергичные частицы, численное моделирование.

Abstract. This paper considers the modeling of the cosmic ray protons transport as well as the secondary component through the Earth atmosphere for periods corresponding to real events of solar energetic particles (SEP). We carried out an analysis of the primary proton flux spectral characteristics. The main work results are quantitative estimates of the calculated ionization rate for an altitude range from 0 to 98 km. Also, our work includes an estimation of the difference in the effect of solar protons on the Earth's atmosphere for SEP events with similar sources, but with different spectral energy characteristics of primary particle fluxes.

Keywords: ionization rate, solar energetic particles, numerical simulation.

ВВЕДЕНИЕ

В представленной работе рассматриваются протоны космических лучей (КЛ). КЛ принято разделять на галактические (ГКЛ) и солнечные (СКЛ). Энергия первых может достигать порядка ТэВ, в то время как вторые в большинстве случаев имеют энергию максимум 10 ГэВ. Попадая в атмосферу Земли, протоны теряют свою энергию на ионизацию, а при достаточных энергиях (более чем ~ 1 ГэВ) могут достигать высоты 10–25 км от уровня моря и рождают каскады вторичных частиц. Эти частицы, в свою очередь, также оставляют свою энергию в атмосфере. Следует заметить, что все эти процессы изучались другими научными группами и до сих пор представляют интерес [Bazilevskaya et al., 2008; Mironova et al., 2015; Usoskin, Kovaltsov, 2006].

Наряду с воздействием протонов ГКЛ на атмосферу Земли можно выделить относительно кратковременные явления солнечной активности — события SEP (solar energy particles) и GLE (ground level enhancement), которые также могут оказывать существенное влияние на состояние атмосферы [Jackman et al., 2005; Kirillov et al., 2003]. Протоны во время событий SEP обладают довольно мягким дифференциальным энергетическим спектром, что говорит о их незначительной способности генерировать каскады и ионизировать нижние слои атмосферы (от уровня моря почти до 30 км). Однако такие явления часто характеризуются значительным (до нескольких порядков) увеличением потоков частиц в диапазоне энергий от 10 до 100 МэВ, что, как можно ожидать, приведет к увеличению ионизации верхних слоев атмосферы Земли (от 30 км до 100 км) и потенциально повлияет на ее химические свойства в высоких широтах.

В этой работе мы рассматриваем семь событий с аналогичными солнечными источниками за последние три цикла солнечной активности. Было проведено моделирование прохождения протонов первичных КЛ через атмосферу Земли с использованием нашего собственного программного комплекса, реализованного с использованием пакета для разработки программ GEANT4 [Allison et al., 2016]. Оценивается влияние частиц СКЛ на степень ионизации атмосферы Земли. Представлены профили ионизации для широкого диапазона высот от 0 до 98 км. Предполагается, что полученные результаты могут быть полезны для исследований в области влияния космического излучения на атмосферу Земли.

МЕТОДИКА

Для этого исследования была использована база данных по рентгеновским вспышкам и протонным возрастаниям [Белов, 2017]. Возрастания потоков во время событий SEP выбраны на основе измерений протонов с энергией $E > 10$ МэВ (P10) и $E > 100$ МэВ (P100) и соответствующих им рентгеновским вспышкам при помощи спутника GOES. Также были проанализированы данные всемирной сети нейтронных мониторов (NMDB).

В данной работе для расчета значений скорости ионизации был использован программный комплекс RUSCOSMICS [Маурчев, Балабин, 2016]. Его реализация основана на использовании пакета для разработки программ GEANT4, который использует метод Монте-Карло и предоставляет классы для разработки моделей взаимодействия элементарных частиц с веществом [Allison et al., 2016]. На рис. 1 представлена визуализация модели и пример трекинга протонов.



Рис. 1. Пример моделирования прохождения частиц первичных и вторичных КЛ через атмосферу Земли с использованием модели RUSCOSMICS, показана лишь одна проекция геометрии атмосферы. На рисунке представлены геометрия атмосферы в «плоском» приближении, источник первичных протонов, определенный как точечный с изотропным угловым распределением, а также трекинг вторичных частиц. Атмосфера разделена на слои с одинаковым процентным содержанием воздуха и параметризованная при помощи модели NRLMSISE-00 [Picone et al., 2002]. Красными линиями показаны положительно заряженные частицы, синими — отрицательно, зелеными — нейтроны, желтыми — фотоны

На рис. 2 показаны дифференциальные энергетические спектры, полученные из данных спутника GOES для событий SEP и из данных сети станций нейтронных мониторов для событий GLE.

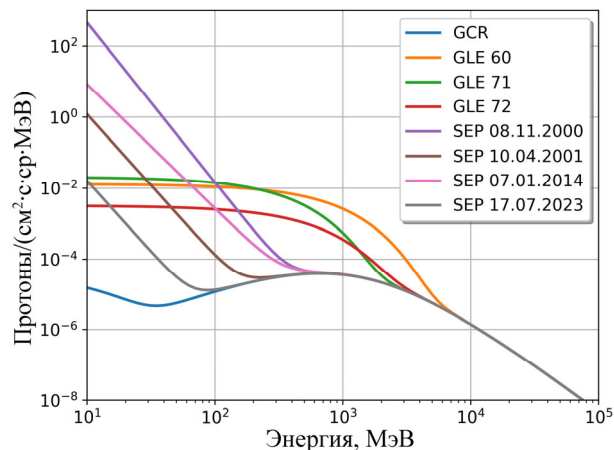


Рис. 2. Полученные из данных GOES (SEP) и по данным сети станций НМ (GLE) спектры протонов СКЛ, используемые для параметризации первичного источника частиц в модели прохождения КЛ через атмосферу Земли

Результаты

В качестве главного результата представленного моделирования были получены высотные профили ионизации (рис. 3). Наборы данных получены для двух значений жесткости геомагнитного обрезания (0.17 ГВ и 0.64 ГВ) и в большом диапазоне высот (0–98 км с шагом 1 км). На иллюстрациях хорошо видно, что максимум образования ионных пар для протонов ГКЛ находится на высотах 10–15 км. Для частиц СКЛ этот максимум смещается выше и лежит в диапазоне 30–50 км. Эти результаты находятся в хорошем согласии с данными, представленными в работах [Bazilevskaya et al., 2008; Mironova et al., 2015]. Также очевидно влияние значения жесткости геомагнитного обрезания. Частицы во время событий SEP существенно влияют на ионообразование на высотах от 50 до 100 км, что связано с увеличением значения потока для протонов до 100 МэВ.

Вместе с тем, вклад низкоэнергичных протонов становится незначительным уже при значениях жесткости геомагнитного обрезания более 0.64 ГВ и здесь на атмосферу влияют только частицы из событий GLE.

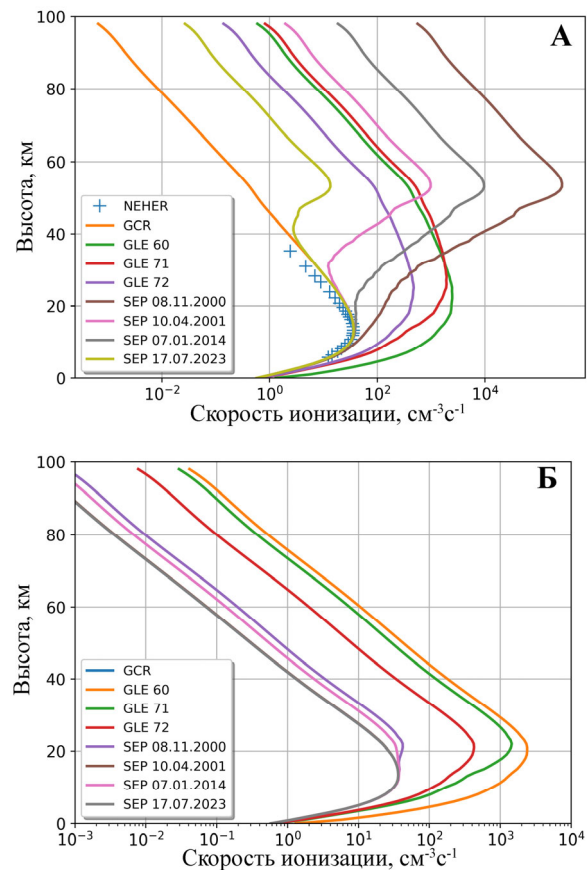


Рис. 3. Расчетная скорость ионизации, полученная при помощи моделирования прохождения протонов КЛ через атмосферу Земли как для случая ГКЛ, так и во время событий SEP и GLE. Данные представлены для двух значений жесткости геомагнитного обрезания — 0.17 ГВ (А) и 0.64 ГВ (Б). Также на (А) видно хорошее согласие с экспериментальными данными, полученными в [Neher, 1971]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были рассмотрены семь событий с аналогичными солнечными источниками, но относящимися к трем разным солнечным циклам. С использованием современных подходов и экспериментальных данных были получены спектры протонов СКЛ всех проанализированных событий. Проведена оценка скорости ионизации при помощи модели RUSCOSMICS, разработанной нами для расчетов прохождения частиц КЛ через атмосферу Земли. Профили скорости ионизации получены для всех рассмотренных событий SEP и GLE и для двух значений жесткости геомагнитного обрезания. Это позволяет количественно оценить влияние протонов СКЛ на атмосферу Земли в области высоких широт и авроральных зонах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Белов А.В. Вспышки, выбросы, протонные события // Геомагнетизм и аэрномия. 2017. Вып. 57, № 6. С. 783–793.
Маурчев Е.А., Балабин Ю.В. Модельный комплекс для исследования космических лучей // Солнечно-земная физика. 2016. Вып. 2, № 4. С. 3–8.
Allison J., Amak K., Apostolakis J. et al. Recent developments in Geant4 // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Section

A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2016. V. 835. P. 186–225.

Bazilevskaya G.A., Usoskin I.G., Flückiger E.O. et al. Cosmic Ray Induced Ion Production in the Atmosphere // Space Sci Rev. 2008. V. 137. P. 149–173.

Jackman C.H., Deland M.T., Labow G.J. et al. The influence of the several very large solar proton events in years 2000–2003 on the neutral middle atmosphere // Adv. Space Res. 2005. V. 35. P. 445–450.

Kirillov A.S., Belakhovsky V.B., Maurchev E.A. et al. Vibrational Kinetics of NO and N₂ in the Earth's Middle Atmosphere During GLE69 on January 20, 2005 // J. Geophys. Res. Atmosph. 2003. V. 128. e2023JD038600.

Mironova I.A., Aplin K.L., Arnold F. et al. Energetic Particle Influence on the Earth's Atmosphere // Space Sci Rev. 2015. V. 194. P. 1–96.

Neher H.V. Cosmic rays at high latitudes and altitudes covering four solar maxima // J. Geophys. Res. 1971. V. 76. P. 1637–1651.

Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., Aikin A.C. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparison and scientific issues // J. Geophys. Res. 2002. V. 107. Article number: 1468.

Usoskin I.G., Kovaltsov G.A. Cosmic Ray Induced Ionization in the Atmosphere: Full Modeling and Practical Applications // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. D21206

К ТЕРМОДИНАМИКЕ ТЕМНОЙ ЭНЕРГИИ

С.Э. Коренблит^{1,2}, Э.Г. Аман², А.Д. Москаленко²

¹Лаборатория Ядерных Проблем ОИЯИ, Дубна, Россия,
korenblit@ic.isu.ru

²Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

ON THERMODYNAMICS OF DARK ENERGY

S.E. Korenblit^{1,2}, E.G. Aman², A.D. Moskalenko²

¹Laboratory of Nuclear Problems JINR, Dubna, Russia,
korenblit@ic.isu.ru

²Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

Аннотация. Показано, что для однокомпонентной среды условия равновесия и устойчивости исключают существование квинтэссенции вида $P = \lambda u$, а вырождение уравнений состояния и процессов вакуумной среды фиксируют ее температуру либо нулевой, либо бесконечной.

Ключевые слова: квинтэссенция, темная энергия.

Abstract. It is shown that the conditions of equilibrium and stability for one-component medium exclude the possibility of quintessence of the form $P = \lambda u$, and the degeneracy of the equations of state and processes of the vacuum medium fix its temperature either zero or infinite.

Keywords: quintessence, dark energy.

ВВЕДЕНИЕ

Основу динамической космологии в однородном и изотропном пространстве с метрикой Фрийдмана-Леметра-Робертсона-Уокера (FLRW) $d\tau^2 = c^2 dt^2 - a^2(t) dl^2$ составляют: а) следствия уравнений Эйнштейна в форме уравнения Фрийдмана и условия ковариантного сохранения тензора энергии-импульса (G — константа Ньютона) [Горбунов, Рубаков, 2022]:

$$H^2(t) = \Gamma u - \frac{\kappa c^2}{a^2(t)},$$

$$\frac{du}{P+u} = -3 \frac{da}{a} = -3H(t)dt, \text{ где } \Gamma = 8\pi G/3,$$

$$H(t) \equiv \frac{\dot{a}(t)}{a(t)}, \quad (1)$$

— параметр Хаббла для масштабного фактора $a(t)$ метрики FLRW с производной $\dot{a}(t)$ по мировому времени t , скоростью света c и квадратом dl^2 безразмерного элемента длины трехмерного пространства постоянной кривизны знака $\kappa = 0, \pm 1$ [Вайнберг, 2013]; б) уравнение состояния космологической среды как связь $P = P(u)$ ее давления с внутренней энергией U обычно линейная $P = \lambda u$, где одна экстенсивная и пять интенсивных величин:

$$\frac{PV}{\lambda} = U(T, V, N), \quad u(T, \bar{v}) = \frac{U}{V},$$

$$\sigma(T, \bar{v}) = \frac{S}{V}, \quad \text{и } \bar{v} = \frac{V}{N}, \quad \bar{\varepsilon}(T, \bar{v}) = \frac{U}{N},$$

$$\bar{s}(T, \bar{v}) = \frac{S}{N}, \quad (2)$$

есть зависящие и от температуры T среды, соответственно: полная внутренняя энергия U , объемные плотности этой энергии и энтропии, а также удельные объем, энергия и энтропия. Вообще говоря, зависящий от величины выделяемого объема V среды и числа N частиц в нем безразмерный параметр $\lambda(V) = \varpi(\bar{v})$ назван параметром Грюнайзена [Квасников, 2002]. Второе уравнение (1) есть общее определение давления в адиабатическом процессе для сопутствующего

объема $V \mapsto V_a = [a(t)\Delta l]^3$, но верное для любых V и $U(S, V, N) = Vu(\bar{s}, \bar{v})$:

$$P = -\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_{S,N} = -\left(\frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial \bar{v}}\right)_{\bar{s}} = -\left(\frac{\partial(\bar{v}u)}{\partial \bar{v}}\right)_{\bar{s}} =$$

$$-u - \bar{v} \left(\frac{\partial u}{\partial \bar{v}}\right)_{\bar{s}} = -\left(\frac{\partial(Vu)}{\partial V}\right)_{S,N} = -u - V \left(\frac{\partial u}{\partial V}\right)_{S,N}. \quad (3)$$

Интегрируя это уравнение из (1) как (3) легко при $\lambda = const$ найти интегралы Фрийдмана (ИФ) [Чернин, 2008] для однокомпонентной среды в удобном для дальнейшего виде:

$$u(\bar{s}, \bar{v}) = \bar{B}_\lambda(\bar{s})\bar{v}^{-\lambda-1} =$$

$$\bar{B}_\lambda(S, N)V^{-\lambda-1} \mapsto B_\lambda[a^3(t)(\Delta l)^3]^{-\lambda-1},$$

откуда $\bar{B}_\lambda(S, N) = N^{\lambda+1}\bar{B}_\lambda(\bar{s})$, (4)

т.е. $\bar{B}_\lambda(\bar{s}) = Q_\lambda \bar{s}^{\lambda+1} + D_\lambda$, а $\bar{B}_\lambda(S, N) = Q_\lambda S^{\lambda+1} + D_\lambda N^{\lambda+1}$, и $B_\lambda \equiv \bar{B}_\lambda(S_a, N_a) = N_a^{\lambda+1}\bar{B}_\lambda(\bar{s})$, (5)

$u(\bar{s}, \bar{v}) \Rightarrow u(\sigma, \bar{v}) = Q_\lambda \sigma^{\lambda+1} + D_\lambda \bar{v}^{-\lambda-1}$,

где уже произвольные $Q_\lambda(\bar{s}) > 0$, $D_\lambda(\bar{s}) \geq 0$, (6)
 S_a и N_a — энтропия и число частиц в полном сопутствующем объеме V_a . Разные значения $\lambda = 1/3; 0; -1$ отвечают доминированию соответственно: ультрарелятивистской среды или излучения; нерелятивистской холодной среды (темной и/или барионной «пыли»); и вакуума. Интервал $-1 < \lambda < 0$ отдан т.н. квинтэссенции как некоторой «предвакуумной» среде, чье λ по смыслу есть функция t и чьи различные модели зависимости обсуждаются в литературе [Горбунов, Рубаков, 2022]. Необходимость ее учета как зависимости от сопутствующего объема $V_a = [a(t)\Delta l]^3$, т.е. от \bar{v} , видна и из приводимых ниже условий устойчивости среды.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ СРЕДЫ (2)

Используя вытекающие из 2-го начала термодинамики и соотношений Максвелла равенства

$$\left(\frac{\partial \bar{\varepsilon}(T, \bar{v})}{\partial \bar{v}}\right)_T = T \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_{\bar{v}} - P, \quad (7)$$

или $\left(\frac{\partial U(T, V, N)}{\partial V}\right)_{T, N} = T \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_{V, N} - P,$

как теоремы Эйлера об однородных функциях первого порядка в переменных $T, \zeta(\bar{v}), \xi(V)$:

$$\frac{d \ln \zeta(\bar{v})}{d \ln \bar{v}} = -\varpi(\bar{v}), \quad \zeta(\bar{v}) = \zeta_0 \exp \left\{ - \int_{\bar{v}_0}^{\bar{v}} \frac{d\eta}{\eta} \varpi(\eta) \right\},$$

$$\zeta_0 = \zeta(\bar{v}_0), \quad \bar{\varepsilon}(T, \zeta) = \left(T \frac{\partial}{\partial T} + \zeta \frac{\partial}{\partial \zeta} \right) \bar{\varepsilon}(T, \zeta), \quad (8)$$

$$\frac{d \ln \xi(V)}{d \ln V} = -\lambda(V), \quad \xi(V) = \xi_0 \exp \left\{ - \int_{V_0}^V \frac{dv}{v} \lambda(v) \right\},$$

$$\xi_0 = \xi(V_0), \quad U(T, \xi) = \left(T \frac{\partial}{\partial T} + \xi \frac{\partial}{\partial \xi} \right) U(T, \xi), \quad (9)$$

находим их решения в виде функций единственных переменных: $q \equiv \frac{T}{\zeta(\bar{v})}$ или $z \equiv \frac{T}{\xi(V)}$:

$$\bar{\varepsilon}(T, \zeta) = \zeta \chi \left(\frac{T}{\zeta} \right), \quad \text{или} \quad U(T, \xi) = \xi f \left(\frac{T}{\xi} \right),$$

и $P(T, \bar{v}) = \frac{\varpi(\bar{v})}{\bar{v}} \zeta \chi \left(\frac{T}{\zeta} \right) = \frac{\lambda(V)}{V} \xi f \left(\frac{T}{\xi} \right).$ (10)

Два независимых по переменным T и \bar{v} очевидных решения (10) уравнения (8) $\forall \lambda(V)$ есть $\chi_{[0]}(q) = A$ и $\chi_{[1]}(q) = \bar{A}q$, где $A, \bar{A} = const > 0$. Поскольку величина удельного объема \bar{v} , определенная по любому выделяемому в данный момент времени t элементу собственного объема V или элементу сопутствующего объема $V_a = [a(t)\Delta l]^3$ одна и та же:

$$\bar{v} \equiv \frac{V}{N} = \frac{[a(t)\Delta l]^3}{N_a},$$

то и $q = q(T, \bar{v}) \equiv \frac{T}{\zeta(\bar{v})} \mapsto T\bar{v}^\lambda$ (но не $z!$),

будет одним и тем же. (11)

Для полных и удельных теплоемкости и энтропии имеем, соответственно:

$$C_{V, N} = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_{V, N} = f'(z) = N \bar{C}_{\bar{v}}, \quad \bar{C}_{\bar{v}} = \chi'(q),$$

где $f(z; N) = N \frac{\zeta_0}{\xi_0} \chi(q), \quad q = \frac{\xi_0}{\zeta_0} z,$ (12)

$$S(z)|_N = \int_{[0]}^z dx \frac{f'(x)}{x}, \quad \text{и} \quad \bar{s}(q) = \int_{[0]}^q dy \frac{\chi'(y)}{y},$$

где $[0] \mapsto z_0, q_0$, и включают $S(z_0) = N \bar{s}(q_0)$ и \bar{s}_0 . (13)

В итоге одна функция одной переменной $\chi(q)$ определяет всю термодинамику среды и сама определяется ее химпотенциалом, но по-разному; $\mu(T, \bar{v}) \equiv \bar{\varepsilon}(T, \bar{v}) + P\bar{v} - T\bar{s}(T, \bar{v}),$

откуда: $\varphi(q, \bar{v}) \equiv \frac{\mu(T, \bar{v})}{T} = [1 + \varpi(\bar{v})] \frac{\chi(q)}{q} - \bar{s}(q),$

и: $\frac{\chi(q)}{q} = \frac{1}{\varpi'(\bar{v})} \left(\frac{\partial \varphi(q, \bar{v})}{\partial \bar{v}} \right)_q,$

$$\lambda(V) = \varpi(\bar{v}) \neq const, \quad (14)$$

или $\frac{\chi(q)}{q} = q^{1/\lambda} \left[A_\lambda + \int_{[0]}^q dy \frac{\varphi'(y)}{\lambda y^{1/\lambda}} \right],$

при $\lambda = const \neq 0, \quad \varphi(q, \bar{v}) \mapsto \varphi(q),$

$$A_\lambda = const > 0. \quad (15)$$

Уравнения равновесного адиабатического процесса в этой среде — при фиксированной $S(z)$ или $\bar{s}(q)$ вытекают из (10), (13) как постоянство ($\Rightarrow const$) любой из следующих величин:

$$z \Rightarrow b(S), \quad f(z) \equiv \frac{U(T, V)}{\xi(V)} \Rightarrow B(S(b));$$

или $q \Rightarrow \beta(\bar{s}), \quad \chi(q) \equiv \frac{\bar{\varepsilon}(T, \bar{v})}{\zeta(\bar{v})} \Rightarrow \bar{B}(\bar{s}(\beta)).$ (16)

Условия равновесия и его устойчивости в терминах интенсивных величин [Квасников, 2002] $\bar{C}_{\bar{v}} > 0, \quad -\bar{v} \left(\frac{\partial P}{\partial \bar{v}} \right)_{\bar{s}} > -\bar{v} \left(\frac{\partial P}{\partial \bar{v}} \right)_T \geq 0,$ дают, что:

$$\chi'(q) > 0, \quad 1 + \frac{d}{d\bar{v}} \left(\frac{\bar{v}}{\varpi(\bar{v})} \right) \geq \frac{d \ln \chi(q)}{d \ln q} > 0, \quad (17)$$

т.к. $\chi(q) > 0$ при $\bar{\varepsilon} > 0, \quad \zeta(\bar{v}) > 0, \quad \bar{v} > 0, \quad T > 0$. Ввиду полного разделения независимых здесь переменных \bar{v} и q существует константа $\alpha > 0$, ограничивающая степень роста функции от \bar{v} степень роста возрастающей до бесконечности, дифференцируемой всюду при $0 \leq q < \infty$ функции $\chi(q) \leq \chi_{[\alpha]}(q) \equiv A_{[\alpha]} q^\alpha,$ при $\lambda(V) = \varpi(\bar{v}) \neq const$, как:

$$1 + \frac{d}{d\bar{v}} \left(\frac{\bar{v}}{\varpi(\bar{v})} \right) \geq \alpha = \max_q \left[\frac{d \ln \chi(q)}{d \ln q} \right] > 0;$$

или как: $1 + \frac{1}{\lambda} \geq \alpha > 0,$ при $\lambda = const,$ (18)

что, во всяком случае, означает: $\lambda \geq 0$, либо $\lambda < -1$, исключая существование устойчивой равновесной среды с таким $-1 < \lambda < 0$. Условия на функцию $\varpi(\bar{v}) \neq const$ для такой среды при $0 < \bar{v} < \infty$ принимают вид:

$$\min_{\bar{v}} \left[\frac{d}{d\bar{v}} \left(\frac{\bar{v}}{\varpi(\bar{v})} \right) \right] \geq \alpha - 1, \quad -1 < \varpi(\bar{v}) < 0,$$

откуда (19)

для функции $\bar{\varepsilon}(\bar{v}) = -\frac{\bar{v}}{\varpi(\bar{v})}$ имеем условия:

$$\max_{\bar{v}} [\bar{\varepsilon}'(\bar{v})] \leq 1 - \alpha, \quad \bar{v} < \bar{\varepsilon}(\bar{v}) < \infty, \quad (20)$$

явно несовместные при $\alpha > 0$. Т.е. однокомпонентная среда с уравнением состояния $P = \lambda u$ оказывается невозможна как макроскопически устойчивая термодинамически равновесная среда, ни для какой функции $-1 < \lambda(V) = \varpi(\bar{v}) < 0$. (Фиксированное $(\Delta l)^3$ далее опускаем.) В случае $\lambda = const$ вышеприведенные соотношения заметно упрощаются, и при $\xi = V^{-\lambda}, \quad \zeta = \bar{v}^{-\lambda}, \quad z = TV^\lambda, \quad q = T\bar{v}^\lambda = zN^{-\lambda}$ последовательно находим уравнения состояния:

$$\bar{\varepsilon}(T, \bar{v}) = \bar{v}^{-\lambda} \chi(T\bar{v}^\lambda), \quad U(T, V, N) = V^{-\lambda} f(TV^\lambda; N),$$

$$P = \frac{\lambda}{V^{\lambda+1}} f(TV^\lambda; N) = \frac{\lambda}{\bar{v}^{\lambda+1}} \chi(T\bar{v}^\lambda), \quad (21)$$

$$u(T, \bar{v}) = \frac{\bar{\varepsilon}(T, \bar{v})}{\bar{v}} = \frac{\chi(q)}{\bar{v}^{\lambda+1}}, \quad \sigma(T, \bar{v}) = \frac{\bar{s}(T\bar{v}^\lambda)}{\bar{v}},$$

т.е. $f(z; N) = N^{\lambda+1} \chi \left(\frac{z}{N^\lambda} \right);$ (22)

и уравнения адиабатического процесса (и то же с заменой $\bar{v} \mapsto V, \quad \bar{\varepsilon} \mapsto U, \quad \beta \mapsto b, \quad \chi \mapsto f$):

$$q \equiv T\bar{v}^\lambda \Rightarrow \beta, \quad \bar{\varepsilon}\bar{v}^\lambda \equiv u\bar{v}^{\lambda+1} \Rightarrow \bar{B}_\lambda(\bar{s}) = \chi(\beta),$$

$$P\bar{v}^{\lambda+1} \Rightarrow \lambda\chi(\beta), \quad \frac{\mu}{T} \Rightarrow \varphi(\beta). \quad (23)$$

Сравнив (13), (22), (23) и (4)–(6), видим, что $\bar{B}_\lambda(\bar{s}(q)) = Q_\lambda(\bar{s})\bar{s}^{\lambda+1} + D_\lambda(\bar{s}) \equiv \chi(q)$, что дает:

$$\bar{s}(q) = \left[\frac{\chi(q) - D_\lambda}{Q_\lambda} \right]^{\frac{1}{\lambda+1}},$$

и $\bar{s}'(q) = \frac{\chi'(q)}{q} \mapsto \frac{\chi'(q)}{(\lambda+1)Q_\lambda} \left[\frac{\chi(q) - D_\lambda}{Q_\lambda} \right]^{-\frac{\lambda}{\lambda+1}},$

если $Q_\lambda, D_\lambda \mapsto const,$ (24)

откуда вновь или $\chi_{[0]}(q) = A_{[0]} = A = const$, или $\chi_{(\lambda)}(q) - D_\lambda = Q_\lambda \left[\frac{q}{(\lambda+1)Q_\lambda} \right]^{1+1/\lambda} \equiv A_\lambda q^{1+1/\lambda},$ (25)

$$A_\lambda = \frac{Q_\lambda^{-1/\lambda}}{(\lambda+1)^{1+1/\lambda}} > 0; \quad \text{т.е. либо } \bar{s}_{[0]}(q) = \left[\frac{A_{[0]} - D_\lambda}{Q_\lambda} \right]^{\frac{1}{\lambda+1}} = const, \quad \text{либо } \bar{s}_{(\lambda)}(q) = \left[\frac{q}{(\lambda+1)Q_\lambda} \right]^{1/\lambda}.$$
 (26)

Общее решение уравнения (8) есть суперпозиция: $\chi(q) = \chi_{[0]}(q) + \chi_{[1]}(q) + \chi_{(\lambda)}(q) + \dots$, и в согласии с законом Нернста при $\bar{s}_{0(\lambda)} = \bar{s}_{0[0]} = \bar{s}(q=0) = 0$ достаточно считать, что $D_\lambda \mapsto A_{[0]}$. Тогда для соответствующих хипотенциалов получим: $\mu(T, \bar{v}) = \mu_{[1]}(T, \bar{v}) + \mu_{(\lambda)}(T, \bar{v})$, где

$$\begin{aligned} \mu_{(\lambda)} &= \mu_{[0]} = (\lambda + 1) \frac{A_{[0]}}{\bar{v}^\lambda}, \\ \frac{\mu_{[1]}(T, \bar{v})}{T} &= (\lambda + 1) \bar{A} - \bar{A} \ln \frac{q}{q_0} - \bar{s}_{0[1]}, \\ \text{т.к. } \bar{s}_{[1]}(q) &= \bar{A} \ln \frac{q}{q_0} + \bar{s}_{0[1]}, \end{aligned} \quad (27)$$

как следствие нарушающих закон Нернста $\chi_{[1]}(q)$ и $\frac{\mu_{[1]}(T, \bar{v})}{T} = \bar{A}[1 + \varpi(\bar{v})] - \bar{A} \ln \frac{q}{q_0} - \bar{s}_{0[1]}$. (28)

Т.е. в отсутствие при данном λ вкладов $\chi_{[0]}(q)$ и $\chi_{[1]}(q)$ имеем решение $\chi_{(\lambda)}(q) = A_\lambda q^{1+1/\lambda}$ с $f_{(\lambda)}(z) = A_\lambda z^{1+1/\lambda}$, $U_{(\lambda)}(T, V) = A_\lambda VT^{1+1/\lambda}$, $S_{(\lambda)}(z) = (\lambda + 1)A_\lambda z^{1/\lambda} = (\lambda + 1)A_\lambda VT^{1/\lambda}$, (29) $P_{(\lambda)}(T) = \lambda u_{(\lambda)}(T) = \lambda A_\lambda T^{1+1/\lambda}$,

$$C_{V(\lambda)} = \left(1 + \frac{1}{\lambda}\right) A_\lambda VT^{1/\lambda}, \mu_{(\lambda)} = 0 \text{ при } A = 0, \text{ т.е. } \bar{\varepsilon}(0, \bar{v}) = 0, \quad (30)$$

где поэтому в соответствии с (21), (22) несохраняющаяся величина N выпадает из экстенсивных функций состояния $U_{(\lambda)}$, $S_{(\lambda)}$ и т.д., как и хипотенциал – из интенсивных в (30). Темной энергии отвечает возможный для этого решения предельный переход $\lambda \rightarrow -1$, при котором, однако, происходит вырождение не только решений $\chi_{[0]}$ и $\chi_{(-1)}$ как уравнений состояния, но и как процессов. При $q \equiv T/\bar{v}$, $z \equiv T/V$ имеем $q \Rightarrow \beta(\bar{s})$, $z \Rightarrow b(S)$ наряду с

$$\begin{aligned} -P = u = f_{(-1)}(z) &= \chi_{(-1)}(q) = A_{-1} = Q_{-1} \\ \mapsto A = \chi_{[0]} = \chi_{(-1)}(\beta) &= f_{(-1)}(b) \neq 0, \\ \text{при } \mu_{(-1)} = \mu_{[0]} &\rightarrow 0, \end{aligned} \quad (31)$$

и $S_{(-1)} = C_V = C_P = C_S \equiv 0$, $U_{(-1)} = A_{-1}V = A_{-1}T/b$, для произвольных T, V и $z \equiv T/V$. (32)

Т.е. адиабатический – изобарический процесс оказался единственно возможным в этой вакуумной среде, а ее температура оказалась неопределенной и излишней термодинамической переменной. Тогда выполнение уравнения процесса $z = b = const$ как $T = bV$ наряду с

уравнениями состояния — процесса (31) означает, что, либо $b = 0$ и $T = 0$ в (32) в согласии со значениями энтропии и теплоемкостей из принципа Нернста; либо $b = \pm\infty$ и, стало быть, $T = \pm\infty$, с теми же S, C_V, C_P , так или иначе «отвязывая» температуру T от объема V .

Подстановка $u(T, \bar{v})$ из (21), (22) в ИФ (4) для функций от $q = T\bar{v}^\lambda$, $z = TV^\lambda$, с произвольным собственным объемом V однородной изотропной среды, независимо от фактора $a(t)$ дает:

$$\begin{aligned} \chi(q) &= B_\lambda \left[\frac{\bar{v}}{a^3}\right]^{\lambda+1} \equiv B_\lambda \left[\frac{q}{Z_\lambda(a)}\right]^{1+1/\lambda}, \\ f(z) &= B_\lambda \left[\frac{V}{a^3}\right]^{\lambda+1} \equiv B_\lambda \left[\frac{z}{Z_\lambda(a)}\right]^{1+1/\lambda}, \\ Z_\lambda(a) &= T[a(t)]^{3\lambda}. \end{aligned} \quad (33)$$

При $\lambda = -1$ в (5), (31): $A_{-1} = B_{-1} = Q_{-1}$, независимо от интерпретации $a(t)$ для этой среды и от значений для нее полных энтропии S_a и числа N_a частиц в сопутствующем объеме V_a . При $\lambda = 0$ имеем $z = q = T = Z_0(a)$ и для $\chi_{(\lambda)}(q)$ из (29), (30) такой предел не существует. Однако в силу (11) первое выражение $\chi(q)$ в (33) означает, что «работает» решение $\chi_{[0]}(q)$: $\bar{\varepsilon}_0(T, \bar{v}) \mapsto \chi_0(T) = B_0/N_a = const = \chi_{[0]}(q) = A$, с возможной примесью $\chi_{[1]}(q)$ при $\bar{A} = 0$, но с $\mu = \mu_{(0)} + \mu_{[1]} \equiv A - T\bar{s}_{0[1]} \mapsto A$, т.к. $\bar{\varepsilon}_0 \mapsto A$ отвечает нерелятивистской «пыли» с $P = 0$, $T = 0$. Выражение же $f(z = T)$ в (33) имеет смысл лишь при $V \mapsto a^3$ с B_0 в качестве полной массы. При $\lambda = 1/3$ уравнения (29), (30), (33) описывают известную ультрарелятивистскую среду, а $\lambda = 2/3$ дает нерелятивистский вырожденный идеальный бозе-газ; $Z_\lambda(a) \Rightarrow b(S_a) = const$ и в силу закона эволюции температуры [Горбунов, Рубаков, 2002], и в силу уравнения адиабаты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Вайнберг С. Космология. М.: УРСС, 2013. 605 с.
 Горбунов Д.С., Рубаков В.А. Введение в теорию ранней Вселенной. Теория горячего Большого взрыва. М.: УРСС. 2022. 614 с.
 Квасников И.А. Теория равновесных систем. Термодинамика. М.: УРСС. 2002. 238 с.
 Чернин А.Д. Темная энергия и всемирное тяготение // УФН. 2008. Т. 178, № 3. С. 267–300.

УДК 523.985.3

НАБЛЮДЕНИЕ ФАЗЫ СПАДА БЕЛОЙ ВСПЫШКИ В МИКРОВОЛНОВОМ ДИАПАЗОНЕ

И.Д. Мотык, Л.К. Кашапова

Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия,
motykilya@iszf.irk.ru

OBSERVATION OF WHITE-LIGHT FLARE DECAY PHASE IN MICROWAVE RANGE

I.D. Motyk, L.K. Kashapova

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, motykilya@iszf.irk.ru

Аннотация. Представлены первые результаты исследования процессов энерговыделения на фазе спада белой вспышки, класса M2.7, 17 июля 2023 г. Событие произошло на юго-западной части солнечного лимба, что позволило провести анализ пространственной структуры и развития микроволнового источника пост-эруптивной аркады без вклада излучения спокойного Солнца. Оценка магнитного поля микроволнового источника по пиковой частоте гиросинхротронного спектра указывает на слабое поле около 3 Гс в области формирования микроволнового вспыхивающего источника. Эволюция микроволнового спектра показала, что в начале формирования аркады присутствовали ускоренные электроны, однако спустя час тепловое тормозное излучение стало доминировать в спектре, указывая на большое количество тепловой плазмы.

Ключевые слова: Солнечные вспышки, фаза спада, пост-эруптивная аркада, Сибирский Радиогелиограф.

Abstract. In this study, we present the first results of the energy release process during the decay phase of an M 2.7 GOES-class white flare that occurred on July 17, 2023. The event was located at the southwestern part of the solar limb. This position allowed us to analyze the spatial structure and the microwave source evolution of the post-eruptive arcade without the effect of the solar disk emission. An estimation of the magnetic field of the microwave source by the peak frequency of the gyro-synchrotron spectrum indicates a weak field of about 3 G in the region where the microwave flare emission was generated. The microwave spectrum evolution showed that accelerated electrons were present at the beginning of arcade formation, but an hour later, thermal bremsstrahlung began to dominate the spectrum, indicating a large amount of thermal plasma.

Keywords: Solar flares, decay phase, posteruptive arcade, Siberian Radioheliograph.

ВВЕДЕНИЕ

Вспышка является одним из наиболее заметных и ощутимых проявлений солнечной активности. Её связь с корональными выбросами массы и последующими магнитными бурями на Земле делает её важным и интересным объектом изучения. Эволюцию вспышки подразделяют на 2 этапа: фаза роста и фаза спада. Фаза роста характеризуется быстрым ростом потока излучения в широком диапазоне электромагнитного спектра. Такое поведение связывают с лавинообразным выделением энергии, накопленной в структурах магнитных силовых линий. Длительность данной фазы составляет от нескольких секунд до десятков минут. Последующая фаза спада характеризуется медленным возвращением значений потока к предвспыхивающему уровню, что связывают с охлаждением плазмы. Численные [Jakimes et al., 1992] и аналитические [Cargill et al., 1995] модели, описывающие эволюцию вспышки, исходят из предположения, что во время фазы спада работают только процессы охлаждения. Однако, наблюдения указывают на более длительное время остывания плазмы, чем предсказывают теоретические модели [Ryan et al., 2013]. Одно из возможных объяснений данной проблемы может заключаться в отличии вкладов каждого процесса в реальности от того, что предполагают модели [Motyk & Kashapova, 2022]. Другой возможной причиной может быть то, что процессы энерговыделения во вспыхивающей плазме не прекращаются после достижения максимума излучения. Это могут быть и процессы связанные с нагревом плазмы, и с ускорением частиц. Наиболее чувствительной к типам механизмов излучения является микроволновое (МВ)

излучение. Но для использования этого вида излучения необходимы микроволновые наблюдения, которые были редки до настоящего времени. В работе [Grigoryeva et al., 2007] был представлен микроволновой анализ пост-эруптивной аркады на лимбе Солнца по данным микроволнового излучения радиотелескопа Ратан-600. МВ источник находился близко к солнечному экватору, что позволило провести анализ его пространственной и спектральной эволюции. Авторы также отметили доминирование теплового излучения в микроволновых спектрах, что указало на большое количество плазмы в пост-эруптивных аркадах. Остались неясными источники энергии, позволившие наблюдать излучение пост-эруптивной аркады в течение нескольких часов. С началом наблюдений Сибирского радиогелиографа [Lesovoi et al., 2017], появилась возможность исследовать эволюцию процессов определяющих генерацию излучения пост-эруптивной аркады с пространственным разрешением. Целью данной работы является анализ пространственной связи между развитием пост-эруптивной аркады наблюдаемой в ультрафиолетовом и микроволновом диапазонах, а также выявление механизмов генерации микроволнового излучения.

АНАЛИЗ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ

Исследуемая вспышка началась примерно в 22:55 UT 17 июля 2023 г. и закончилась после 4:00 UT 18 июля. Событие произошло на западном лимбе Солнца, что позволило наблюдать развитие и рост пост-эруптивной аркады без влияния каких-либо проекционных эффектов. Наблюдения Geostationary Operational

Environmental Satellites (GOES) в мягком рентгеновском диапазоне 1–8 Å показали, что класс вспышки составил M2.7. В целом фаза спада рассматриваемой вспышки длилась примерно 5 часов и её можно отнести к так называемым «продолжительным событиям» (long duration events). Положение события на диске Солнца и длительность эволюции делает его интересным объектом для изучения процессов, происходящих во время фазы спада солнечных вспышек. Наблюдения на инструментах космической обсерватории Advanced Space-based Solar Observatory (ASO-S) позволили классифицировать данную вспышку, как белую т.е. демонстрирующее излучение из области фотосферы.

Информация о спектральных свойствах микроволнового потока во время данного события была доступна по наблюдениям спектрополяриметра Nobeyama Radio Polarimeters (NRP) и одно из спектрографов сети Radio Solar Telescope Network (RSTN). Сибирский Радиогелиограф (СРГ) наблюдал данное событие в диапазоне 3–12 ГГц приблизительно с 00:00 UT 18 июля 2023 г., что позволило проследить за динамикой развития пост-эруптивной аркады и сделать предположения о механизмах генерации излучения во время продолжительной фазы спада.

Для сравнения формы микроволнового источника, связанного с пост-эруптивной аркадой развития вспышки, использовались изображения в ультрафиолетом (УФ), крайнем ультрафиолетовом (КУФ) диапазоне, полученные телескопом AIA на Solar Dynamic Observatory (SDO).

Согласно изображениям SDO/AIA в линиях КУФ пост-эруптивная аркада начала формироваться около 00:04 UT. При этом в основании аркады наблюдалась только одна вспышечная лента типичной двуленточной вспышки. Второе основание аркады, вероятнее всего, было расположено слишком близко к лимбу из-за чего скорее всего оно не было заметно. На радиоизображениях СРГ видно, что микроволновые источники на частотах выше 2.8 ГГц достаточно хорошо соответствуют полосе AIA/SDO 131 Å которая соответствует плазме с более высокой температурой, в то время как структуры, видимые на изображениях в полосе AIA/SDO 171 Å значительно меньше по размерам и не соответствуют тому, что видно в МВ. К концу фазы спада как во всех диапазонах КУФ так и в МВ излучении видна полностью сформировавшаяся аркада. В то же время на радиоизображениях на частотах 4–6 ГГц можно выделить пятенный источник, также микроволновый источник, находящийся на вершине пост-эруптивной аркады (рис. 1).

Анализ спектральной эволюции МВ излучения вспышки был проведен с помощью комбинирования данных потоков МВ излучения приборов NRP, RSTN и СРГ. Так как спектрографы и спектрополяриметры получают поток от всего Солнца, то для данных СРГ был использован также поток от всего диска Солнца. В начале наблюдений СРГ (примерно 00:01 UT) МВ спектр имел форму гирোসинхротронного, спектра ускоренных электронов с максимумом в районе 2 ГГц [Dulk, 1985] (рис. 2, левая панель).

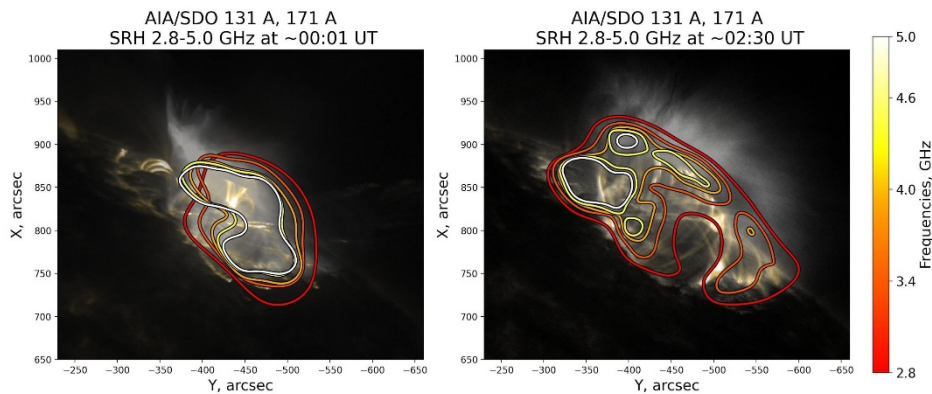


Рис. 1. Пространственная эволюция вспышки в КУФ AIA/SDO и микроволнах СРГ (SRH). Изображение в полосе 171 Å (жёлтая палитра) наложено на 131 Å (градации серого). Контуры соответствуют 70% максимальной яркостной температуры (СРГ)

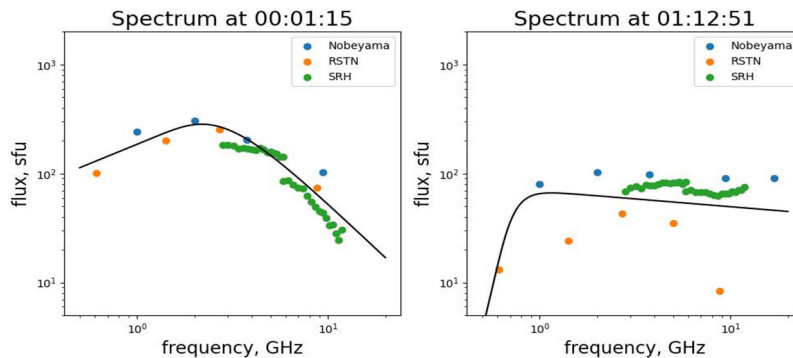


Рис. 2. Спектральная эволюция фазы спада вспышки. Чёрной линией обозначена спектральная функция, соответствующая форме микроволнового спектра и полученная в результате фитирования экспериментальных значений

Оценка, величины магнитного поля с использованием формул из [Dulk, 1985] и стандартных параметров вспышечной плазмы показало, что значение магнитного поля в области формирования МВ вспышечного источника около 3 Гс. Также мы можем сделать вывод, что диапазон наблюдений СРГ соответствует оптически тонкому источнику. С течением времени мощность спектра уменьшилась в несколько раз и при этом изменилась форма спектра. В 01:13 UT форма спектра соответствует тормозному тепловому и излучению, что говорит о доминировании излучения тепловой плазмы и слабом магнитном поле в области формирования микроволнового излучения (рис. 2, правая панель).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы провели первичный анализ процесса формирования вспышечной аркады солнечной вспышки 17 июля 2023 г. Обнаружено, что размер и форма источника развиваются в соответствии с развитием пост-эруптивной аркады. В начале ее формирования, микроволновый спектр указывает на присутствие ускоренных электронов. Приблизительно через час после формирования аркады начинает доминировать тормозное тепловое излучение, что говорит о большом количестве тепловой плазмы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России. Авторы также благодарят

команды GOES, ASO-S, NRP, RSTN, СРГ и SDO за предоставление открытого доступа к наблюдательным данным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Jakimiec J., Sylwester B., Sylwester J. et al. Dynamics of flaring loops. II - Flare evolution in the density-temperature diagram. // *Astron. & Astrophys.* 1992. V. 253, N. 1. P. 269–276.
- Cargill, P.J., Mariska J.T., Antiochos S.K. Cooling of Solar Flare Plasmas. I. Theoretical Considerations // *Astrophysical J.* 1995. V. 439. P. 1034.
- Ryan D.F., Chamberlin P.C., Milligan R.O., Gallagher P.T. Decay-phase cooling and inferred heating of m- and x-class solar flares // *Astrophys J.* 2013. V. 778. P. 68.
- Motyk I.D., Kashapova L.K. Study of Cooling Processes during the Decay Phase of Solar and Stellar Flares // *Astronomy Reports.* 2022. V. 66, iss. 11. P. 1043–1049.
- Grigoryeva I.Y., Borovik V.N., Livshits M.A. et al. Post-Eruptive Arcade Formation in the 25 January 2007 CME/Flare Limb Event: Microwave Observations with the RATAN-600 Radio Telescope // *Solar Phys.* 2009. V. 260, iss. 1. P. 157–175.
- Lesovoi S.V., Altyntsev A.T., Kochanov A.A. et al. Siberian radioheliograph: First results // *Sol.-Terr. Phys.* 2017. V. 3, N 1. P. 3–18.
- Gan W., Zhu C., Deng Yu. The Advanced Space-Based Solar Observatory (ASO-S) // *Solar Phys.* 2023. V. 298, iss. 5.
- Lemen J.R., Title A.M., Akin D.J. et al. The Atmospheric Imaging Assembly (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO) // *Solar Phys.* 2012. V. 275, N 1–2. P. 17–40.
- Dulk G.A. Radio emission of the sun and stars // *Annual Rev. Astron. Astrophys.* 1985. V. 23. P. 169–224.

НЕЗАТУХАЮЩИЕ КОЛЕБАНИЯ СОЛНЕЧНЫХ КОРОНАЛЬНЫХ ПЕТЕЛЬ КАК ВОЗМОЖНЫЕ ПРЕДВЕСТНИКИ ВСПЫШЕК

А.Б. Нечаева¹, И.В. Зимовец¹, И.Н. Шарькин¹, С.А. Анфиногентов²

¹Институт космических исследований Российской академии наук, Москва, Россия,
nechaeva.workspace@gmail.com

²Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

DECAYLESS OSCILLATIONS OF SOLAR CORONAL LOOPS AS POSSIBLE PRECURSORS OF FLARES

A.B. Nechaeva¹, I.V. Zimovets¹, I.N. Sharykin¹, S.A. Anfinogentov²

¹Space Research Institute RAS, Moscow, Russia, nechaeva.workspace@gmail.com

²Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia

Аннотация. Солнечная вспышка — это внезапный, быстрый и сильный магнитно-энергетический выброс, характеризующийся усилением яркости излучения в широком спектре, наблюдаемый вблизи солнечных пятен. Изучение солнечных вспышек и их предвестников — важная задача как для понимания самого процесса накопления и выделения энергии во вспышечных областях, так и для прогнозирования вспышек.

В данной работе в качестве одного из возможных предвестников вспышек мы рассматриваем незатухающие колебания солнечных корональных петель, и их связь с потоком мягкого рентгена по данным XRS/GOES и интегральным излучением активных областей в различных каналах ультрафиолета по данным AIA/SDO. В отличие от затухающих изгибных колебаний, возбуждаемых импульсными динамическими процессами, этот тип поперечных колебаний, по всей видимости, не связан с каким-либо внешним импульсным воздействием, таким как вспышка или корональный выброс, и не демонстрирует значительного затухания. Более того, амплитуда этих незатухающих колебаний обычно ниже, чем у затухающих, поэтому для их детектирования нужны дополнительные методы обработки изображений. При этом корональные петли можно рассматривать как прокси линий магнитного поля в активных областях Солнца. Таким образом, незатухающие колебания существуют вне зависимости от динамических триггеров, и изменения в характере их поведения можно рассматривать в контексте предвспышечной активности по перестройке магнитной конфигурации активной области. Мы представляем результаты предварительного анализа незатухающих колебаний петель в нескольких активных областях и их связи с вариациями потока рентгеновского излучения перед вспышками.

Ключевые слова: Солнце, колебания солнечных петель, солнечные вспышки.

Abstract. A solar flare is a sudden, rapid and strong magnetic-energetic release characterised by an increase in the brightness of the broad-spectrum radiation observed near sunspots. The study of solar flares and their precursors is an important task both for understanding the process of energy storage and release in flare regions itself and for flare prediction.

In this work, we consider the decayless oscillations of solar coronal loops as one of the precursors of flares, and their relation to the XRS/GOES flux and the integrated emission of active regions in different UV channels of AIA/SDO. In contrast to damping kink oscillations excited by impulsive dynamical processes, this type of transverse oscillation does not appear to be associated with any external impulsive forcing, such as a flare or coronal mass ejection, and does not show significant damping. Moreover, the amplitude of these decayless oscillations is typically lower than that of the damping kink oscillations, so additional image processing techniques are needed to detect them. Coronal loops can be considered as proxies of magnetic field lines in active regions of the Sun. Thus, decayless oscillations exist independently of the dynamical triggers, and changes in their behaviour can be considered in the context of pre-explosion activity to rearrange the magnetic configuration of the active region. We present the results of a preliminary analysis of decayless loop oscillations in several active regions and their relation to variations in the X-ray flux before flares.

Keywords: Sun, solar loops oscillations, solar flares.

ВВЕДЕНИЕ

Солнечная вспышка — это внезапный, быстрый и сильный магнитно-энергетический выброс, характеризующийся усилением яркости излучения в широком спектре электромагнитного излучения и наблюдаемый в активных областях (АО) Солнца. Предсказание вспышек — важный этап понимания физических процессов, приводящих к вспышкам. В данной работе используются данные прибора Atmospheric Imaging Assembly (AIA) на борту Solar Dynamics Observatory (SDO) [Lemen et al., 2012], а также данные по потокам мягкого рентгена со всего видимого солнечного полушария XRS Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES). Мы изучили несколько мощных вспышек, произошедших, когда АО наблюдалась на лимбе Солнца.

АНАЛИЗ ДАННЫХ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Для первичного исследования были отобраны 5 мощных вспышек (SOL2024-02-09T12:53 X3.4, SOL2024-02-12T20:35 M2.7, SOL2024-02-16T06:42 X2.5, SOL2024-03-28T20:50 X1.1, SOL2024-03-30T21:01 M9.4), произошедших в феврале-марте 2024 года, для которых в областях их возникновения чётко наблюдались корональные петли вблизи лимба. Также подготовлен более масштабный список из 18 событий для последующего анализа. Основные критерии отбора вспышечных событий:

- 1) расположение АО вблизи лимба (гелиографические долготы выше ~80 градусов);
- 2) хорошая видимость корональных петель в канале 171 Å SDO/AIA в области развития вспышки;
- 3) наличие мощной вспышки (условно выше класса M1) в АО.

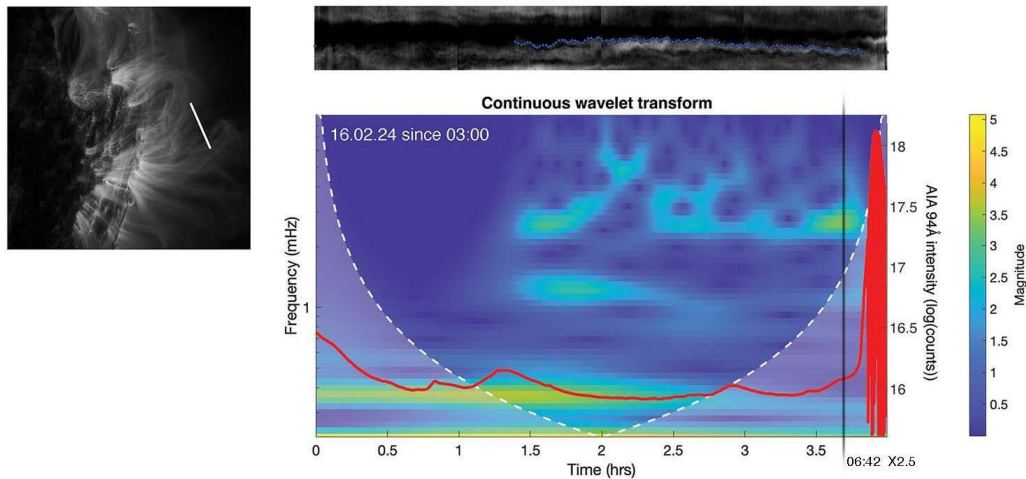


Рис. 1. Пример анализа вспышки SOL2024-02-16T06:42 X2.5. Слева — изображение рассматриваемой АО в канале AIA/SDO 171 Å, где белой линией показан срез, для которого построена диаграмма время-расстояние, показанная на верхней правой панели. На нижней левой панели представлена вейвлет-спектрограмма с нанесенным временным профилем интенсивности в канале 94 Å

Для каждой вспышки были получены данные по ультрафиолетовым изображениям с прибора AIA/SDO в каналах 171 и 94 Å для конкретной АО, в которой произошла вспышка. Для изучения поведения петель до вспышки и их связи с прекурсорами, наблюдаемыми с помощью XRS/GOES, данные проанализированы для отрезка времени от 4 часов до начала основной (мощнейшей) вспышки с временным разрешением в 12 сек. Так как амплитуда незатухающих колебаний сравнительно мала (несколько пикселей для AIA/SDO), для детектирования применялся метод Motion Magnification [Anfinogentov et al., 2019]. Затем для каждого события с помощью библиотеки PyQtGraph были построены диаграммы время-расстояние, показывающие изменение интенсивности УФ излучения вдоль выделенного отрезка во времени. Для одной из вспышек (28.03.2024 X1.1) осцилляций данным методом обнаружить не удалось. Для четырёх оставшихся вспышек на полученных диаграммах время-расстояние вручную были выделены наблюдаемые осцилляции. Так как осцилляции были выделены вручную, и количество точек при ручном выделении ограничено, полученные точки были аппроксимированы сглаживающей кривой. По точкам данных, взятых с этой кривой, был проведён вейвлет-анализ наблюдаемых осцилляций. Далее полученный результат вейвлет-анализа сравнивался с кривой интенсивности излучения из рассматриваемой АО в канале 94 Å. На рис. 1 показаны полученные результаты на примере анализа вспышки SOL2024-02-16T06:42 X2.5. Слева приведено изображение рассматриваемой активной области в канале 171Å. Белой линией показан участок, для которого формировалась карта время-расстояние, показанная слева сверху. Синими маркерами обозначены выделенные вручную точки для отслеживания колебаний. Ниже приведён результат вейвлет-анализа данных колебаний и сравнение его с кривой интегральной интенсивности в канале 94 Å для выбранной АО. Время начала вспышки по данным XRS/GOES показано вертикальной черной линией.

Сравнение вейвлет-спектрограмм для незатухающих осцилляций рассматриваемых корональных петель с временными профилями потока излучения в канале 94 Å и данными XRS GOES, выполненное для пяти проанализированных событий, не выявило очевидных закономерностей. Однако замечено следующее:

- 1) в четырёх событиях перед мощной вспышкой (классов M и X) обнаружено наличие продолжительных (~1 ч и более) незатухающих осцилляций корональных петель с частотами в диапазоне 3–6 мГц (периоды ~2.8–5.6 мин);
- 2) в трех из четырех событий также обнаружены продолжительные (30–40 мин) осцилляции в диапазоне частот 1–2 мГц (периоды ~ 8.3–16.7 мин);
- 3) в двух событиях осцилляции перестают наблюдаться перед официальным началом (за 15–50 мин) основной мощной вспышки, а в двух других событиях осцилляции перестают быть видимыми после начала основной вспышки в окрестности ускорения эрупции и начала импульсной фазы.

Причины этих осцилляций и связь с предвспышечными процессами в АО пока не очевидны. Для дальнейших выводов нужно провести рассмотрение большего числа АО с мощными вспышками и сравнить результаты с АО без мощных вспышек (контрольная выборка), что и планируется на следующий этап проекта.

Работа выполнена за счет средств Российского научного фонда (грант № 20-72-10158)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Anfinogentov S., Nakariakov V., Kosak K. DTCWT based motion magnification v0.5.0 // DOI 10.5281/zenodo.3368773.
- Lemen J.R., Title A.M., Akin D.J. et al. The Atmospheric Imaging Assembly (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO) // Solar Phys. 2012. V. 275. P. 17–40.

ЛИМБОВАЯ ВСПЫШКА С ПРЕРВАННОЙ ЭРУПЦИЕЙ

С.А. Полухина¹, Л.К. Кашапова²

¹Санкт-Петербургский Государственный Университет, Санкт-Петербург, Россия,
s.a.polukhina.astro@gmail.com

²Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук,
Иркутск, Россия

LIMB FLARE WITH FAILED ERUPTION

S.A. Polukhina¹, L.K. Kashapova²

¹Saint Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia,
s.a.polukhina.astro@gmail.com

²Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia

Аннотация. Мы исследуем лимбовую вспышку класса M7.2 по GOES с прерванной эрупцией, произошедшую 12 июля 2023 года. Событие наблюдалось широким набором инструментов с пространственным разрешением в радио, ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах, что позволило проанализировать развитие топологии вспышки. SOL2023-07-12 T08:51:45UT отнесена к типу круговой вспышки, у которой не может быть полномасштабной эрупции.

Ключевые слова: солнечная вспышка, прерванная эрупция.

Abstract. We analyzed a limb flare of class M7.2 according to GOES with a failed eruption that occurred on July 12, 2023. The event was observed with a wide range of instruments with spatial resolution in radio, ultraviolet, and X-ray spectral ranges, allowing for the analysis of the flare's topology development. The SOL2023-07-12T08:51:45UT event is classified as a circular flare, which cannot produce a full-scale eruption.

Keywords: solar flare, failed eruption.

ВВЕДЕНИЕ

Солнечная активность, в частности солнечные вспышки, определяется развитием и структурой магнитного поля. В процессе развития вспышки происходит разогрев плазмы, что может привести к резкому росту газового давления, приводящего к выбросу плазмы — к эрупции. Если процесс был достаточно мощным, то в результате эрупции сгусток плазмы улетает в космическое межпланетное пространство, и мы наблюдаем корональный выброс массы. Но так бывает не всегда. Бывает частичная эрупция, в процессе которой улетает лишь часть вещества, а, например, протуберанец остается существовать. В некоторых случаях наблюдаемое движение вещества внезапно останавливается. Наиболее вероятные причины: 1) произошло торможение движения сгустка плазмы магнитным полем; 2) наблюдаемое движение являлось видимым эффектом, связанным с другим процессом, например постепенным нагревом или волновым процессом. Комбинация наблюдений в разных спектральных диапазонах позволяет понять физические причины «прерванной эрупции». В работе мы исследуем лимбовую вспышку класса M7.2 с прерванной эрупцией, произошедшую 12 июля 2023 г. в 8:51:45 по всемирному времени.

НАБЛЮДЕНИЯ И АНАЛИЗ

Событие SOL2023-07-12 T08:51:45UT наблюдалось широким набором инструментов с пространственным разрешением в радио, микроволновом и рентгеновском диапазонах, что позволило всесторонне проанализировать развитие топологии вспышки. Согласно наблюдениям в крайнем ультрафиолете (КУФ), эта вспышка имела признаки события с прерванной эрупцией: процесс

остановки движения плазмы хорошо виден в ультрафиолетовом диапазоне по данным аппаратов SDO/AIA (131Å, 171Å).

В радиодиапазоне событие одновременно наблюдалось Сибирским радиогелиографом (СРГ) в диапазоне частот 3–24 ГГц и радиогелиографом Nançay (NRH) в дециметровом диапазоне. Характер излучения в дециметровом диапазоне позволяет оценить излучение верхней части короны и является хорошим индикатором возникновения и движения корональных выбросов. Микроволновый диапазон также позволяет проследить за выбросами плазмы. Таким образом, комбинация этих двух диапазонов позволит выявить, было ли движение плазмы и на какой высоте оно прекратилось.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Временной профиль вспышки SOL2023-07-12 T08:51:45UT имеет три пика в микроволновом диапазоне (рис. 1). Спектр для первого пика (08:51:45UT) гиротронный, максимальная частота ~10.2 ГГц. На спектрах для третьего пика (08:51:02 UT) наблюдается интересная деталь: увеличение потока к низким частотам (рис. 2). Это может быть плазменные колебания или еще один гиротронный источник с более слабым магнитным полем.

Радиокарты для этого момента показывают появление нового сильного источника в центре петли и наличие источника со слабым магнитным полем у основания петли (рис. 3). Возможно, прерванная эрупция была связана с движением нагретой плазмы по этой высокой петле. Мы также наблюдаем два микроволновых источника с излучением на частотах выше 10.6 ГГц. Один из них расположен в ногах петли и связан с мощными магнитными

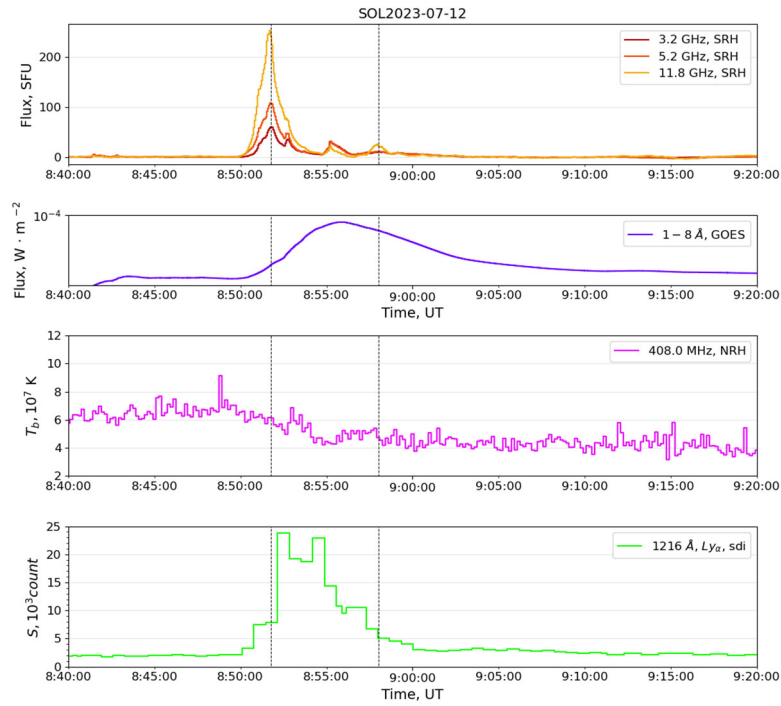


Рис. 1. Временные профили события SOL2023-07-12 T08:51:45UT. Первый и третий пик по данным Сибирского Радиогелиографа (SRH) отмечены штриховыми линиями

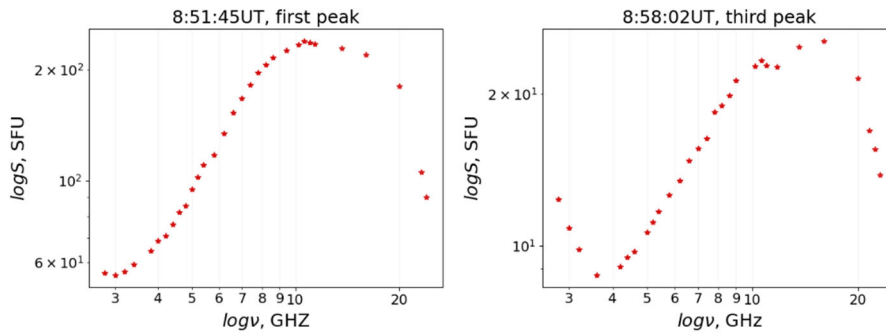


Рис. 2. Спектры события SOL2023-07-12T8:51:45UT по данным Сибирского радиогелиографа для первого и третьего пика. Данные решетки 12–24 ГГц сильно зашумлены

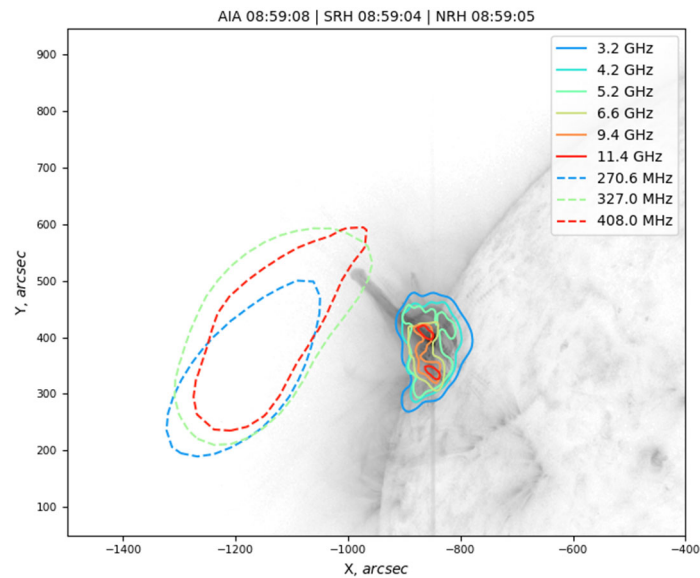


Рис. 3. Контуры радиокарт радиогелиографа Nançay (NRH) в дециметровом диапазоне (пунктиром) и Сибирского Радиогелиографа (SRH) (сплошные линии), наложенные на изображение в ультрафиолете (SDO/AIA) на момент времени после третьего пика по данным СРГ

полями. Наиболее вероятно это пятенный источник. Еще один такой источник расположен в центре «купола» и может указывать на место первичного энерговыделения ускоренных электронов. Одно из оснований вспышечной петли излучает на частотах до 5 ГГц. Этот источник находится в области, где отсутствуют сильные магнитные поля. Именно он может формировать ту низкочастотную часть спектра, которую мы видим на рис. 2 для третьего пика.

Проанализировав набор данных, мы обнаружили, что изучаемое событие имело конфигурацию круговой вспышки, магнитная морфология которой не допускает эрупции, за исключением джетов. Обсуждается возможная геоэффективность вспышки такого типа. Данные выводы являются предварительными и нуждаются в дальнейшей проверке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Filippov B.P. Failed Eruptions of Solar Filaments // *Astron. Rep.* 2020. V. 64. P. 272–279.
- Mrozek T., Kołomański S., Gronkiewicz M. Catalog of Solar Failed Eruptions and Other Dynamic Features Registered by SDO/AIA // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 2020. V. 249, N 2. P. 21.
- Altyntsev A., Lesovoi S., Globa M. et al. Multiwave Siberian Radioheliograph // *Solar-Terr. Phys.* 2020. V. 6, N 2. P. 30–40.
- Dulk G. A. Radio Emission from the Sun and Stars // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 1985. V. 23. P. 169–224.
- Globa M., Lesovoi S. Calibration of Siberian Radioheliograph antenna gains using redundancy // *Solar-Terr. Phys.* 2021. V. 7, N 4. P. 98–103.
- Wang H., Liu Ch. Circular Ribbon Flares and Homologous Jets // *Astrophys. J.* 2012. V. 760, N 2. P. 101.

СОЗДАНИЕ КАТАЛОГА СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК ПО НАБЛЮДЕНИЯМ СИБИРСКОГО РАДИОГЕЛИОГРАФА: ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Д.В. Рожкова, Л.К. Кашапова

Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия,
dariarozhkova@iszf.irk.ru

CREATING CATALOG OF SOLAR FLARES OBSERVED BY THE SIBERIAN RADIOHELIOGRAPH: FIRST RESULTS

D.V. Rozhkova, L.K. Kashapova

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, dariarozhkova@iszf.irk.ru

Аннотация. Мы представляем первые результаты создания каталога солнечных вспышек, наблюдавшихся на Сибирском Радиогелиографе (СРГ). Для отбора событий-кандидатов предложена методика, основанная на анализе поведения производной временного профиля микроволнового излучения. Методика протестирована на временных профилях мягкого рентгеновского излучения, полученных космическим аппаратом GOES, и применена для выявления солнечных вспышек, наблюдавшихся на СРГ в диапазоне 3–24 ГГц в июле 2023 г. Алгоритм показал хороший результат при применении его к корреляционным кривым СРГ, выявив не только мощные, но и слабые вспышки. Показаны примеры обнаруженных событий, обсуждаются пути улучшения алгоритма.

Ключевые слова: солнечные вспышки, Сибирский Радиогелиограф, каталог событий

Abstract. We present the first results of creating a catalog of solar flares observed by the Siberian Radioheliograph (SRH). We proposed a technique based on analysis of the intensity of microwave emission variations over time to reveal potential solar flares. The technique was tested on the time profiles of soft X-ray emission obtained by the GOES spacecraft, and applied for detection of solar flares observed by the SRH within the 3–24 GHz range in July 2023. Our method was successful in detecting both powerful and weak flares. We showed examples of the event which were identified, and discussed ways of the method improving.

Keywords: solar flares, Siberian Radioheliograph, catalog of events

ВВЕДЕНИЕ

С появлением новых инструментов с высоким временным и пространственным разрешением поток получаемой информации резко возрастает. Объем информации, требующей первичную каталогизацию, возрастает в несколько раз. Возникает проблема автоматизации отбора событий. В настоящее время, в области физики Солнца, такие алгоритмы применяются к наблюдениям космических инструментов, например, к наблюдениям в мягком рентгеновском диапазоне космического аппарата (КА) GOES. Отметим, что применение этих алгоритмов не всегда дает удовлетворительный результат, могут пропускаться более слабые или медленно развивающиеся события. С началом работы Сибирского Радиогелиографа (СРГ) появилась необходимость в разработке программного обеспечения, позволяющего автоматизировать первичный отбор солнечных вспышек, зарегистрированных прибором, и при этом учитывающий специфику наблюдений в микроволновом диапазоне.

Целью данной работы являлась разработка и тестирование алгоритма для автоматического выявления событий на основе данных, полученных с помощью СРГ. Мы также представляем первые результаты создания каталога солнечных вспышек, наблюдавшихся в диапазоне 3–24 ГГц, отобранных с использованием оригинальной методики.

ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЕГО ТЕСТИРОВАНИЕ

Используемые в работе подход основан на анализе производной временного профиля излучения в

какой-либо спектральной полосе. Это вызвано тем, что эволюцию солнечных вспышек во всех спектральных диапазонах можно охарактеризовать как сочетание резкого подъема уровня сигнала или потока излучения с последующим спадом. Так как изменения происходят непрерывно, начало, максимум и окончание солнечной вспышки (события) можно определить, анализируя производную временного профиля, заданного численной функцией. Прежде всего, для каждой спектральной полосы или диапазона длин волн вычисляется стандартное отклонение производной временного профиля в интервале времени, где отсутствуют события. Если значение производной временного профиля находится вне интервала, определяемого как три значения стандартного отклонения, то считается, что оно соответствует событию. Начало события определяется как момент времени, где производная меняет знак с отрицательного на положительный, что указывает на резкое возрастание временного профиля, а конец события — момент, где производная меняет знак с положительного на отрицательный. Точный момент максимума определяется как максимальное значение временного профиля между найденными моментами начала и окончания события.

Методика протестирована на данных КА GOES в полосе 1–8 А для 13 июля 2023 г. В период времени с 00:00 до 10:15 UT в каталоге КА GOES зафиксировано 8 событий, в то время как наш алгоритм выявил 15 солнечных вспышек разных интенсивностей (рис. 1).

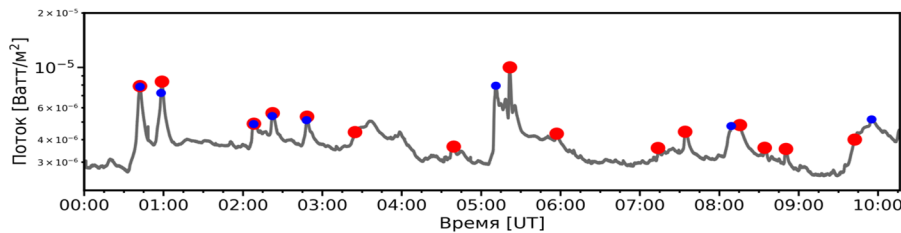


Рис. 1. Временной профиль в полосе 1–8 Å КА GOES для 13 июля 2023 г. Синие точки — события из каталога вспышек КА GOES, красные — события, обнаруженные алгоритмом

Можно заметить, что наш метод отбирает события и в некоторых случаях обнаруживает более слабые события, чем методика, используемая КА GOES. Таким образом, разработанный алгоритм способен обнаруживать как сильные солнечные вспышки класса X, M и C, так и более слабые события классов A и B, которые могут быть пропущены стандартным алгоритмом отбора событий, используемым для анализа данных КА GOES.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ К ДАННЫМ СРГ

Разработанную методику мы применили к наблюдаемым данным Сибирского Радиогелиографа. СРГ представляет собой интерферометр, состоящий из трех независимых антенных решеток, диапазоны частот которых составляют 3–6, 6–12, 12–24 ГГц [Алтынцев и др., 2020]. Одним из видов данных, получаемых с СРГ, являются корреляционные кривые, представляющие собой сумму комплексных ковариаций, вычисляемых для различных пар антенн. Благодаря чувствительности этих корреляционных кривых можно выявлять и исследовать слабые всплески микроволнового излучения [Лесовой, Кобец, 2017]. Поэтому именно эти временные профили лучше всего подходят для целей нашего исследования. Был проведен анализ данных за июль 2023 г., когда наблюдения проводились на всех решетках, в диапазоне 3–24 ГГц. Из-за особенностей наблюдения СРГ, а также по физическим причинам максимумы всплесков на различных частотах могут не совпадать. А также алгоритм может распознавать как событие артефакты, например КА. Пример обнаружения всплесков показан на рис. 2 для наблюдений 13 июля 2023 г. Так как солнечные вспышки, наблюдаемые в микроволновом диапазоне, могут отсутствовать среди событий, отобранных в каталог КА GOES, то для

автоматического нахождения события были определено следующее условие. Для того, чтобы обнаруженный всплеск считался вспышкой, необходимо, чтобы в интервале величиной до 200 сек наблюдался отклик как минимум на 15 частотах или не менее 5 частот в двух спектральных диапазонах. Далее с помощью отобранных моментов максимумов мы определяли начало, конец, минимальную и максимальную частоту события. Для наблюдений 13 июля 2023 г. было отобрано 17 событий (рис. 2). Полученные данные в каталоге представлены в виде таблицы (табл. 1).

Таблица 1.

start event	maximum event	end event	min freq GHz	max freq GHz
00:34:34	00:40:01	00:48:14	3.0	24.0

Использование корреляционных кривых позволяет отбирать события разной мощности. Пример того, как выглядят события разной мощности, отобранное нашим алгоритмом на динамическом спектре, сконструированном из корреляционных кривых и с помощью потоков микроволнового излучения (солнечные единицы потока, sfu), можно видеть на рис. 3 и рис. 4.

ОБСУЖДЕНИЯ И ВЫВОДЫ

В ходе работы нами был разработан и реализован в виде программного кода алгоритм, для автоматического выявления событий. Тестирование на наблюдениях КА GOES показало, что с помощью нашей методики отбираются вспышки, которые уже были внесены в каталог событий КА GOES, а также менее интенсивные события. Поэтому разработанную методику можно применять к данным КА GOES для отбора слабых вспышек A и B классов. Алгоритм показал хороший результат при

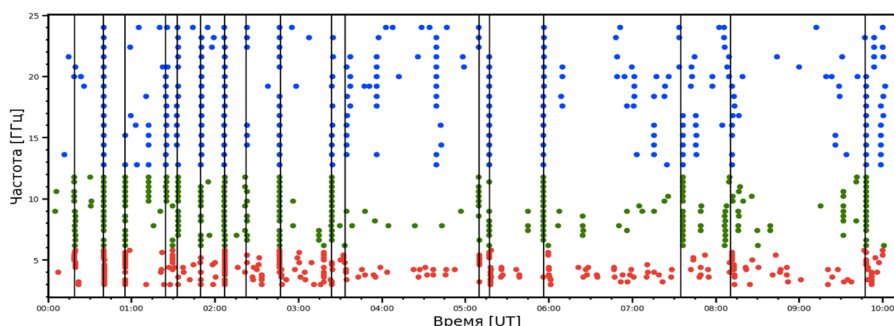


Рис. 2. Моменты максимумов, отобранных событий для каждой частоты (красные точки — 3–6 ГГц, зеленые — 6–12 ГГц, синие — 12–24 ГГц). Черные вертикальные линии — отобранные нами события

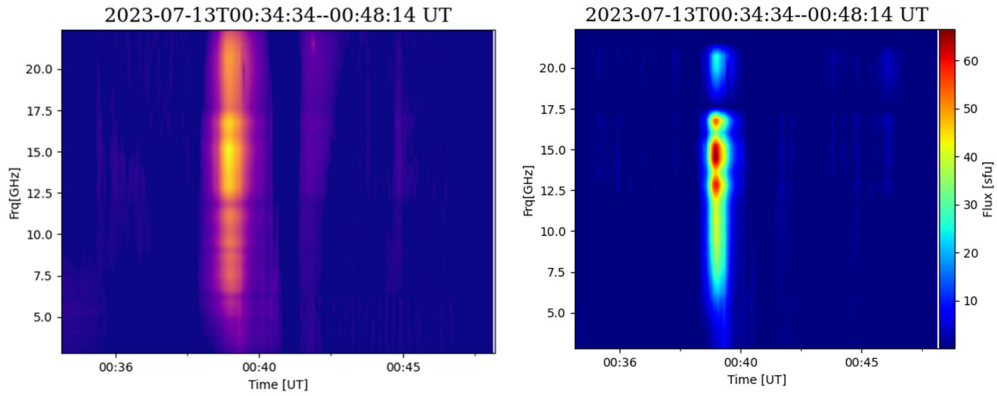


Рис. 3. Динамические спектры солнечной вспышки с простой спектрально-временной структурой, реконструированные с помощью корреляционных кривых (левая панель) и потока излучения (правая панель)

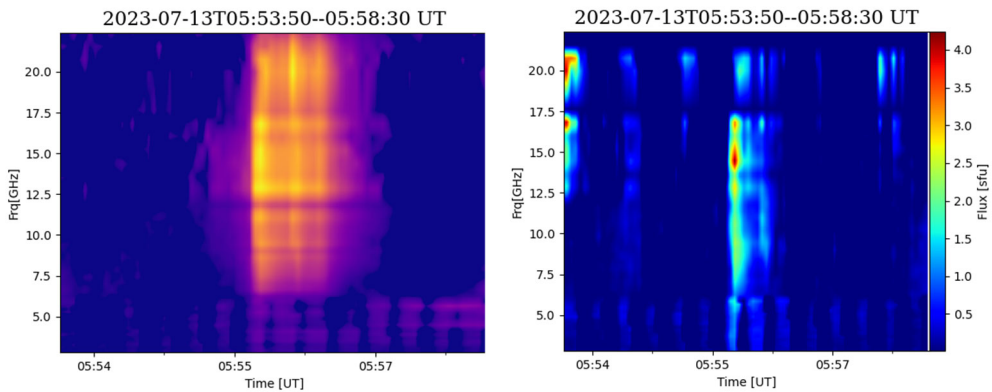


Рис. 4. Динамические спектры слабой солнечной вспышки, реконструированный с помощью корреляционных кривых (левая панель) и потока излучения (правая панель)

применении его к корреляционным кривым СРГ, выявляя слабые события. В настоящее время методика направлена на отбор широкополосных событий, чтобы избежать проявления узкополосных артефактов. Было отмечено также, что уровень шума на решетке 12–24 Гц выше, чем других диапазонах, то часть событий также могут оказаться артефактами. Поэтому в дальнейшем планируется усовершенствовать условия отбора. Разработанный метод анализа позволяет идентифицировать солнечные вспышки различной мощности и отделить их от фоновой активности Солнца, что особенно важно для выявления

слабых событий на фоне более интенсивной солнечной активности.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-22-00315, <https://rscf.ru/project/24-22-00315/>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алтынцев А.Т., Лесовой С.В., Глоба М.В. и др. Многоволновый сибирский радиогелиограф // Солнечно-земная физика. 2020. Т. 6, № 2. С. 37–50.

Лесовой С.В., Кобец В.С. Корреляционные кривые Сибирского Радиогелиографа // Солнечно-земная физика. 2017. Т. 3, № 1. С. 17–21.

СТРУКТУРА КОРОНАЛЬНОГО ВЫБРОСА МАССЫ В МЕЖПЛАНЕТНОМ ПРОСТРАНСТВЕ: АНАЛИЗ ДАННЫХ IMAGE/EUV

А.В. Рубцов¹, С.А. Анфиногентов^{1,2}

¹Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия, avrubtsov@iszf.irk.ru

²Институт космических исследований Российской академии наук, Москва, Россия

SPATIAL STRUCTURE OF THE INTERPLANETARY CORONAL MASS EJECTION: IMAGE/EUV DATA ANALYSIS

A.V. Rubtsov¹, S.A. Anfinogentov^{1,2}

¹Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, avrubtsov@iszf.irk.ru

²Space Research Institute RAS, Moscow, Russia

Аннотация. В работе представлено уникальное наблюдение фронтов повышенной яркости на длине волны 304 Å на фоне Земли по данным спутника IMAGE. Выдвинуто предположение, что эти фронты являются отображением ударной волны коронального выброса массы, произошедшего на Солнце несколькими днями ранее. Факт прохождения выброса также подтверждается данными спутников ACE и Wind вблизи точки L1. Анализ данных спутника IMAGE показал, что настоящий случай является единственным примером подобных наблюдений на длине волны 304 Å в период 2000–2005 гг. и оставляет открытым вопрос о причинах этого необычного явления.

Ключевые слова: корональный выброс массы, ударная волна, солнечный ветер, IMAGE.

Abstract. In this study we present a unique observation of fronts of increased brightness at a wavelength of 304 Å at the background of the Earth, according to data from the IMAGE satellite. We suggested that these fronts are a projection of the shock front of a coronal mass ejection that occurred on the Sun a few days earlier. The fact that the ejection passed is also confirmed by data from the ACE and Wind satellites near L1 point. Analysis of IMAGE satellite data showed that the present case is the only example of such observations at a wavelength of 304 Å from the period 2000–2005 and left the question of the reasons for this unusual phenomenon open.

Keywords: coronal mass ejection, shock front, solar wind, IMAGE

ВВЕДЕНИЕ

Исследования околоземного космического пространства, в частности магнитосферы и плазмосферы, давно представляют большой интерес и для их осуществления были запущены десятки космических аппаратов. Однако практически все они измеряли параметры плазмы и электромагнитного поля *in situ*, что накладывает ограничение на понимание глобальной картины происходящих процессов. Поэтому особое место в истории космических исследований занимает миссия Imager for Magnetopause-to-Aurora Global Exploration (IMAGE) [Burch, 2000], которая, среди прочего, была оборудована камерой для наблюдения за околоземным пространством в крайнем ультрафиолетовом диапазоне.

Инструмент Extreme Ultraviolet Imager (EUV) [Sandel et al., 2000] представлял собой набор из трёх широкоугольных камер, настроенных на резонансную линию He⁺ на длине волны 304 Å. Три поля зрения камер частично пересекаются, формируя постоянную область обзора размером 84°×30°. Каждый пиксель полученного изображения охватывает область размером 0,6°×0,6°. Излучение на длине волны 304 Å из плазмосферы является оптически тонким, поэтому измеренная яркость прямо пропорциональна плотности He⁺ в столбе вдоль луча зрения. Каждое изображение IMAGE/EUV охватывает всю плазмосферу одним кадром. Таким образом, IMAGE/EUV получал изображения пространственного распределения He⁺ в плазмосфере с пространственным разрешением не меньше 0,1 R_E и временным разрешением 10 минут.

Миссия IMAGE работала с марта 2000 г. по декабрь

2005 г. Она сразу приковала к себе внимание исследователей [Sandel et al., 2001], привнесла неоценимый вклад в развитие представлений о структуре и динамике плазмосферы [Goldstein, 2006] и заложила фундамент для будущих исследований с помощью камер в ультрафиолетовом диапазоне [Goldstein et al., 2022]. Кроме изучения плазмосферы, данные IMAGE/EUV использовались для оценки фонового излучения [Goldstein et al., 2017], а в настоящей работе мы представляем уникальное наблюдение, которое, по всей видимости, представляет собой прохождение коронального выброса массы (КВМ) в межпланетном пространстве на фоне Земли.

КОРОНАЛЬНЫЙ ВЫБРОС МАССЫ НА ФОНЕ ЗЕМЛИ: ДАННЫЕ IMAGE/EUV

Анализ данных IMAGE/EUV выявил появление фронтов повышенной яркости, сопоставимой с наблюдавшейся в тот момент плазмосферой, пересекающих всё поле зрения камеры. С 12:21 до 21:12 UT 9 января 2005 г. эти фронты распространялись от Солнца и проходили на фоне Земли, никак не воздействуя на околоземную плазму. На рис. 1 приведены несколько изображений с камеры IMAGE/EUV, на которых отмечены приблизительные границы переднего фронта. Эти фронты, скорее всего, появились из-за попадания в поле зрения IMAGE/EUV облаков плазмы с повышенной концентрацией и не являются инструментальным шумом, поскольку наблюдаются в течение длительного времени последовательно всеми тремя камерами. Данное явление наблюдалось лишь единожды за всё время работы миссии.

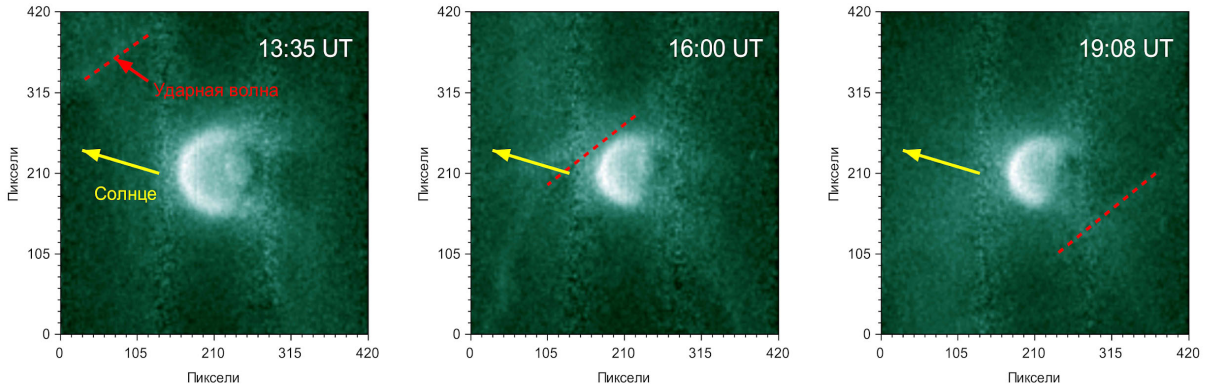


Рис. 1. Изображения камеры IMAGE/EUV в 13:35, 16:00 и 19:08 UT 09.01.2005 г. Оттенками зелёного отображается яркость после коррекции плоского поля и сжатия динамического диапазона. Красной пунктирной линией показано приблизительное расположение ударной волны КВМ. Жёлтая стрелка указывает направление на Солнце в плоскости изображения

Отсутствие взаимодействия наблюдаемых фронтов с околоземной плазмой указывает на большое расстояние между ними, а значит и об огромном пространственном масштабе наблюдаемых явлений, что естественным образом наталкивает на предположение о том, что мы видим ударную волну перед КВМ в межпланетном пространстве.

НАБЛЮДЕНИЯ SOHO, ACE И WIND

Предполагаемым источником облака плазмы, видимого IMAGE/EUV 9 января 2005 г., является КВМ, наблюдавшийся Large Angle and Spectrometric Coronagraph (LASCO) на спутнике Solar and Heliospheric Observatory (SOHO) [Domingo et al., 1995] с 15:30 до 18:30 UT 5 января около восточного лимба Солнца. Его скорость в момент выброса составила около 735 км/с, что означает прибытие плазмы к орбите Земли не раньше 00:10 UT 8 января. Учитывая поле зрения IMAGE/EUV, это единственный КВМ, который мог быть виден в рассматриваемый

промежуток времени.

Наблюдения SOHO/LASCO дополняются *in situ* измерениями параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП) вблизи точки L1 на спутниках Advanced Composition Explorer (ACE) [Stone et al., 1998] и Wind [Wilson et al., 2021] (рис. 2). Оба аппарата зафиксировали приход КВМ 9 января. Одновременно были зарегистрированы два скачка Y- и Z-компонент ММП (рис. 2б) и скорости солнечного ветра (рис. 2г) около 08:00 и 09:30 UT. Отметим, что X-компонента скорости оставалась на уровне -460 ± 10 км/с, (рис. 2в), а другие две компоненты усилились в направлении от КВМ. Признаки КВМ на спутнике Wind появились на ~10 минут раньше, чем на спутнике ACE, что также указывает на расположение фронта ударной волны. Спутник Wind зарегистрировал резкое возрастание концентрации ионов до 20 см^{-3} одновременно со вторым скачком ММП, но по данным ACE в тот же момент имело место лишь небольшое увеличение концентрации (рис. 2д).

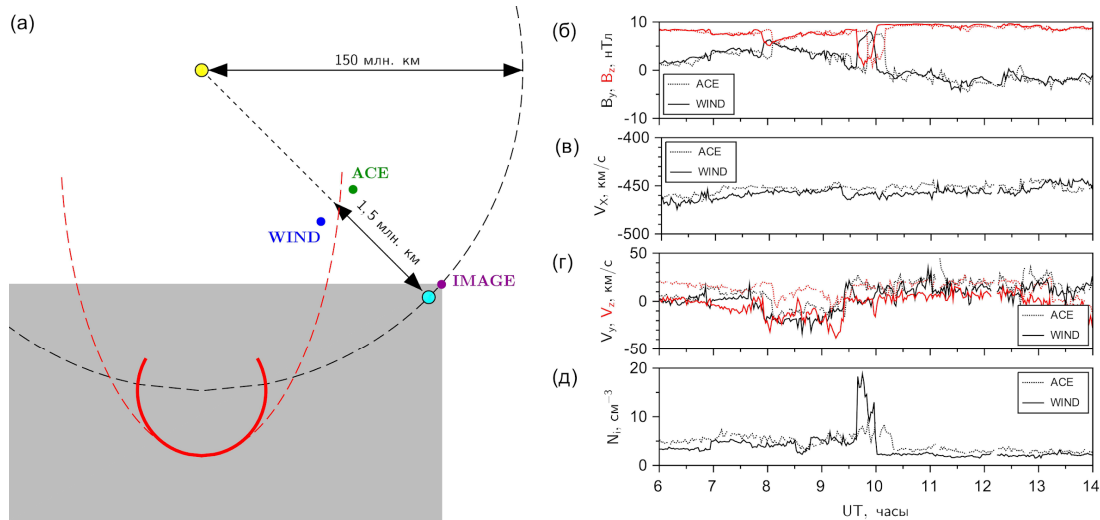


Рис. 2. Схематичное изображение взаимного расположения Солнца (жёлтый круг), Земли (голубой круг), спутников ACE (зелёный круг), Wind (синий круг) и IMAGE (фиолетовый круг), где поле зрения инструмента EUV показано серой областью, и ударной волны КВМ (красные кривые) 09.01.2005 г. (а). Параметры ММП и солнечного ветра по данным спутников ACE (пунктирная линия) и Wind (сплошная линия) в системе координат GSM: Y- (чёрная) и Z-компоненты (красная) ММП (б), X-компонента скорости солнечного ветра (в), Y- (чёрная) и Z-компоненты (красная) скорости (г) и концентрация ионов в солнечном ветре (д)

Оценка времени распространения КВМ до момента его наблюдения по данным ACE и Wind показывает, что он покинул Солнце не раньше 13:30–15:30 UT 5 января, что соответствует данным SOHO/LASCO. Следует отметить, что иных КВМ, которые могли бы вызвать наблюдаемые *in situ* возмущения, не обнаружено, а в процессе распространения КВМ в межпланетном пространстве его скорость быстро уменьшается [Möstl et al., 2014].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования с помощью многоспутниковых *in situ* измерений [Witasse et al., 2017; Möstl et al., 2022] могут быть органично дополнены наблюдениями с помощью камер, которые показывают глобальный контекст явлений [Stenborg et al., 2023]. Архивные данные IMAGE/EUV могут быть использованы для развития существующих представлений о распространении КВМ в межпланетном пространстве с помощью наблюдений в крайнем ультрафиолетовом диапазоне.

На рис. 2а представлено схематичное изображение рассматриваемого в данной работе случая. Мы предполагаем, что 9 января 2005 г. IMAGE/EUV наблюдал прохождение ударной волны КВМ на фоне Земли. Это предположение подтверждается данными по наблюдению короны Солнца от SOHO/LASCO и параметрам солнечного ветра и ММП в окрестности точки L1 от спутников ACE и Wind. Открытым пока остается вопрос о причинах уникальности этого случая.

Авторы благодарят руководителей миссии IMAGE и команду инструмента EUV за данные об излучении на длине волны 304 Å. Выражаем благодарность разработчикам миссии SOHO и инструмента LASCO за изображения короны Солнца. Мы благодарим команды инструментов MFI и SWE спутников ACE и Wind за предоставление данных о ММП и параметрах солнечного ветра, и CDAWeb NASA [<https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>] за открытый доступ к этим данным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Burch J.L. IMAGE mission overview // Space Sci. Rev. 2000. V. 91. P. 1–14. DOI: 10.1023/A:1005245323115.

Domingo V., Fleck B., Poland A.I. The SOHO mission: An overview // Sol. Phys. 1995. V. 162. P. 1–37. DOI: 10.1007/BF00733425.

Goldstein J. Plasmasphere response: Tutorial and review of recent imaging results // Space Sci. Rev. 2006. V. 124. P. 203–216. DOI: 10.1007/s11214-006-9105-y.

Goldstein J., Gell D., Sandel B.R. Empirical determination of extreme ultraviolet imager background // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2017. V. 122. P. 7414–7432. DOI: 10.1002/2017JA024301.

Goldstein J., Gallagher D.L., Sandel B.R. et al. The future of plasmaspheric extreme ultraviolet (EUV) imaging // In: Understanding the space environment through global measurements / Eds.: Colado-Vega Y., Gallagher D., Frey H., Wing S. Elsevier, 2022. P. 231–286. DOI: 10.1016/B978-0-12-820630-0.00010-6.

Möstl C., Amla K., Hall J.R. et al. Connecting speeds, directions and arrival times of 22 Coronal Mass Ejections from the Sun to 1 AU // Astrophys. J. 2014. V. 787. 119. DOI: 10.1088/0004-637X/787/2/119.

Möstl C., Weiss A.J., Reiss M.A. et al. Multipoint Interplanetary Coronal Mass Ejection observed with Solar Orbiter, BepiColombo, Parker Solar Probe, Wind, and STEREO-A // Astrophys. J. Lett. 2022. V. 924. L6. DOI: 10.3847/2041-8213/ac42d0.

Sandel B.R., Broadfoot A.L., Curtis C.C. et al. The Extreme Ultraviolet Imager investigation for the IMAGE mission // Space Sci. Rev. 2000. V. 91. P. 197–242. DOI: 10.1023/A:1005263510820.

Sandel B.R., King R.A., Forrester W.T. et al. Initial results from the IMAGE Extreme Ultraviolet Imager // Geophys. Res. Lett. 2001. V. 28. P. 1439–1442. DOI: 10.1029/2001GL012885.

Stenborg G., Paouris E., Howard R.A. et al. Investigating Coronal Holes and CMEs as sources of brightness depletion detected in PSP/WISPR images // Astrophys. J. 2023. V. 949. 61. DOI: 10.3847/1538-4357/acd2cf.

Stone E.C., Frandsen A.M., Mewaldt R.A. et al. The Advanced Composition Explorer // Space Sci. Rev. 1998. V. 86. P. 1–22. DOI: 10.1023/A:1005082526237.

Wilson III L.B., Brosius A.L., Gopalswamy N. et al. A quarter century of Wind spacecraft discoveries // Rev. Geophys. 2021. V. 59. I. 2. e2020RG000714. DOI: 10.1029/2020RG000714.

Witasse O., Sánchez-Cano B., Mays M.L. et al. Interplanetary coronal mass ejection observed at STEREO-A, Mars, comet 67P/Churyumov-Gerasimenko, Saturn, and New Horizons en route to Pluto: Comparison of its Forbush decreases at 1.4, 3.1, and 9.9 AU // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2017. V. 122. P. 7865–7890. DOI: 10.1002/2017JA023884.

URL: <https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/> (дата обращения 30.05.2024).

КОНСТРУИРОВАНИЕ ФУНКЦИИ НАГРЕВА СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЧИСЛЕННОГО МГД МОДЕЛИРОВАНИЯ В ГРАВИТАЦИОННО-СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ АТМОСФЕРЕ

Д.С. Рящиков^{1,2}, Е.В. Скопцова², Д.И. Завершинский^{1,2}, А.С. Букатина²

¹Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Самара, Россия, ryashchikovd@gmail.com

²Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия

CONSTRUCTION OF THE SOLAR CORONAL HEATING FUNCTION FOR NUMERICAL MHD MODELING IN A GRAVITATIONALLY STRATIFIED ATMOSPHERE

D.S. Riashchikov^{1,2}, E.V. Scopsova², D.I. Zavershinskii^{1,2}, A.S. Bukatina²

¹Samara Branch of P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Samara, Russia, ryashchikovd@gmail.com

²Samara National Research University, Samara, Russia

Аннотация. В работе предложен алгоритм конструирования зависимости функции нагрева от температуры и плотности среды в гравитационно-стратифицированной солнечной атмосфере, обеспечивающей баланс между нагревом и радиационным охлаждением среды. Приведен пример применения алгоритма для заданного высотного профиля температуры в солнечной короне.

Ключевые слова: корональный нагрев, тепловой дисбаланс, солнечная атмосфера.

Abstract. The algorithm for constructing the dependence of the heating function on the temperature and density of the medium in a gravitationally stratified solar atmosphere that provides a balance between heating and radiative cooling of the medium is proposed. An example of application of the algorithm for a given altitudinal temperature profile is provided.

Keywords: coronal heating, thermal misbalance, solar atmosphere.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема нагрева солнечной короны уже на протяжении нескольких десятилетий остается одной из фундаментальных проблем солнечной физики. В литературе описаны два набора гипотез, объясняющие нагрев короны до наблюдаемых температур. Согласно одному из подходов пересоединение магнитных силовых линий приводит к образованию токовых слоев, в которых эффективно работает омический нагрев. Согласно другому подходу МГД волны переносят энергию из нижележащих слоев в корону, в которой диссипируют с выделением энергии.

Наличие различных гипотез коронального нагрева и отсутствие знаний о его локализации, зависимости от времени (постоянный или импульсный нагрев) и параметров плазмы (плотности, температуры, магнитного поля) усложняет аналитическое и численное моделирование магнитогидродинамических процессов в солнечной короне. Так, в некоторых работах либо полностью пренебрегается тепловыми эффектами (нагревом, радиационным охлаждением, теплопроводностью) при моделировании солнечной атмосферы [Kraśkiewicz et al., 2023], либо задаются только радиационные потери и теплопроводность [González-Avilés et al., 2021]. Нагревом, который обеспечивает баланс между притоком энергии и теплопотерями, пренебрегается. В других моделях учитывается либо импульсный нагрев [Falewicz et al., 2015], и тогда встает вопрос о локализации источников тепла, характера зависимости энерговыделения от времени и продолжительности импульса, либо задается нагрев, который обеспечивает постоянный баланс между притоком тепла и теплопотерями [Petralia et al., 2014].

Зачастую это однородный нагрев, который не зависит ни от времени, ни от параметров плазмы.

В то же время явление теплового дисбаланса между нагревом и радиационным охлаждением плазмы важно для описания некоторых физических процессов в солнечной короне. Например, тепловой дисбаланс может объяснить наблюдаемые скорости распространения и времена затухания медленных МГД волн в корональных петлях [Arregui et al., 2023; Zavershinskii et al., 2023]. В этих и многих других работах предполагается, что нагрев является функцией температуры и плотности. Однако эти работы рассматривают лишь однородную среду и не учитывают изменение плотности и температуры с высотой. В то же время для моделирования солнечной атмосферы в целом или отдельных структур как, например, корональных петель, помимо теплового дисбаланса необходимо учесть ещё и гравитационную стратификацию среды. В пренебрежении влияния теплопроводности (что можно сделать при температурных профилях, близких к линейным) это означает, что на различных высотах в стационарном состоянии должен обеспечиваться баланс между нагревом и охлаждением, и таким образом, высотные профили температуры и плотности оказываются связанными с видом функциональной зависимости нагрева и охлаждения от температуры и плотности [Riashchikov et al., 2023].

В данной работе описывается подход к конструированию такой функциональной зависимости коронального нагрева от температуры и плотности плазмы, которая бы обеспечивала баланс между нагревом и охлаждением плазмы на разных высотах в гравитационно-стратифицированной атмосфере при заданной зависимости температуры от высоты.

ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА КОНСТРУИРОВАНИЯ ФУНКЦИИ НАГРЕВА

В данной работе будем считать, что стационарное состояние среды должно удовлетворять следующей системе уравнений:

$$\frac{dP}{dz} + \rho g = 0, \quad (1)$$

$$W(\rho, T) = L(\rho, T) - Q(\rho, T) = 0. \quad (2)$$

Здесь L , Q — мощность охлаждения и нагрева среды, соответственно; W — функция тепловых потерь. В системе (1) — (2) пренебрегается теплопроводностью и влиянием магнитного поля на стационарное состояние, что открывает простор для дальнейшего обобщения предлагаемого подхода.

Предположим, что функцию нагрева $Q(\rho, T)$ в некотором диапазоне температур и плотностей по аналогии с [Kolotkov et al., 2020] можно аппроксимировать степенной зависимостью вида:

$$Q(\rho, T) = Q^* \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^a \left(\frac{T}{T_0}\right)^b. \quad (3)$$

В этом выражении ρ_0, T_0 — некоторые постоянные, а параметры Q^*, a, b будем считать в общем случае переменными величинами, значения которых могут изменяться при различных значениях плотности и температуры, но которые явным образом не зависят от времени и координаты.

Задачей данной работы является конструирование функции нагрева (3) с кусочно-заданными значениями параметров Q^*, a, b , которая бы удовлетворяла решению системы (1)–(2). Конструирование такой функции удобно проводить после логарифмирования выражения (3). Пусть $\tilde{Q} = \ln(Q/Q_0)$, $\tilde{\rho} = \ln(\rho/\rho_0)$, $\tilde{T} = \ln(T/T_0)$, где Q_0 — некоторая постоянная. Тогда $\tilde{Q}(\tilde{\rho}, \tilde{T}) = a\tilde{\rho} + b\tilde{T} + c$, $c = \ln(Q^*/Q_0)$. (4)

Таким образом, задача подбора параметров Q^*, a, b в выражении (3) равносильна задаче подбора параметров a, b, c в выражении (4), однако последний вариант имеет преимущества при программной реализации алгоритма в виду линейности функции $\tilde{Q}(\tilde{\rho}, \tilde{T})$ и упрощения работы со значениями плотности, которые имеют большой разброс в гравитационно стратифицированной атмосфере.

Также покажем, какие дополнительные условия на параметры a, b, c накладывает условие теплового баланса (2) на различных высотах. Предположим, что в некотором диапазоне температур и плотностей параметры a, b, c являются неизменными. Тогда справедливо:

$$\begin{cases} \tilde{Q}(\tilde{\rho}(z), \tilde{T}(z)) = \tilde{L} = a\tilde{\rho} + b\tilde{T} + c, \\ \tilde{Q}(\tilde{\rho}(z+dz), \tilde{T}(z+dz)) = \tilde{L} + d\tilde{L} = \\ a(\tilde{\rho} + d\tilde{\rho}) + b(\tilde{T} + d\tilde{T}) + c, \end{cases} \quad (5)$$

где $\tilde{L} = \ln(L/Q_0)$.

Из системы (5) можно получить выражения для коэффициентов a, b как функции свободного параметра c :

$$\begin{aligned} a(z) &= \frac{\tilde{T}(z) \frac{d\tilde{L}}{dz} - \tilde{L}(z) \frac{d\tilde{T}}{dz} + c \frac{d\tilde{T}}{dz}}{\tilde{T}(z) \frac{d\tilde{\rho}}{dz} - \tilde{\rho}(z) \frac{d\tilde{T}}{dz}}, \\ b(z) &= \frac{\tilde{\rho}(z) \frac{d\tilde{L}}{dz} - \tilde{L}(z) \frac{d\tilde{\rho}}{dz} + c \frac{d\tilde{\rho}}{dz}}{\tilde{\rho}(z) \frac{d\tilde{T}}{dz} - \tilde{T}(z) \frac{d\tilde{\rho}}{dz}}. \end{aligned} \quad (6)$$

Далее приведём предлагаемый алгоритм конструирования функции нагрева, используя в качестве примера высотный профиль температуры для спокойной атмосферы, приведенный на рис. 6 в [Pascoe et al., 2019], оставляя лишь диапазон температур, соответствующий корональным условиям.

1. Зададим константы для обезразмеривания $Q_0 = 10^{10}$ эрг/(г · с), $T_0 = 10^6$ К, $\rho_0 = 10^{-15}$ г/см³.

2. Пользуясь заданной (например, в [Pascoe et al., 2019]) зависимостью $\tilde{T}(z)$, найдем с помощью (1) функцию $\tilde{\rho}(z)$. В данной работе использовалось уравнение состояния идеального газа с молярной массой $\mu = 0,61$ г/моль.

3. Варьируя параметр c , рассчитаем с помощью (6) возможные зависимости $a(z)$, $b(z)$. Выбор конкретного значения c может обуславливаться соображениями устойчивости атмосферы (например, тепловые неустойчивости изохорического типа отсутствуют при $(\partial W/\partial T) > 0$), обеспечения однозначных значений степеней a, b , определенных значений времен теплового дисбаланса и т.д. В данной работе в качестве примера использовалось значение $c = 2$. Пример расчета зависимостей $a(z)$ и $b(z)$ приведен на рис. 1(а).

4. Разобьем весь диапазон рассматриваемых значений $\tilde{\rho}, \tilde{T}$ на «ячейки» с шагом $\Delta\tilde{\rho}, \Delta\tilde{T}$, в которых будем считать параметры a, b постоянными. Значения a, b в ячейках, через которые проходит параметрически заданная кривая $(\tilde{\rho}(z), \tilde{T}(z))$, задаются с помощью п. 3. Значения параметров a, b в остальных ячейках можно задавать в зависимости от задачи конкретного исследования. В данной работе для примера и обеспечения гладкости функции нагрева «пустые» ячейки, граничащие с двумя «заполненными», получали из последних среднее значение параметров a, b . Процесс повторялся итерационно.

5. Зная a, b, c в каждой ячейке, с помощью (4) можно рассчитать в центре каждой из них значение функции нагрева \tilde{Q} . Мощность нагрева \tilde{Q} при произвольных значениях плотности и температуры можно получить с помощью интерполяции.

На рис. 1(б) приведен пример функции тепловых потерь $W(\rho, T)$, которая равна разности радиационных потерь, рассчитанных с помощью атомной базы данных CHIANTI, и функции нагрева, полученной с помощью приведенного алгоритма. Кривой на графике обозначены нули функции тепловых потерь, т.е. параметры, реализующиеся в невозмущенной атмосфере.

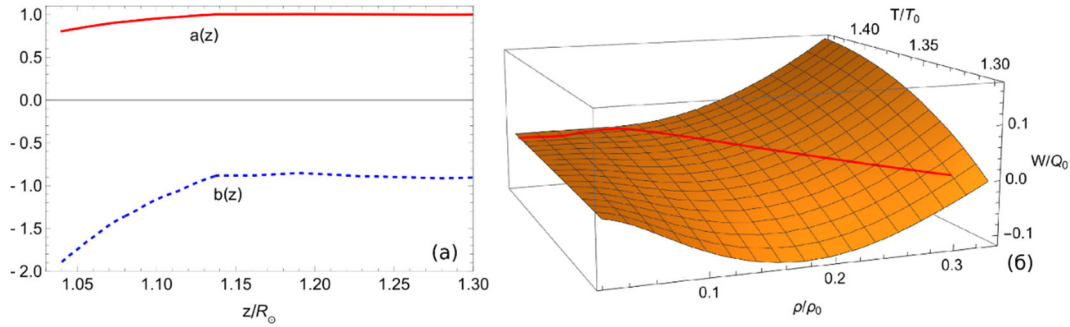


Рис. 1. (а) Зависимость параметров a и b от высоты; (б) Пример расчета функции тепловых потерь

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приведен алгоритм конструирования функции нагрева от температуры и плотности в гравитационно стратифицированной солнечной атмосфере, обеспечивающей баланс между нагревом и радиационным охлаждением среды. Результаты могут найти применение для моделирования распространения МГД возмущений в спокойных областях солнечной короны, так и корональных петлях при совместном учете гравитационных эффектов и теплового дисбаланса.

Работа частично поддержана в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проекты FSSS-2023-0009, FMR-2024-0017).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Arregui I., Kolotkov D.Y., Nakariakov V.M. Bayesian evidence for two slow-wave damping models in hot coronal loops // *A&A*. 2023. V. 677. P. A23.
 Del Zanna G., Dere K.P., Young P.R., Landi E. CHIANTI – an atomic database for emission lines. XVI. Version 10, further extensions // *ApJ*. 2021. V. 909, N 1. P. 38.

Falewicz R., Rudawy P., Murawski K., Srivastava A.K. 2D MHD and 1D HD Models of a Solar Flare – a Comprehensive Comparison of the Results // *ApJ*. 2015. V. 813, N 1. P. 70.
 González-Avilés J.J., Murawski K., Srivastava A.K. et al. Numerical simulations of macrospicule jets under energy imbalance conditions in the solar atmosphere // *MNRAS*. 2021. V. 505, N 1. P. 50 – 64.
 Kolotkov D.Y., Duckenfield T.J., Nakariakov V.M. Seismological constraints on the solar coronal heating function // *A&A*. 2020. V. 644. P. A33.
 Kraškievicz J., Murawski K., Musielak Z.E. Numerical simulations of two-fluid magnetoacoustic waves in the solar atmosphere // *MNRAS*. 2023. V. 518, N 4. P. 4991 – 5000.
 Pascoe D.J., Smyrli A., Van Doorselaere T. Coronal density and temperature profiles calculated by forward modeling EUV emission observed by SDO/AIA // *ApJ*. 2019. V. 884, N 1. P. 43.
 Petralia A., Reale F., Orlando S., Klimchuk, J.A. MHD modelling of coronal loops: injection of high-speed chromospheric flows // *A&A*. 2014. V. 567. P. A70.
 Riashchikov D.S., Molevich N.E., Zavershinskii D.I. Impact of thermal misbalance on acoustic-gravity waves in the solar atmosphere // *MNRAS*. 2023. V. 522, N 1. P. 572 – 581.
 Zavershinskii D.I., Molevich N.E., Riashchikov D.S., Belov S.A. Exact solution to the problem of slow oscillations in coronal loops and its diagnostic applications // *Frontiers in Astron. & Space Sci*. 2023. V. 10. P. 1167781.

ИССЛЕДОВАНИЕ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК МЕТОДАМИ МИКРОВОЛНОВОЙ ДИАГНОСТИКИ

Д.А. Смирнов^{1,2}, В.Ф. Мельников^{1,2}

¹Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия,
astronom.v.cube@gmail.com

²Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
Нижегород, Россия

STUDYING SOLAR FLARES BY MICROWAVE DIAGNOSTICS METHODS

D.A. Smirnov^{1,2}, V.F. Melnikov^{1,2}

¹Pulkovo Observatory of Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia,
astronom.v.cube@gmail.com

²National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia

Аннотация. В данной работе проведена радиодиагностика солнечных вспышек 20 января 2022 г. и 16 июля 2023 г., зарегистрированных Сибирским радиогелиографом в диапазонах 3–6 ГГц и 6–12 ГГц, по данным частотного спектра излучения в максимуме яркости радиоисточников. Установлено, что на фазе роста основных пиков излучения магнитное поле уменьшается, а на фазе спада – увеличивается.

Ключевые слова: солнечные вспышки, радиогелиограф, радиодиагностика.

Abstract. In this study, the radio diagnostics of solar flares recorded by the Siberian Radio Heliograph on January 20, 2022 and July 16, 2023 in the frequency ranges of 3–6 GHz and 6–12 GHz was conducted. The frequency spectrum of the radiation at the maximum brightness of the radio sources was analyzed. It was found that the magnetic field decreased during the rise phase of the main radiation peaks and increased during the decay phase.

Keywords: solar flares, radioheliograph, radio diagnostics

ВВЕДЕНИЕ

Развитие методов радиодиагностики солнечных вспышек является актуальной темой, так как они позволяют получать уникальную информацию о корональном магнитном поле и электронах умеренно релятивистских энергий. Исследование динамики магнитного поля в корональных радиоисточниках важно для понимания процессов диссипации энергии и ускорения частиц во время вспышек.

ОТБОР СОБЫТИЙ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ДИАГНОСТИКИ

Для радиодиагностики были выбраны два события солнечных вспышек, зафиксированных на Сибирском радиогелиографе (СРГ), с учетом следующих критериев: наличие одного или нескольких четко выраженных максимумов на временном профиле интегральной плотности потока излучения, четко различимые фазы роста и спада, достаточная длительность всплеска для анализа динамики параметров, и приемлемое качество радиокарт, синтезируемых на основе данных СРГ.

Вспышка 20 января 2022 г. в активной области NOAA №12929 имела GOES класс M5.5 и наблюдалась в диапазоне частот 6–12 ГГц. Радиовсплеск, продолжавшийся около 15 мин, включал по крайней мере три наложенных друг на друга пика излучения. Для радиодиагностики были выбраны 8 моментов времени: 4 для максимумов всплеска, 2 для фаз роста и 2 для фаз спада плотности потока излучения.

Вспышка 16 июля 2023 г. в активной области NOAA №13372 имела GOES класс M1.1 и наблюдалась в диапазоне частот 3–12 ГГц. Этот радиовсплеск длился около 2.5 мин и также включал несколько пиков излучения длительностью 30–50 сек каждый. Для

радиодиагностики были выбраны 10 моментов времени: 3 для максимумов всплеска, 4 для фаз роста и 3 для фаз спада.

МЕТОД ПРОВЕДЕНИЯ РАДИОДИАГНОСТИКИ

Разработанный алгоритм проведения радиодиагностики заключается в подгонке теоретических значений интенсивностей гиротронного излучения, рассчитываемых с помощью FastGS Codes [Fleishman, Kuznetsov, 2010], к наблюдаемым значениям.

Математически задачу подбора параметров для фитирования можно описать как минимизацию функционала, записываемого следующим образом:

$$K = \sum_{i=1}^n \left| \frac{(I_L^i(x_1, x_2, \dots, x_n) + I_R^i(x_1, x_2, \dots, x_n) * 1j) - (I_{L_{obs}}^i + I_{R_{obs}}^i * 1j)}{1j} \right|,$$

где I_L и I_R – интенсивность левополяризованного и правополяризованного теоретически рассчитываемого излучения, $I_{L_{obs}}$ и $I_{R_{obs}}$ – интенсивность левополяризованного и правополяризованного наблюдаемого в источнике излучения, x_1, x_2, \dots, x_n – значения параметров среды внутри радиоисточника.

Так как подобный функционал имеет из-за его сложной формы в многомерном пространстве параметров невозможно минимизировать стандартными подходами, нами использовалась [Смирнов и др., 2022] концепция генетического алгоритма минимизации, предложенная в работе [Morgachev et al., 2014].

При этом значение функционала при минимизации может перестанет снижаться, что может быть связано как с нахождением истинного решения и наименьшего значения расчетной функции, так и с нахождением максимально правильного решения в

рамках существующих погрешностей измерений наблюдаемого частотного спектра радиоизлучения.

ПОДГОТОВКА ДАННЫХ И ПОЛУЧЕНИЕ СПЕКТРОВ

Был проведен синтез радиоизображений на каждой частоте с использованием ПО, разработанного в ИСЗФ СО РАН, включая выравнивание изображений в R и L поляризациях путем минимизации линейных наклонов фаз антенн и ручной подгонки. Затем проведена калибровка яркостной температуры всего изображения Солнца, основанная на наиболее часто встречаемом значении в спокойных областях и сопоставлении с эталонными значениями [Zirin et al., 1991]. Далее изображения на разных частотах выравнивались относительно стабильного локального радиоисточника, такого как компактный гирорезонансный микроволновый источник над солнечным пятном, чтобы обеспечить точность восстановления параметров вспышечной плазмы и энергичных электронов для одной и той же области.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕНИЯ РАДИОДИАГНОСТИКИ

С достаточной точностью были восстановлены параметры: напряженность магнитного поля B , угол между направлением магнитного поля и луча зрения θ , показатель энергетического спектра δ_1 в одно-степенных распределениях электронов $N(E) = AE^{-\delta_1}$.

Значения восстановленных параметров приведены в табл. 1. Для вспышки 20.01.2022 г. параметры θ и δ_1 сильно варьируются со временем, магнитное поле достигает значений $B \sim 1000$ Гс. Для вспышки 16.07.2023 г. максимальная величина магнитного поля меньше на порядок, а сильных изменений параметров θ и δ_1 зафиксировано не было.

Таблица 1.

Восстановленные параметры для вспышек 20.01.2022 г. и 16.07.2023 г.

Вспышка 20.01.2022 г.			
Время, UTC	B , Гаусс	θ , град	δ_1
05:55:30	994	92	22.1
05:56:30	361	105	10.2
05:57:30	468	124	9.9
05:58:00	581	119	8.8
05:58:45	282	113	8.5
05:59:45	438	116	9.7
06:00:45	614	130	10.1
06:02:00	1017	174	10.8

Вспышка 16.07.2023 г.			
Время, UTC	B , Гаусс	θ , град	δ_1
08:23:51	84	135	4.97
08:24:00	79	143	4.78
08:24:08	78	132	4.97
08:24:13	84	137	3.95
08:24:20	78	139	4.26
08:24:39	51	137	3.99
08:24:46	70	136	4.28
08:25:41	83	126	4.60
08:25:45	104	130	4.30
08:26:00	147	130	3.98

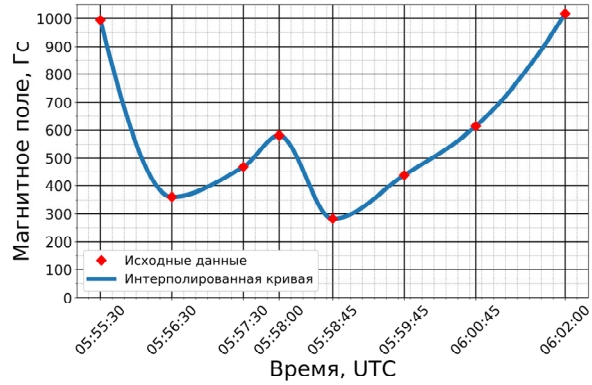


Рис. 1. График изменения величины магнитного поля в ходе вспышки 20 января 2022 г.

Из табл. 1 и рис. 1 можно видеть, что в первые минуты вспышки 20 января 2022 г. наблюдается снижение магнитного поля с ~ 990 Гс до ~ 360 Гс. Затем, после прохождения первого пика (05:56:30 UTC), поле начинает расти. В минимуме между 2-м и 3-м пиком (05:58:00 UTC) поле достигает локального максимума 580 Гс и начинает уменьшаться. В максимуме всплеска (третий пик, момент 05:58:45 UTC) поле принимает наименьшее значение ($B = 282$ Гс) и после его прохождения опять начинает увеличиваться в течение 3 минут, достигая в конце значения $B \sim 1020$ Гс.

Из табл. 1 и рис. 2 видно, что для вспышки 16 июля 2023 года у первого пика ($t_{max} = 08:24:08$ UTC) на фазе роста поле слегка уменьшается (с 84 Гс до 78 Гс), а на фазе спада увеличивается. Наиболее заметно это уменьшение поля на фазе роста проявилось для второго пика ($t_{max} = 08:24:39 - 08:24:46$ UTC): поле сначала уменьшается с 84 Гс до 51 Гс, а затем увеличивается до 83 Гс. На фазе спада третьего пика ($t_{max} = 08:25:41$ UTC) поле быстро увеличивается до 147 Гс. После главного пика вспышки, поле выросло в 3 раза.

Таким образом, наблюдается следующая закономерность. В каждом пике всплеска поле уменьшается, а на фазе спада интенсивности пика, поле увеличивается, причем скорость этих изменений варьируется от единиц Гс/с до десяти Гс/с.

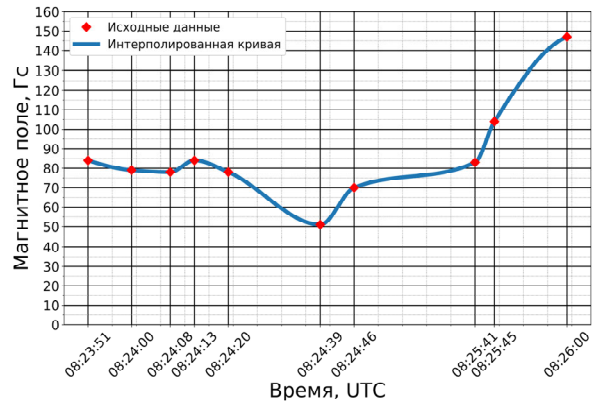


Рис. 2. График изменения величины магнитного поля в ходе вспышки 16 июля 2023 г.

Можно предложить, по крайней мере, две причины обнаруженных изменений поля: 1) реальные изменения поля в некотором локальном фиксированном объеме области вспышки; 2) перераспределение концентрации излучающих электронов из области вблизи оснований петли в ее вершину, где магнитное поле меньше, а затем возвращение в основания.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 22-12-00308.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Смирнов Д.А., Моргачев А.С., Мельников В.Ф. Развитие метода автоматизированной радиодиагностики

динамики магнитного поля во вспышечных петлях Солнца для применения к многочастотным наблюдениям // Труды XXVI научной конференции по радиофизике, посвященной 120-летию М.Т. Греховой (Нижний Новгород, 12 - 27 мая 2022 г. ННГУ им. Н.И. Лобачевского). СС.183-186, 2022 г.

Morgachev A.S., Kuznetsov S.A., Melnikov V.F. Radio Diagnostics of the Solar Flaring Loop Parameters by Direct Fitting Method // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2014. V. 54, N. 7. P. 933–942.

Zirin H., Baumert B.M., Hurford G.J. The Microwave Brightness Temperature Spectrum of the Quiet Sun // *The Astrophysical Journal*. 1991. V. 370. P. 779–783. DOI: 10.1086/169861

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ КАНАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ФКМ СИГНАЛА ДЛЯ ИОНОСФЕРНЫХ КВ РАДИОЛИНИЙ

Н.В. Рябова, А.А. Елсуков, С.С. Станкевич

Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола, Россия,
StankevichSS@volgatech.net

INFLUENCE OF CHANNEL MODEL PARAMETERS ON THE CHARACTERISTICS OF THE PCM SIGNAL FOR IONOSPHERIC HF RADIO LINKS

N.V. Ryabova, A.A. Elsukov, S.S. Stankevich

Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia, StankevichSS@volgatech.net

Аннотация. Разработан и программно-аппаратно реализован алгоритм оценки влияния параметров канальной модели на характеристики сложного сигнала с фазо-кодовой манипуляцией для ионосферных КВ радиолоний. Имитация радиоканала осуществлялась с использованием модели Ватерсона на устройстве имитатора ВИРД.464971.001 РЭ. Для синтеза излучаемого сигнала и обработки принятого сигнала созданы алгоритмы, реализованные в программной среде GNU Radio. Получены оценки искажений характеристик сложного сигнала на примере ФКМ в зависимости от параметров канальной модели Ватерсона.

Ключевые слова: КВ радиоканал, модель Ватерсона, фазо-кодо манипулированный сигнал, код Баркера, корреляционная функция.

Abstract. An algorithm for estimating the influence of channel model parameters on the characteristics of a complex signal with phase-code manipulation for ionospheric SW radio lines was developed and implemented in hardware and software. The simulation of the radio channel was carried out using the Watterson model on the device of the VIRД.464971.001 RE simulator. Algorithms implemented in the GNU Radio software environment have been created to synthesize the emitted signal and process the received signal. Estimates of distortions of the characteristics of a complex signal are obtained using the example of phase CM depending on the parameters of the Watterson channel model.

Keywords: SW radio channel, Watterson model, phase-code-manipulated pulse, Barker code, similar function

ВВЕДЕНИЕ

Распространение коротких радиоволн (КВ) характеризуется набором связанных между собой явлений, обусловленных высокой изменчивостью среды распространения — ионосферой. Эта изменчивость должна учитываться разработчиками эффективных высокоскоростных цифровых систем КВ связи [Иванов и др., 2017]. Способность качественной оценки инженерных решений создаваемых радиосредств в реальных каналах связи на этапе проектирования является необходимым для сокращения цикла разработки [Ivanov et al, 2016]. Факторы, влияющие на распространение сигналов в КВ радиоканалах могут быть описаны с помощью различных моделей, одной из которых является модель Ватерсона. По сравнению с другими, она достаточно проста и широко используется в имитаторах. Для проведения имитационного моделирования необходимо создать искусственную тестовую среду распространения КВ радиоволн в ионосфере, которая может воспроизводить реальные условия. Ключевым этапом разработки эффективных сигнально-кодовых конструкций и протоколов для высокоскоростных цифровых систем связи КВ диапазона является определение степени влияния ионосферы на характеристики радиоканала.

Цель: разработка, программно-аппаратная реализация и верификация алгоритма оценки влияния параметров канальной модели на характеристики сложного сигнала на примере ФКМ для КВ радиолоний.

Алгоритм оценки влияния параметров канальной модели Ватерсона на характеристики сложного сигнала для КВ радиолоний состоит из 3-х основных этапов.

На 1-м этапе производится синтез сложного входного сигнала на примере фазо-кодо-

манипулированного (ФКМ) сигнала. ФКМ сигнал представляет собой импульс, манипулируемый кодом Баркера длиной 13. Для 2-х позиционной фазовой манипуляции 0 и 180 градусов амплитуда модулирующего сигнала принимает значения +1 и -1. Импульсы длительностью 541,7 мкс, состоящие из 13 чипов (битов), длительностью 41,7 мкс периодически повторяются через 5,3 мс. Синтезированный ФКМ сигнал записывается в файл в формате .wav.

На 2-м этапе алгоритма производится имитация прохождения сигнала через КВ канал по модели Ватерсона.

На 3-м этапе сигнал с выхода имитатора подается на вход приемника. В приемнике происходит сжатие ФКМ импульса при вычислении корреляции принятого сигнала с известным передаваемым импульсом. В цифровом виде процесс корреляции может быть выполнен с использованием БПФ. Данная операция является быстрой сверточной обработкой (FCP — Fast Convolution Processing). Выходной сигнал согласованного фильтра может быть математически описан сверткой между его входным сигналом и импульсной характеристикой $y(t) = s(t) \cdot h(t)$, где $s(t)$ — входной сигнал, $h(t)$ — импульсный отклик согласованного фильтра. Из свойств преобразования Фурье $FFT\{s(t) \cdot h(t)\} = S(f) \cdot H(f)$. Тогда сжатый дискретный сигнал можно вычислить $y = IFFT\{S \cdot H\}$, где $IFFT$ — обратное БПФ.

1. Синтез сложного ФКМ сигнала в программной среде GNU Radio. Для реализации 1-го этапа алгоритма моделирования в программной среде GNU Radio был синтезирован и сохранен в

формате .wav файл ФКМ импульса, который затем использовался как входной сигнал имитатора КВ радиоканала. Исходные данные: последовательность Баркера длиной 13 чипов, длительность чипа 83,3 мкс, период 10,6 мс. Параметры .wav файла: частота дискретизации 48 кГц, разрядность 16 бит, моно. На рис. 1 представлена схема синтеза ФКМ импульса, созданная в программной среде GNU Radio.

2. Моделирование влияния канальных параметров на сложный ФКМ сигнал на базе имитатора, реализованного по модели Ватерсона. Имитация радиоканала осуществлялась согласно модели Ватерсона с использованием устройства имитатора ВИРД.464971.001 РЭ. Синтезированный ФКМ сигнал в виде .wav файла подавался на вход имитатора КВ сигналов. В данном исследовании модель Ватерсона была реализована для различных условий прохождения сигналов, причем параметры каналов задавались в соответствие с их классификацией CCIR Recommendation 520-2 [CCIR Recommendation 520-2] (табл.1). В имитаторе Ватерсона существует возможность задания следующих параметров каналов: число лучей (от 1 до 4); уровни лучей (амплитуды) (от 0 до 10); относительные задержки лучей (от 0 до 15 мс); фазовый сдвиг первого луча (от -5 до 5 рад); доплеровское смещение частоты сигнала каждого луча (от -2500 до 2500 Гц); доплеровское рассеяние частоты сигнала каждого луча (от 0 до 30 Гц); коэффициенты отношения зеркальных составляющих лучей к рассеянным (от 0 до 10); коэффициенты асимметрии лучей (от 0 до 10). Были исследованы искажения сложного ФКМ сигнала при трех разных состояниях канала: «хорошем», «удовлетворительном» и плохом, их параметры приведены в таблице 1.

На рис. 2 представлена визуализация с устройства имитатора каналов: осциллограммы входного сигнала, спектра входного сигнала, осциллограммы выходного сигнала, спектра выходного сигнала и АЧХ канала, импульсной характеристики канала.

Сигнал после имитатора, записывался в .wav-файл с такими же параметрами для последующего

анализа в программе GNU Radio, реализующей алгоритм сжатия сложного ФКМ сигнала.

3. Алгоритм и его реализация в программной среде GNU Radio сжатия искаженного сложного ФКМ сигнала. Разработан алгоритм и реализующая его схема в программной среде GNU Radio сжатия прошедшего КВ радиоканал сложного ФКМ сигнала (рис.3).

Влияние канальных искажений на импульсы кода определяется на основе его функции автокорреляции, поскольку в отсутствие шума выходной сигнал согласованного фильтра пропорционален автокорреляции кода [Иванов и др.,2013]. Учитывая функцию автокорреляции определенного кода, ширина главного лепестка (ширина сжатого импульса) и уровни боковых лепестков являются двумя факторами, которые необходимо учитывать для оценки характеристик сжатия импульсов кода. В случае двоичных фазовых кодов относительно длинный импульс шириной t' делится на N меньших чипов; каждый имеет ширину $\Delta t = t'/N$ [Mark Richards, 2005].

4. Верификация разработанного алгоритма и оценка влияния параметров канальной модели на искажение характеристик сложного ФКМ сигнала. Получены графики исходного импульса и корреляционных функций на выходе системы сжатия в приемнике при различных условиях прохождения сигнала в каналах имитатора. Исходный импульс и его корреляционная функция показывают идеальный канал без искажений. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что в зависимости от состояния радиоканала, которое задается его параметрами, происходит искажение принятого сигнала. В результате чего изменяется его корреляционная функция по сравнению с исходной. В «хорошем» канале многолучевость практически не проявляется и рассеяние по задержке минимально. В удовлетворительном и плохом канале наблюдается 2-х лучевое распространение сигнала. Отношение главного лепестка корреляционной функции к боковым у исходного сигнала равно 13,

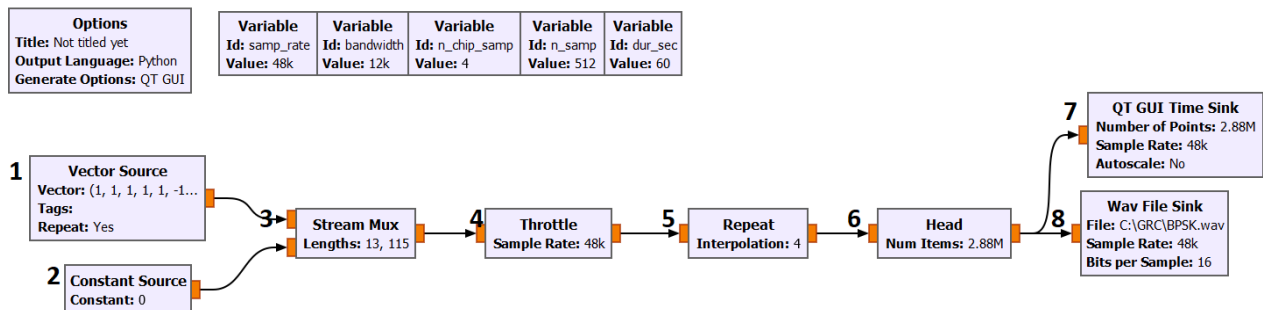


Рис. 1. Алгоритм и реализующая его схема синтеза ФКМ сигнала в программной среде GNU Radio

Таблица 1.

Задание параметров КВ каналов в имитаторе в соответствии с CCIR Recommendation 520-2

Настройки канала	хороший канал		удовлетворительный канал		плохой канал	
	1-й луч	2-й луч	1-й луч	2-й луч	1-й луч	2-й луч
Уровень	1	1	1	1	1	1
Допл.рассеяние, Гц	0,1	0,1	0,5	0,5	0,5	0,5
Фаз.сдвиг, рад	0	задержка 0,5 мс	0	задержка 1 мс	0	задержка 1 мс
Зеркал./рассеян.	0	0	0	0	0	0
Кэф.ассим.	1	1	1	1	1	1

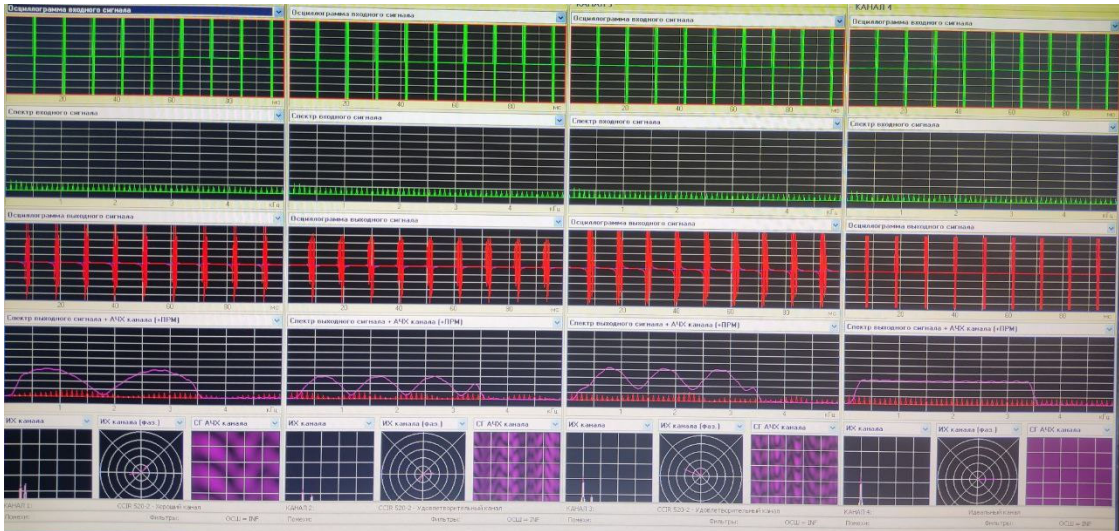


Рис. 2. Осциллограммы устройства имитатора КВ каналов для 4-х каналов

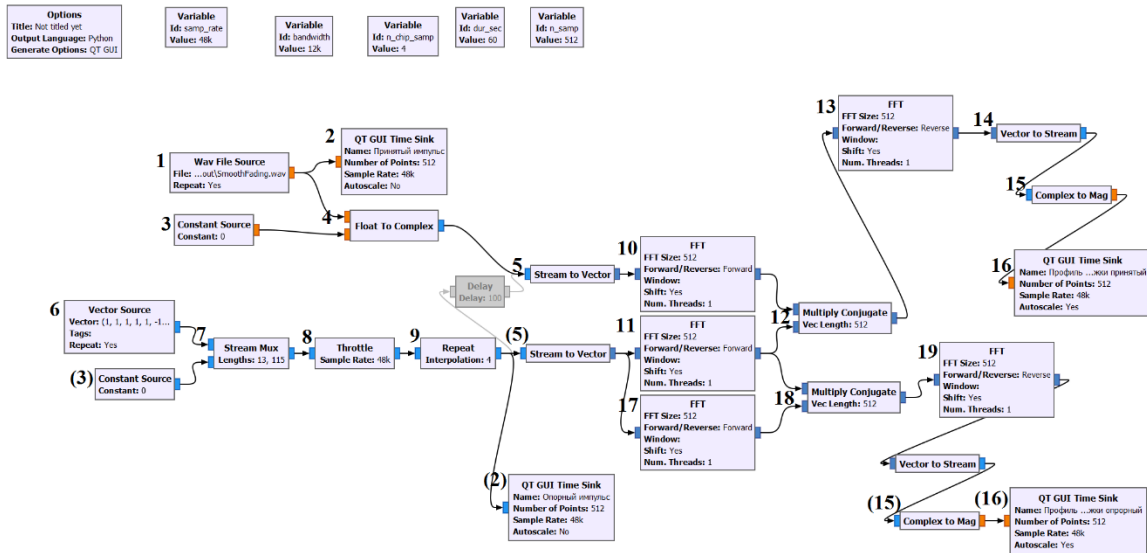


Рис. 3. Схема в программной среде GNU Radio сжатия прошедшего КВ радиоканала ФКМ сигнала

что соответствует длине кода Баркера. У хорошего канала отношение главного лепестка корреляционной функции к боковым ~ 8 ; у удовлетворительного ~ 7 ; у плохого $\sim 5,1$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан и программно-аппаратно реализован алгоритм оценки влияния параметров канальной

модели на характеристики сложного сигнала для ионосферных КВ радиолоний. Имитация радиоканала выполнена с использованием модели Ватерсона на устройстве имитатора ВИРД.464971.001 РЭ. Для синтеза излучаемого сложного сигнала и обработки принятого сигнала разработаны алгоритмы, реализованные в программной среде GNU Radio. Получены оценки искажений характеристик сложного сигнала

на примере ФКМ в зависимости от параметров канальной модели Ватерсона.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда, проект № 23-19-00145.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Иванов Д.В., Иванов В.А., Елсуков А.А. и др. ФКМ ионозонд, созданный по технологии SDR с применением универсальной аппаратной платформы. // Радиолокация, навигация, связь: XXIII Международная научно-техническая конференция, Т. 2., Воронеж, 18–20 апреля 2017 г., Воронеж, 2017. С. 567–574.

Иванов Д.В., Иванов В.А., Рябова Н.В. и др. SDR-ионозонд с непрерывным ЛЧМ-сигналом на платформе USRP // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2013. № 3. С. 80–94.

Ivanov D.V., Ivanov V.A., Ryabova N.V., Elsukov A.A. Software-defined radio technology in the problem concerning with the successive sounding of HF ionospheric communication channels // Journal of Communications Technology and Electronics. 2016. V. 61, № 7. P. 767–775.

Mark Richards, Fundamentals of Radar Signal Processing, McGraw Hill, 2005. 528 p.

CCIR Recommendation 520-2. Use of High Frequency Ionospheric Channel Simulators.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ ФАКЕЛЬНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ НА СОЛНЦЕ

П.В. Стрекалова¹, В.В. Смирнова², Ю.А. Наговицын¹

¹Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия,
auriga-lynx@yandex.ru

²Крымская астрофизическая обсерватория РАН, пгт. Научный

STUDY OF THE STRUCTURE AND PARAMETERS OF FACULAR FORMATIONS ON THE SUN

P.V. Strekalova¹, V.V. Smirnova², Yu.A. Nagovitsyn¹

¹Central (Pulkovo) Astronomical Observatory RAS, Saint-Petersburg, Russia,
auriga-lynx@yandex.ru

²Crimean Astrophysical Observatory RAS, Nauchny, Russia

Аннотация. По данным SDO/AIA о распределении интенсивности в ультрафиолетовых линиях, а также данным в миллиметровом диапазоне радиointерферометра ALMA проведено исследование структуры, локализации и параметров плазмы мелкомасштабных магнитных образований (факельных образований) на разных высотах солнечной атмосферы. Получены значения яркостной температуры выбранных факельных образований на частотах 96 и 233 ГГц по данным ALMA.

Ключевые слова: спокойное Солнце, магнитное поле, радиоизлучение

Abstract. Using SDO/AIA data on the intensity distribution in ultraviolet lines, as well as data in the millimeter range of the ALMA radio interferometer, a study of the structure, localization and parameters of the plasma of small-scale magnetic formations (facular formations) at different heights of the solar atmosphere was carried out. The dependence of the temperature of flare formations on the height above the photosphere was obtained based on the observed and calculated millimeter radio emission.

Keywords: quiet Sun; magnetic field; radio emission

ВВЕДЕНИЕ

Объектами нашего исследования являются уединённые мелкомасштабные магнитные образования, принадлежащие к областям спокойного Солнца — факельные образования (ФО). Мы предпочитаем использовать данный термин, поскольку в научной литературе для таких объектов нет единого названия [Tarbell et al., 1990; Javaherian et al., 2017 и др.]. В более ранних работах нами было получено, что характерный размер ФО варьируется от 1.5 до 4 Мм, абсолютные значения максимальной напряжённости магнитного поля составляют 400–1100 Гс, а полное время жизни составляет десятки часов [Strekalova, 2016]. Кроме того, в сигналах магнитограмм нами были обнаружены долгопериодические колебания с периодами от 25 до 280 минут [Strekalova, 2016, 2018]. Также ФО имеют свои наблюдательные проявления в ультрафиолетовых линиях, излучение которых приходит из фотосферы и нижней хромосферы.

На данный момент вопрос о модели ФО остаётся открытым. Существующие модели, такие как модель «горячей стенки» [Sptuit et al., 1976] или модель «холмов и облаков» [Shatten et al., 1986], критикуются, как не соответствующие наблюдательным проявлениям [Kostik, Khomenko, 2016]. Однако, существует также модель, основанная на аналогии с моделью мелкого пятна [Solov'ev., Kirichek, 2019]. Она достаточно хорошо соответствует данным о магнитном поле и интенсивности в континууме для ФО, однако для её проверки и уточнения необходимо лучше изучить проявление ФО в различных диапазонах длин волн, которые дали бы возможность определить некоторые параметры плазмы.

ВЫБОР И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

При выборе объектов мы отталкивались от данных о магнитном поле, полученных SDO/HMI в линии железа 6173 Å. Дополнительно мы рассматривали данные с SDO/AIA на 1600 Å, 304 Å и 171 Å. Для получения значений яркостной температуры на уровне хромосферы нами были использованы данные в радиодиапазоне с радиointерферометра ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) [Wedemeyer et al., 2016] в полосах пропускания 96 ГГц и 233 ГГц (3 мм и 1,2 мм соответственно) за 12.20.2018 г. из проекта 2018.1.01763.S. Средняя высота формирования излучения на длине волны 1,2 мм составляет 0,9 Мм (со стандартным отклонением 0,7 Мм), тогда как наблюдения на длине волны 3 мм формируются на значительно большей высоте и часто наблюдается на уровне спикул II типа. В результате средняя высота формирования на длине волны 3 мм составляет 1,8 Мм (стандартное отклонение 1 Мм). Средняя разница высот на этих длинах волн составляет 0,92 (±0,85 Мм) [Martínez-Sykora et al., 2020].

На рис. 1 представлено факельное образование, имеющее положительную и отрицательную компоненту в непосредственной близости друг от друга. Экстремальное значение магнитного поля положительной компоненты составило 405 Гс, а отрицательной -188 Гс. ФО проявляет себя на всех картах распределения интенсивности УФ-диапазона. В линии 1600 Å, соответствующей нижней фотосфере и переходной области, наблюдается яркий источник, по форме и положению совпадающий с представленным на магнитограмме. Начиная с линии 304 Å, принадлежащей переходной области и хромосфере,

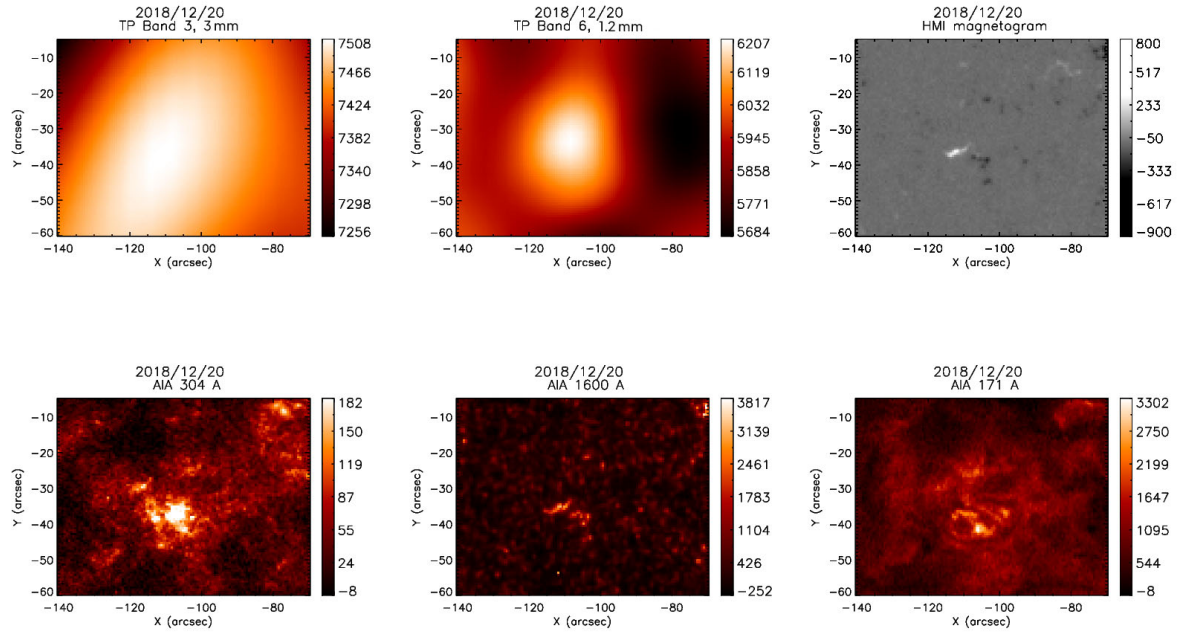


Рис. 1. Пример проявления факельного образования в разных диапазонах длин волн

становится заметна яркая область, связанная с магнитной конфигурацией (петлей), замыкающейся на противоположную полярность. В корональной линии 171 Å видны более высокие петли. В радиодиапазоне на длине волны 1,2 мм наблюдается хорошо локализованный источник, с максимальным значением яркостной температуры 6207 К. На 3 мм яркостная температура видимого источника достигает 7508 К, однако структура сильно размыта из-за низкого пространственного разрешения в данной полосе пропускания.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Было исследовано 7 факельных образований, 2 из которых имели видимую биполярную структуру (№ 6,7 в табл. 1). Источник хромосферного излучения был хорошо заметен, когда на магнитограмме наблюдалась биполярная структура ФО. В случаях, структура оказывалась униполярной, источник в нижней хромосфере был слаб и/или смещён. Это говорит о том, что конфигурация магнитных силовых линий ФО образует низкие петли, которые видны в хромосфере. В табл. 1. представлены значения яркостной температуры на длинах волн 1.2 мм и 3 мм, и экстремальные значения магнитного поля для 7 исследованных объектов, а также значения превышения яркостных температур над фоном для соответствующих длин волн. Фоновые значения на картах 1,2 мм и 3 мм определялись методом, предложенным в работе [Нагнибеда, Пиотрович, 1987]. В нашем случае, они составили 5700 К и 7100 К соответственно.

Также мы провели расчет высотной структуры магнитного поля факельного образования с рис. 1 (№7 в табл. 1). Для этого использовался пакет программ GX Simulator [Nita, 2009]. Данный программный продукт позволяет восстановить потенциальное магнитное поле до корональных высот, исходя из магнитограмм, получаемых на уровне фотосферы по наблюдениям на SDO/HMI. Результат представлен на рис. 2 (a, b).

Таблица 1.

Слева-направо: экстремальные значения магнитного поля ФО, яркостная температура на 1.2мм (233ГГц), яркостная температура на 3мм (96ГГц), превышение температуры над фоном на 1.2мм, превышение температуры над фоном на 3мм

	B_{extr}, G	T_b 1.2mm, K	T_b 3mm, K	ΔT_b 1.2mm, K	ΔT_b 3mm, K
1	-869	6294	7240	594	140
2	736	6086	7321	386	221
3	509	6167	7467	467	367
4	407	6000	7511	300	411
5	-420	6073	7419	373	319
6	-610 259	6248	7574	548	474
7	405 -188	6207	7508	507	408

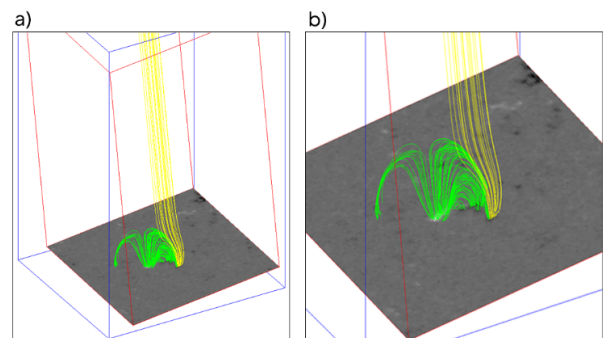


Рис. 2. Структура магнитного поля факельного образования, полученная в программе GX Simulator

Мы видим, что магнитное поле частично образует открытую конфигурацию. Часть магнитных силовых линий замыкается на области противоположной полярности, образуя петли.

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Повышение температуры на уровне хромосферы, а также рост интенсивности, в том числе и в корональных линиях может быть интерпретирован по аналогии с моделью трёх потоков, предложенной в работах [Solov'ev et al., 2016, Smirnova et al., 2016] для солнечных пятен. Кроме того, полученные значения температур соответствуют расчётным температурам, представленным в упомянутой ранее модели [Solov'ev, Kirichek, 2019]. Для дальнейшего уточнения модели ФО необходимо получить больше данных о характерных температурах на разных высотах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Нагнибеда В.Г., Пиотрович В.В. Радиоизлучение Солнца в миллиметровом диапазоне волн // Труды Астрономической обсерватории. 1987. Т. 41. С. 5–80.

Javaherian M., Safari H., Dadashi N. Statistical Properties of Photospheric Magnetic Elements Observed by the Helioseismic and Magnetic Imager onboard the Solar Dynamics Observatory // Sol. Phys. 2017. V. 292? iss. 11. ID. 164. P. 15.

Kostik R., Khomenko E. The possible origin of facular brightness in the solar atmosphere // Astron. and Astrophys. 2016. V. 589, ID. A6. P. 7.

Nita G.M., Fleishman G.D., Gary D.E. GS-3D Simulator: An Interactive IDL Widget Tool for Simulating Spatially Resolved Gyrosynchrotron Spectra Emitted by Solar Radio Bursts // Bul. of the Amer. Astron. Soc. 2009. V. 41. P. 839.

Shatten K.H., Mayr H.G., Omidrav K., Maier E., A Hillcock and Cloud Model for Faculae // Astrophys. J. 1986. V. 311. P. 460–473.

Solov'ev A. A., Kirichek E. A., Analytical Model of an Asymmetric Sunspot with a Steady Plasma Flow in its Penumbra // Sol. Phys. 2016. V. 291, iss. 6. P. 1647–1663.

Solov'ev A.A., Kirichek E.A. Structure of solar faculae // Monthly Notices of Royal Astronomical Society. 2019. V. 482, iss. 4. P. 5290–5301.

Smirnova V.V, Konkol P.M., Solov'ev A.A., Murawski K. Numerical Simulations of Solar Spicule Jets at a Magnetic Null-Point // Sol. Phys. 2016. V. 291, iss. 11. P. 3207–3216.

Spruit H.C. Pressure equilibrium and energy balance of small photospheric fluxtubes // Solsr Phys. 1976. V. 50, iss. 2. P. 269–295.

Strekalova P.V., Nagovitsyn Yu.A., Riechokainen A., Smirnova V.V. Long-period variations in the magnetic field of small-scale solar structures // Geomagn. and Aeron. 2016. V. 56, N 8. P. 1052–1059.

Strekalova P.V., Nagovitsyn Yu.A., Smirnova V.V. Analysis of Oscillatory Modes of the Magnetic Field of Solar Facular Formations // Geomagn. and Aeron. 2018. V. 58, N 7. P. 893–898.

Tarbell T., Ferguson S., Frank Z. et al. High-Resolution Observations of Emerging Magnetic Fields and Flux Tubes in Active Region Photosphere / J.O. Stenflo (ed.) Solar Photosphere: Structure, Convection, and Magnetic Fields. 1990. P. 147–152.

Wedemeyer S., Bastian T., Brajša R., Hudson H., Fleishman G., et al. Solar Science with the Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array—A New View of Our Sun // Space Sci. Rev. 2016. V. 200, iss. 1–4. P. 1–73.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ МАГНИТОПЛАЗМЕННОЙ СТРУКТУРЫ СОЛНЕЧНЫХ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА PYAMPP

В.В. Феденёв, С.А. Анфиногентов, С.В. Лесовой, М.В. Глоба

Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук
Иркутск, Россия, fedenev@iszf.irk.ru

RECONSTRUCTION OF THE MAGNETOTHERMAL STRUCTURE OF SOLAR ACTIVE REGIONS USING THE PYAMPP SOFTWARE PACKAGE

V.V. Fedenev, S.A. Anfinogentov, S.V. Lesovoi, M.V. Globa

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, fedenev@iszf.irk.ru

Аннотация. Восстановление пространственного распределения полного вектора магнитного поля солнечной короны над активными областями имеет огромную важность для прогноза космической погоды. В рамках проекта SUNCAST, с применением новых и уже существующих методов нелинейной бессиловой экстраполяции поля и трёхмерных тепловых моделей солнечных активных областей, развивается программный пакет pyAMPP, отличающийся удобством использования, высокой производительностью и возможностью задействования наблюдения различных инструментов в качестве граничных условий. Цель этой работы — показать возможности данного программного обеспечения на момент публикации на примере нескольких солнечных активных областей. Были построены трёхмерные модели магнитоплазменной структуры для двух активных областей, сгенерированы синтетические радиокарты для каждой из них. Выполнено качественное сопоставление с наблюдательными данными, показавшее хорошее соответствие модельных радиоисточников реальным.

Ключевые слова: активные области, магнитное поле Солнца, численное моделирование, радиоизлучение.

Abstract. Reconstruction of the spatial distribution of the full vector of the solar corona magnetic field above active regions is of great importance for space weather forecasting. Within the framework of the SUNCAST project, using new and existing methods of nonlinear force-free field extrapolation and three-dimensional thermal models of solar active regions, the pyAMPP software package is being developed, aimed at ease of use, high performance and the ability to use observational data from various observational facilities as boundary conditions. The purpose of this work is to demonstrate the capabilities of this software at the time of publication using the example of several solar active regions. Three-dimensional models of the magnetothermal structure were built for two active regions, and synthetic radio maps were generated for each of them. A qualitative comparison with observational data showed a good agreement between the model radio sources and the real ones.

Keywords: active regions, solar magnetic field, numerical modeling, radio emission.

ВВЕДЕНИЕ

Энергия магнитного поля солнечных активных областей, которая высвобождается в результате вспышек и корональных выбросов масс, является определяющим фактором космической погоды. Чтобы прогнозировать возможные последствия выделения этой энергии и оценить её количество, необходима реконструкция полного вектора магнитного поля во всём объёме активной области, начиная от фотосферы и выше, в солнечной короне.

Одной из наиболее распространённых методик восстановления магнитного поля является подход нелинейной бессиловой экстраполяции (Non-Linear Force Free Field, NLFFF), который основывается на приближении равенства нулю силы Лоренца, что, разумеется, в общем случае не так, однако, данное приближение позволяет создавать достаточно точные модели поля в солнечной короне.

Программные пакеты, использующие подход NLFFF, основаны на оптимизационном методе, описанном в работе [Wheatland et al, 2000]. Одним из самых известных и распространённых свободно распространяемых программных пакетов, использующих метод NLFFF, является GX Simulator [Nita et al, 2015], написанный на языке программирования IDL. При реконструкции магнитоплазменной структуры активной области GX Simulator сначала создаёт трёхмерный массив для хранения распределения вектора магнитного поля, заполняет его нижнюю границу значениями из фото-

сферной магнитограммы, проводит потенциальную экстраполяцию поля выше в объём короны, затем восстанавливает магнитное поле во всём объёме активной области в приближении NLFFF, используя потенциальное поле в качестве начального приближения оптимизационного метода. После получения вектора магнитного поля в объёме рассчитываются модельные силовые линии, а на их основе создаётся модель плотности и температуры в короне.

В дальнейшем полученную модель можно использовать уже для создания синтетических карт радио- или рентгеновского излучения как для спокойных, так и для вспышечных активных областей, см., например, [Fleishman, Kuznetsov, 2010].

PYAMPP И ЕГО РЕАЛИЗОВАННЫЕ КОМПОНЕНТЫ

В составе команды проекта SUNCAST создаётся преемник GX Simulator — пакет pyAMPP, использующий широкие возможности языка программирования Python для параллельной обработки данных и интерактивных вычислений, обширную экосистему библиотек и набор средств для визуализации полученных результатов. На данный момент в pyAMPP реализованы следующие этапы моделирования:

1. Скачивание фотосферных данных (магнитограмм и вспомогательных карт в белом свете и в ультрафиолетовом диапазоне), полученные инструментами SDO/HMI и SDO/AIA [Pensnell et al; 2012]

для заданного момента времени, проецирование граничных условий на плоское основание модели с использованием цилиндрической равновеликой (cylindrical equal area, CEA) проекции;

2. Создание модели полного вектора магнитного поля в объёме короны над активной областью в потенциальном приближении;

3. Восстановление магнитного поля в нелинейном бессиловом приближении по начальному приближению, полученному в предыдущем шаге;

4. Создание модели силовых линий на основе модели магнитного поля;

5. Построение синтетических карт радиоизлучения на произвольных частотах с применением магнитотепловой модели EBTEL для плотности и температуры плазмы в солнечных корональных петлях.

МОДЕЛИ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ, ПОЛУЧЕННЫЕ С ПОМОЩЬЮ ruAMPP

Для иллюстрации возможностей ruAMPP и в качестве верификации его корректной работы рассмотрим активные области AR13663 и AR13664, примечательные тем, что в них на момент написания статьи происходили самые сильные солнечные вспышки в текущем (25-м) цикле солнечной активности. В качестве нижнего граничного условия по магнитному полю были использованы магнитограммы SDO/HMI для моментов времени 2024-05-05 05:00:00 и 2024-05-09 04:00:00 соответственно (с предварительной проверкой, что эти времена не приходились на вспышки). На рис. 1 и рис. 2 показан модуль вектора фотосферного магнитного поля для первой и второй выбранных активных областей. На правых панелях показан результат восстановления магнитного поля пакетом ruAMPP.

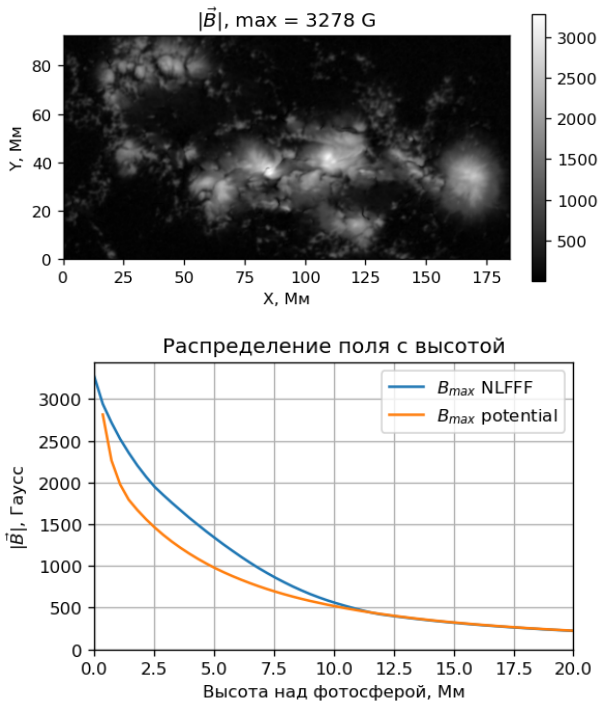


Рис. 1. Модуль магнитного поля и зависимость максимального модуля поля в зависимости от высоты над фотосферой, для активной области AR13663 в момент времени 2024-05-05 05:00:00

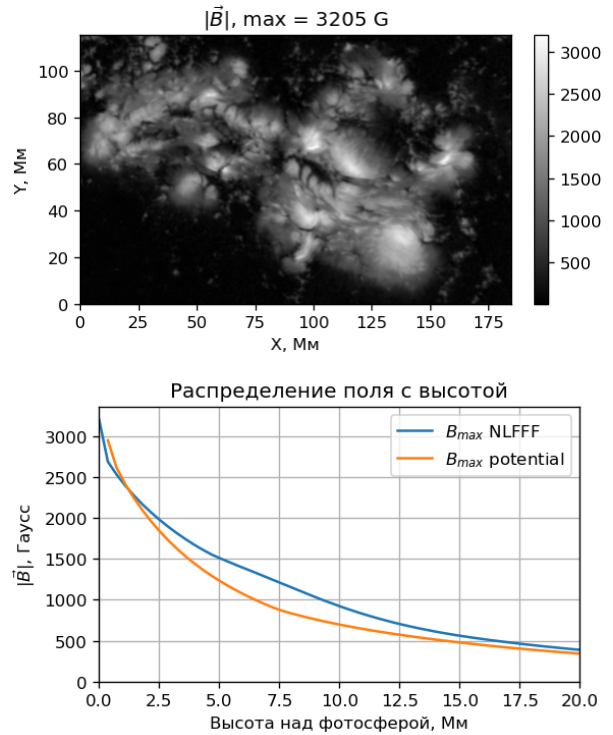


Рис. 2. Модуль магнитного поля и зависимость максимального модуля поля в зависимости от высоты над фотосферой, для активной области AR13664 в момент времени 2024-05-09 04:00:00

Энергия потенциального поля для активной области AR13663 составила 8.73×10^{32} эрг, а для AR13664 — 2.15×10^{32} эрг. Энергия нелинейного бессилового поля — 1.12×10^{33} эрг и 3.04×10^{33} эрг соответственно. В результате свободная энергия, которая является разностью между энергией в NLFFF и потенциальном приближениях и доступная для высвобождения во время вспышек, равняется для первой активной области 2.45×10^{32} эрг, а для второй — 8.82×10^{32} эрг.

СРАВНЕНИЕ С НАБЛЮДЕНИЯМИ

В составе ruAMPP имеется программный компонент для решения уравнения переноса излучения, описанный в работе [Fleishman, Kuznetsov; 2014]. На основе полученных моделей магнитного поля с применением магнитоплазменной модели EBTEL были получены синтетические радиоизображения на частотах наблюдения Сибирского Радиогелиографа 3–24 ГГц (СРГ) [Altynsev et al; 2020] в выбранные моменты времени. Результаты сравнения полученных модельных радиокарт с реальными наблюдениями на СРГ показаны на рис. 3 и 4. Для получения радиокарт СРГ из данных радиовидностей был использован программный пакет srhdata [Globa; 2024]. Использовалось разрешение 4.9 угловых секунд на пиксель, синтетические радиокарты приведены к пространственной сетке и к угловому разрешению СРГ.

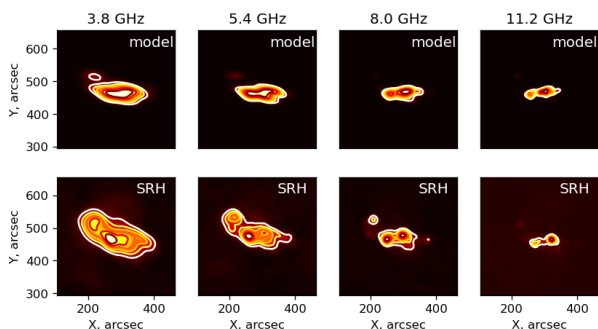


Рис. 3. Сравнение синтетических радиокарт и наблюдений Сибирского Радиогелиографа для AR13663 в момент времени 2024-05-05 05:00:00

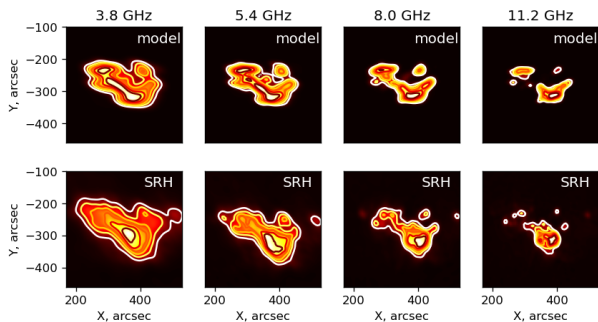


Рис. 4. Сравнение синтетических радиокарт и наблюдений Сибирского Радиогелиографа для AR13664 в момент времени 2024-05-09 04:00:00

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Можно утверждать по нескольким признакам, что с помощью ruAMPР получены физически до-

стоверные модели магнитного поля и радиоизлучения из обеих активных областей. Во-первых, порядок величины свободной энергии в 10^{32} эрг достаточно для возникновения нескольких мощных вспышек X-класса, которые действительно наблюдались. Во-вторых, пространственная структура модельных радиоисточников качественно согласуется с наблюдательными данными. В частности, хорошо воспроизводится форма и местоположение радиоисточников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алтынцев А., Лесовой С., Глоба М. и др. Многоволновой Сибирский Радиогелиограф // Солнечно-земная физика. 2020. Т. 6, № 2. С. 30–40.

Нита Г.М., Флейшман Г.Д., Кузнецов А.А. и др. Трёхмерное Радио и Рентгеновское Моделирование и Анализ Данных: Раскрытие Сложности Вспышек // ApJ. 2015. Т. 799, № 2. С. 236.

Песнелл У.Д., Томпсон Б.Дж., Чемберлин П.С. Обсерватория Солнечной Динамики (SDO) // Солнечная физика. 2012. Т. 275, № 1–2. С. 3–15.

Уитленд М.С., Старрок П.А., Румелиотис Г. Оптимизационный Подход к Восстановлению Бессиловых Полей // ApJ. 2000. Т. 540, № 2. С. 1150–1155.

Флейшман Г.Д., Кузнецов А.А. Быстрые гиросинхротронные коды // ApJ. 2010. Т. 721. С. 1127–1141.

Флейшман Г.Д., Кузнецов А.А. Теория Гирорезонанса и Свободно-Свободных Излучений от Не-Максвелловских Квазистационарных Электронных Распределений // ApJ. 2014. Т. 781, № 2. С. 77.

URL: <https://github.com/maria-globa/srhdata> (дата обращения 31.05.2024)

ПРИМЕНЕНИЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК В МИКРОВОЛНОВОМ ДИАПАЗОНЕ

Ю.Н. Шамсутдинова, Л.К. Кашапова

Институт солнечно земной физики Сибирского отделения Российской академии наук,
Иркутск, Россия, yulia@iszf.irk.ru

THE RECOGNITION OF SOLAR FLARES IN MICROWAVE RANGE USING MACHINE LEARNING

Yu.N. Shamsutdinova, L.K. Kashapova

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, yulia@iszf.irk.ru

Аннотация. Мы представляем результаты тестирования метода опорных векторов для распознавания солнечных вспышек в микроволновом диапазоне. Для обучения использовались данные из каталога событий спектрополяриметра Nobeyama (NoRP). В качестве входных данных были использованы временные профили на частоте 9.4 ГГц за 2001, 2012, 2013, 2014 гг. Набор данных состоял из 100 событий и включал в себя временные профили вспышек с простой и сложной структурой. Максимальная точность распознавания получена при функции радиального ядра и значении параметра гамма равном единице.

Ключевые слова: машинное обучение, солнечные вспышки, микроволновый диапазон.

Abstract. We present the results of testing a method for recognizing solar flares in the microwave range using machine learning. We used Nobeyama spectropolarimeter (NoRP) catalog for training. Temporal profiles at the frequency of 9.4 GHz for 2001, 2012, 2013, 2014 were used as the dataset. The dataset consisted of 100 events and included temporal profiles with simple and complex structure. Maximum recognition accuracy is obtained with radial kernel function and gamma parameter equal to one.

Keywords: Machine Learning, solar flare, microwave range, temporal profile.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в физике Солнца проводятся исследования, направленные на использование методов машинного обучения для прогнозирования возникновения солнечных вспышек [Nishizuka et al., 2017]. В то же время выявление событий среди потока информации, поступающей с новых инструментов, становится все более и более актуальной. В настоящее время развиваются методы распознавания различных типов радиовсплесков на динамических спектрах [Xu et al., 2019]. Однако для выявления и идентификация солнечных вспышек в микроволновом диапазоне, как и для большинства одномерных наблюдений в других спектральных диапазонах подбор и тестирование использования методов машинного обучения не проводилось. Мы представляем первые результаты тестирования использования метод опорных векторов (SVM) для выявления солнечных вспышек с классической формой временного профиля. Считается, что рассматриваемый метод эффективен для данных большого объема данных. Для создания модели была использована библиотека scikit-learn для языка Python (<https://scikit-learn.org>).

НАБОР ДАННЫХ

Тестирование было проведено с использованием временных профилей микроволнового излучения из базы данных событий, наблюдавшихся спектрополяриметром Nobeyama (NoRP) [Torii et al., 1979]. NoRP наблюдает за Солнцем в микроволновом диапазоне на частотах 1, 2, 4, 9.4, 17 и 35 ГГц с временным разрешением до 0.1 секунды. Инструмент измеряет интенсивность от всего Солнца (Солнце как звезда) и круговую поляризацию V. В качестве данных для обучающей и тестовой выборки были использованы события из каталога NoRP за 2001, 2012–2014 гг.

[<https://solar.nro.nao.ac.jp/norp/html/event/>]. Данные года были периодами высокой солнечной активности. Мы использовали только потоки интенсивности, который изначально измеряются в солнечных единицах потока (СЕП). Пример временного профиля представлен на рис. 1 (верхняя панель).

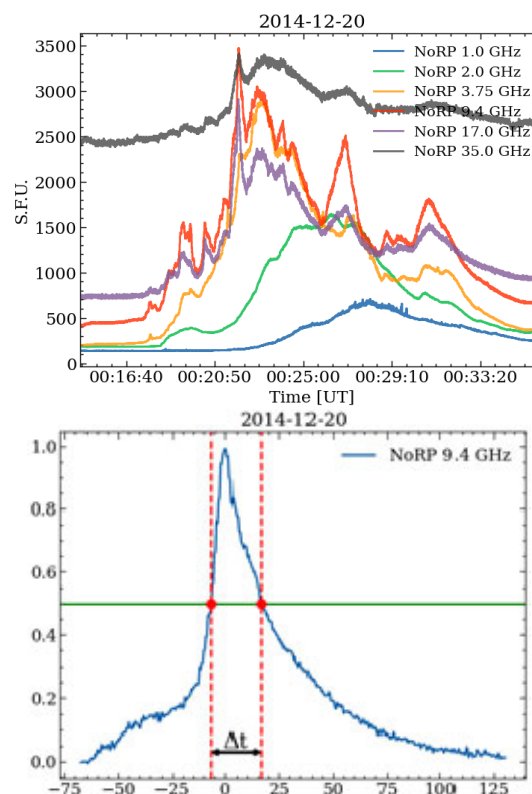


Рис. 1. Верхняя панель: пример временных профилей интенсивности (I) в диапазоне частот 1–35 ГГц по данным NoRP. Нижняя панель: пример предварительной обработки временного профиля. Поиск временного шага для нормирования.

Для распознавания была выбрана временные профили на частоте 9.4 ГГц. Излучение большинства солнечных вспышек на этой частоте формируется в области оптически тонкого источника, что позволяет наблюдать микроволновое излучение без влияния различных эффектов, искажающих временной профиль. Кроме того, эта же частота присутствует в диапазоне частот, на которых наблюдает Сибирский Радиогелиограф (СРГ). Таким образом, результаты, полученные при обучении, могут быть применены к данным СРГ на этой частоте. Так как солнечные вспышки представляют собой события различной длительности и мощности, то они должны быть предварительно обработаны для ввода их в модель машинного обучения.

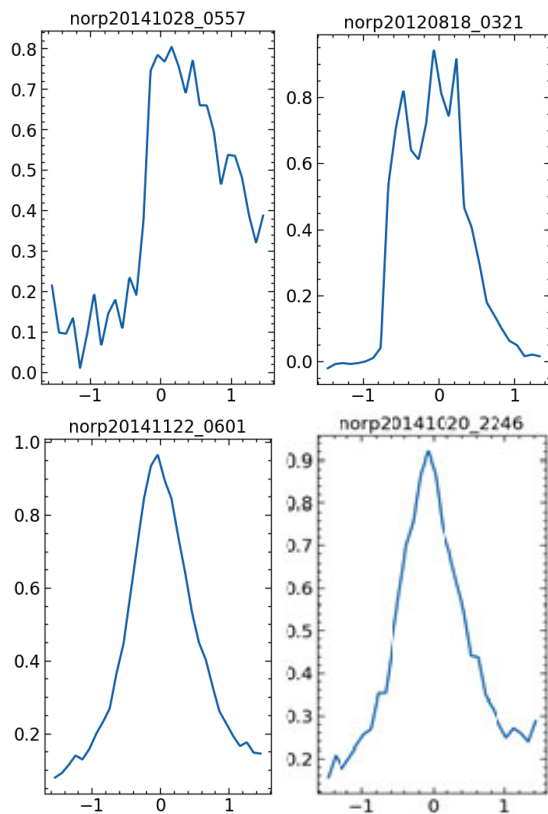


Рис. 2. Пример набора входных данных после применения первичной обработки. Левая панель: временные профили со сложной структурой (класс=0). Правая панель: временные профили с тонкой структурой (класс=1).

Предварительная обработка состояла в том, что в начале находился максимум потока на временном профиле, и он принимался за нулевой отсчет по времени. Таким образом время фазы роста имеет отрицательные значения, а время фазы спада — положительные. Для получения одинаковой шкалы времени для событий с разной продолжительностью было проведено нормирование времени на величину, равную времени между моментами, когда значения потока были равны половине максимума. Описанная процедура применяется для реконструкции среднего профиля вспышки в работе [Davenport et al., 2014]. Каждый массив, содержащий информацию о событии из набора данных, имеет размер 35 элементов. Значение каждого элемента является признаком, который используется как входной параметр для модели. Для обучения и тестирования

мы использовали выборку данных, включающую 100 массивов, из которых 43 профиля имеют сложную структуру (класс 0) и могут оказаться артефактами (например, шумом), а 57 профилей имеют классическую структуру (класс 1). Примеры входных данных на рис. 2. Чтобы повысить точность распознавания, мы дополнительно удаляем неполные события, где временной профиль был прописан не полностью по инструментальным причинам, и применяем кросс-валидацию. Кросс-валидация заключается в разделении имеющегося набора данных на несколько частей, которые используются для обучения модели и тестирования ее качества в произвольной комбинации друг с другом. Этот процесс повторяется несколько раз в различных комбинациях. Такой подход позволяет более эффективно обучить модель на небольшой выборке данных

МЕТОД ОПОРНЫХ ВЕКТОРОВ

Метод опорных векторов (Support Vector Machine, SVM) — алгоритм машинного обучения, который использует модели обучения с учителем для решения задач классификации и регрессии. SVM строит гиперплоскость в многомерном пространстве для разделения различных классов. Следовательно, основная задача SVM заключается в нахождении максимальной граничной плоскости, которая наилучшим образом разделит набор данных на классы. Опорными векторами (support vectors) называются точки данных, которые находятся ближе всего к гиперплоскости. Эти точки определяют разделительную линию и границы (margin). Алгоритм SVM реализуется с помощью ядра, что позволяет построить более точный классификатор. Ядро преобразует пространство входных данных в требуемую форму путем преобразования плоскости низкой размерности в плоскость более высокой размерности. Существуют линейное ядро, полином ядро, радиальная базисная функция (RFB). RFB использует гиперпараметр γ , который определяет влияние опорного вектора на данные. Чем больше γ , тем ближе другие примеры должны быть затронуты. C — это гиперпараметр регуляризации правильности классификации. В нашей работе мы использовали метод GridSearch для определения оптимальных гиперпараметров модели с различными функциями ядер. Мы оптимизировали модель с помощью GridSearch, выбрав гиперпараметры на основе точности, достигнутой в тестовом наборе. Оптимальные параметры для моделей представлены в табл. 1.

SVM широко используется для решения задач бинарной классификации, а также в случаях, когда данные не являются линейно разделимыми. Использование кросс-корреляции предполагает, что временные ряды являются стационарными и имеют линейные отношения, что в нашем случае это не так. Поэтому кросс-корреляция не всегда может быть применена для задачи распознавания.

РЕЗУЛЬТАТ КЛАССИФИКАЦИИ ВРЕМЕННЫХ ПРОФИЛЕЙ И ОЦЕНКА

Для оценки модели классификации мы использовали такие метрики как точность (precision), пол-

нота (recall) и меру F1 как в работе [Wang et al.]. Precision оценивает точность предсказания для истинного положительного класса. Recall показывает процент правильных положительных ответов по отношению к общему количеству фактических положительных результатов. Оценка F1 — это средневзвешенное гармоническое значение precision и recall. Чем ближе к 1, тем лучше модель. TPR означает, что классификатор верно отнес профиль к нужному классу. FPR, наоборот, ошибся и отнес профиль к неверному классу. Результаты тестирования моделей с различной функцией ядра представлены в табл. 1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено тестирование метода опорных векторов для распознавания сложных и классических временных профилей микроволнового излучения на частоте 9.4 ГГц на основе данных каталога спектрополяриметра Нобеяма. Максимальная точность распознавания получена при радиальном ядре (RBF) и значении гамма равном единице. Алгоритм необходимо проверить на более значимой выборке данных и других частотных диапазонов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-22-00315, <https://rscf.ru/project/24-22-00315/>

Таблица 1.

Результат тестирования моделей SVM для распознавания временных профилей

	Linear (C=1, gamma=1)					RBF (C=10, gamma=1)					Polynomial (C=0.1, gamma=0.1)				
	TPR	FPR	Precision	Recall	F1	TPR	FPR	Precision	Recall	F1	TPR	FPR	Precision	Recall	F1
Классическая вспышка	62%	38%	0.73	0.92	0.81	85%	15%	0.79	0.85	0.81	92%	8%	0.67	0.50	0.77
Сложная вспышка	92%	8%	0.88	0.62	0.73	75%	25%	0.82	0.75	0.78	50%	50%	0.85	0.92	0.63

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Davenport J.R.A., Hawley S.L., Hebb L. et al. Kepler Flares. II. The Temporal Morphology of White-light Flares on GJ 1243 // *Astrophysical J.* 2014. V. 797. iss. 2. 11 pp.

Long Xu, Yi-Hua Yan, Xue-Xin Yu. et al. LSTM neural network for solar radio spectrum classification // *Res. Astronomy and Astrophysics.* 2019. V. 19, iss. 9. P. 135–147.

Nishizuka N. Sugiura K., Kubo Y., Den M. et al. Solar Flare Prediction Model with Three Machine-learning Algorithms using Ultraviolet Brightening and Vector Magnetograms // *Astrophysical J.* 2017. V. 835, iss. 2. 14 pp.

Torii C., Tsukiji Y., Kobayashi S. et al. Full-automatic radiopolarimeters for solar patrol at microwave frequencies // *Proc. Research Institute of Atmospheric, Nagoya University.* 1979. V. 26. P.129–132.

Wang Y.H., Feng S.W., Du Q.F. et al. Solar Radio Burst Prediction Based on a Multimodal Model // *Solar Phys.* 2024. V. 299, iss. 4.

URL: <https://solar.nro.nao.ac.jp/norp/html/event/> (дата обращения 23.05.2024).

URL: <https://scikit-learn.org> (дата обращения 24.05.2024).

ВСПЫШКИ, ВЫБРОСЫ И ПРОГНОЗ ПРОТОННЫХ ВОЗРАСТАНИЙ

Н.С. Шлык, А.В. Белов, М.А. Абунина, А.А. Абунин

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова Российской академии наук, Москва, Россия,
nshlyk@izmiran.ru

X-RAY FLARES, CMEs AND PROTON EVENT FORECASTING

N.S. Shlyk, A.V. Belov, M.A. Abunina, A.A. Abunin

Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation
of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia,
nshlyk@izmiran.ru

Аннотация. На основе постоянно пополняемой базы данных рентгеновских вспышек и протонных возрастаний, созданной и поддерживаемой в ИЗМИРАН, были проанализированы протонные события разной величины и их солнечные источники (вспышки и ассоциированные с ними корональные выбросы массы) за длительный период с 1996 по 2023 гг. Проведен подробный анализ различных характеристик этих событий, получены корреляционные связи между ними, рассчитаны соответствующие регрессионные коэффициенты. Описанные зависимости используются для разработки эмпирической модели, позволяющей оценить вероятность регистрации протонного возрастания у Земли и максимальную величину потока частиц разных энергий на основе данных о вспышке и корональном выбросе массы.

Ключевые слова: солнечные вспышки, корональные выбросы массы, СПС.

Abstract. Using a constantly updated database of X-ray flares and proton enhancements created and maintained at IZMIRAN, proton events of various magnitudes and their solar sources (X-flares and associated coronal mass ejections) were analyzed for the period from 1996 to 2023. An extent analysis of these events was conducted, correlations between their characteristics were obtained and the corresponding regression coefficients were calculated. All the described dependencies are used to build an empirical model that makes it possible to estimate the probability of a proton enhancement near the Earth and the maximum value of the flux of particles with different energies based on data on solar flare and coronal mass ejection.

Keywords: solar flares, coronal mass ejections, SEP

ВВЕДЕНИЕ

Частицы солнечных космических лучей разных энергий представляют значительный риск для жизни космонавтов, негативно влияют на спутниковую электронику, экипажи и пассажиров самолетов, совершающих трансполярные рейсы [Dorman, 2006; Lario et al., 2009; Mishev et al., 2015; Townsend et al., 2018]. Несмотря на то, что такие частицы наблюдаются с помощью различных космических аппаратов и наземных приборов уже несколько десятилетий, наше понимание физики процессов их ускорения и распространения в межпланетном пространстве все еще неполное. Существует ряд работ, в которых установлены различные зависимости между характеристиками рентгеновских вспышек или корональных выбросов массы (КВМ) и параметрами солнечных протонных событий (СПС) [Bazilevskaya et al. 2006; Kahler 2011; Cliver et al 2012; Richardson et al. 2016; Belov, 2017], а также созданы различные модели протонных возрастаний (см. обзор [Whitman et al., 2022]).

Целью данной работы является составление каталога СПС (для энергий >10 и >100 МэВ) за 1996–2023 гг., а также анализ и уточнение статистических связей между величиной протонных возрастаний и характеристиками рентгеновских вспышек и КВМ для создания эмпирической модели СПС.

ДААННЫЕ

Основой для создания каталога послужила ежедневно пополняемая база данных рентгеновских вспышек и протонных возрастаний [Белов, 2017 и ссылки в нем], дополненная данными о начальной

скорости соответствующих КВМ, выделенных на коронографе LASCO [cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/]. Установление связи «вспышка-КВМ-протонное возрастание» проводилось отдельно для каждого события, путем анализа всех доступных источников информации, включая ежедневные видео Солнца в ультрафиолете, коронографические наблюдения, потоки рентгена и частиц разных энергий (спутники GOES: <https://www.swpc.noaa.gov/products/goes-x-ray-flux>, <https://www.swpc.noaa.gov/products/goes-proton-flux>), данные о скорости, направлении КВМ и пр. Всего было выделено 307 СПС, в которых поток частиц с энергией >10 МэВ превысил 0.1 pfu (группа P10), из них 166 событий, в которых поток частиц с энергией >100 МэВ был >0.01 pfu (группа P100) и 18 наземных возрастаний частиц (GLE). Также была отобрана контрольная группа из 600 событий «вспышка-КВМ», которые не привели к регистрации каких-либо СПС.

На рис. 1 приведено долготное распределение всех исследуемых событий в зависимости от величины потоков частиц (голубые кружки — без СПС, синие кружки — P10, квадраты — P100, ромбы — GLE), балла соответствующей рентгеновской вспышки (слева) и начальной скорости КВМ (справа). Почти все точки контрольной группы на обеих панелях лежат в нижней части рисунка, что подтверждает необходимость (но не достаточность) рентгеновской вспышки высокого балла и быстрого КВМ для регистрации СПС у Земли. Также хорошо видно, что солнечные источники всех протонных возрастаний значительно смещены в западное полушарие и чаще всего связаны со вспышками балла $>M1$, при этом для западных источников скорости

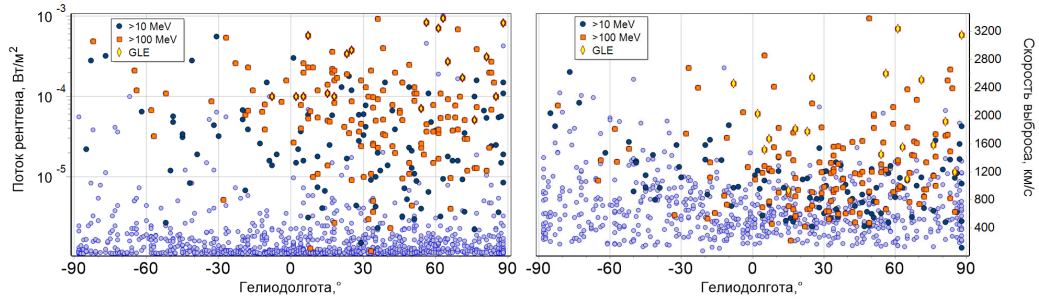


Рис. 1. Основные характеристики событий: величины и долготы рентгеновских вспышек для разных потоков частиц (слева), начальные скорости соответствующих КВМ (справа)

могут быть значительно меньше, чем для восточных, но наиболее значительные СПС наблюдаются при начальных скоростях КВМ не менее 1000–1200 км/с.

В таблице приведены средние значения различных параметров для трех групп событий: X_m — максимальный поток рентгена, t — время от начала до максимума вспышки, ϕ — гелиодолгота, P_{10} — поток частиц с энергией >10 МэВ, P_{100} — поток частиц с энергией >100 МэВ, V_0 — начальная скорость КВМ. Анализ таблицы позволяет сделать вывод о том, что чем выше значения параметров, характеризующих солнечные источники (X_m , t , V_0), тем большие потоки частиц следует ожидать, особенно, при расположении источника в благоприятной западной долготной зоне.

Таблица.

Средние значения различных характеристик событий.

	Без СПС (600)	P10 (307)	P100 (166)
$X_m \cdot 10^6$, Вт/м ²	40 ± 2.8	93 ± 8.3	122 ± 13.4
t , мин	25 ± 1.1	33 ± 1.9	31 ± 2.7
ϕ , °	-1 ± 2.1	28 ± 2.3	33 ± 2.8
V_0 , км/с	653 ± 16	1161 ± 33	1320 ± 49
P_{10} , pfu	0	380 ± 128	690 ± 235
P_{100} , pfu	0	10 ± 3.5	19 ± 6.5

Большое количество событий и достаточно равномерное распределение источников по диску Солнца позволяет оценить вероятности регистрации СПС определенного уровня в зависимости от мощности вспышки и гелиокоординат. На рис. 2 кружки и числа разных цветов соответствуют вероятностям регистрации СПС: частиц с энергиями >10 МэВ — зеленый, >100 МэВ — красный, GLE — желтый.

Видно, что имея вспышку балла ~X10 с долготами W30–W70 следует со 100 % вероятностью ожи-

дать СПС для частиц с энергиями и >10 МэВ, и >100 МэВ, при этом и вероятность GLE также высока (>60 %).

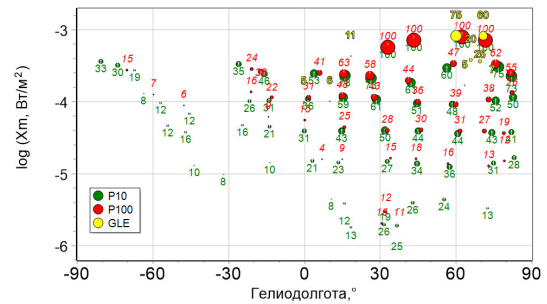


Рис. 2. Зависимость вероятности регистрации СПС от гелиодолготы и балла вспышки

В более ранних работах [Белов, 2017] уже было показано, что наилучшие связи с величиной СПС показывает комбинированный вспышечный индекс I_x , представляющий собой произведение максимального потока рентгена на длительность фазы роста вспышки и индекс начальной скорости КВМ. Для построения модели СПС разумно ограничиться именно западными долготами, а также только теми событиями, в которых связь между солнечным источником и СПС установлена наиболее достоверно. Таких событий оказалось 163 из группы P10 и 98 из группы P100. На рис. 3 приведена связь величины потока протонов разных энергий с произведением двух выше упомянутых индексов для СПС с гелиодолготами источников W20–W88 в логарифмической шкале. Коэффициенты корреляции составляют 0.7 ± 0.04 и 0.73 ± 0.05 для левой и правой панели соответственно. Коэффициенты линейной регрессии составляют $A = -2.2 \pm 0.06$ и $B = 1.09 \pm 0.09$ для левой панели, $A = -3.8 \pm 0.07$ и $B = 1.08 \pm 0.103$ для правой панели.

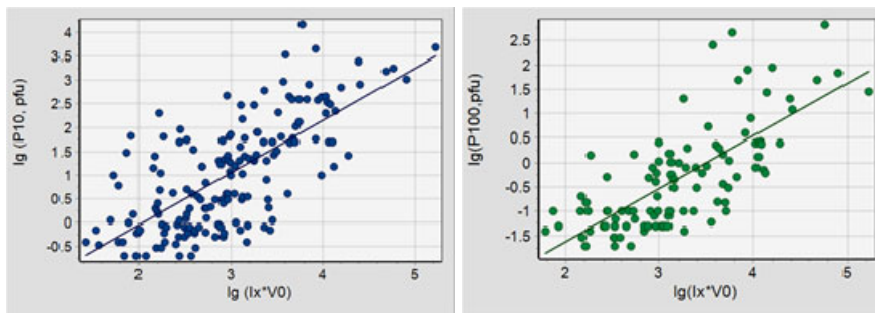


Рис. 3. Связь потока частиц с энергиями >10 МэВ (слева) и >100 МэВ (справа) с произведением вспышечного индекса и начальной скорости КВМ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Составлен каталог СПС (для энергий >10 и >100 МэВ) за 1996–2023 гг. Проведено сопоставление характеристик возрастных потоков протонов, регистрируемых у Земли спутниками GOES, с характеристиками КВМ и солнечных вспышек. Рассчитаны средние значения различных параметров и установлены закономерности, которые позволяют оценивать вероятность СПС, а также величину ожидаемых потоков протонов по солнечным данным, доступным с минимальной временной задержкой. Полученные результаты положены в основу эмпирической прогностической модели СПС, подробное описание и отладка которой будут задачами дальнейшей работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Белов А.В. Вспышки, выбросы, протонные события // Геомагнетизм и аэронавигация. 2017. Т. 57, № 6. С. 1–12.
Bazilevskaya G.A., Sladkova A.I., Svirzhevskaya A.K. Features of the solar X-ray bursts related to solar energetic particle events // Adv. Space Res. 2006. V. 37, N 8. P. 1421–1425.
Cliver E.W., Ling A.G., Belov A., Yashiro S. Size distributions of solar flares and solar energetic particle events // Astrophys. J. Letters. 2012. V. 756, N 2. P. L29–L33.

Dorman L. Cosmic ray interactions, propagation, and acceleration in space plasmas. Springer, Dordrecht, 2006. 847 P.

Kahler S.W. The correlation between solar energetic particle peak intensities and speeds of coronal mass ejections: Effects of ambient particle intensities and energy spectra // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. P. 20947–20956.

Lario D., Aran A., Decker R.B. Major solar energetic particle events of solar cycles 22 and 23: Intensities close to the streaming limit // Solar Phys. 2009. V. 260 P. 407–421.

Mishev A.L., Adibpour F., Usoskin I.G., Felsberger E. Computation of dose rate at flight altitudes during ground level enhancements no. 69, 70 and 71 // Adv. Space Res. 2015. V. 55. P. 354–362.

Richardson I.G., von Rosenvinge T.T., Cane H.V. The properties of solar energetic particle event-associated coronal mass ejections reported in different CME catalogs // Solar Phys. 2015. V. 290, N 6. P. 1741–1759.

Townsend L.W., Adams J.H., Blattig et al. Solar particle event storm shelter requirements for missions beyond low Earth orbit // Life Sci. in Space Res. 2018. V. 17 P. 32–39.

URL: cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/ (дата обращения 21.05.2024)

URL: <https://www.swpc.noaa.gov/products/goes-x-ray-flux> (дата обращения 21.05.2024)

URL: <https://www.swpc.noaa.gov/products/goes-proton-flux> (дата обращения 21.05.2024)

СРАВНЕНИЕ ВКЛАДОВ РАЗЛИЧНЫХ ВЫСОТНЫХ ИНТЕРВАЛОВ В ОТКЛИКЕ РЕГИОНАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ В ВЫСОКИХ ШИРОТАХ НА ГЕОМАГНИТНЫЕ БУРИ В ВЕСЕННИЙ СЕЗОН

К.В. Белюченко^{1,2}, М.В. Клименко², К.Г. Ратовский³, В.В. Клименко²

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

²Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН, Калининград, Россия,

kdei@list.ru

³Институт солнечно земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

COMPARISON BETWEEN CONTRIBUTIONS OF DIFFERENT ALTITUDE INTERVALS TO THE RESPONSE OF REGIONAL ELECTRON CONTENT AT HIGH LATITUDE TO GEOMAGNETIC STORMS IN SPRING

K.V. Belyuchenko^{1,2}, M.V. Klimenko², K.G. Ratovsky³, V.V. Klimenko²

¹Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

²Kaliningrad Branch of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, RAS,
Kaliningrad, kdei@list.ru

³Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia

Аннотация. На основе Глобальной Самосогласованной Модели Термосферы, Ионосферы и Протоносферы (ГСМ ТИП) были проведены расчеты отклика регионального электронного содержания ионосферы (РЭС) в высоких широтах для бури 17 марта 2015 г. и для изолированной эталонной геомагнитной АЕ бури, полученной усреднением вариации АЕ-индекса методом наложения эпох с ключевыми моментами, соответствующими максимуму АЕ-индекса. В данной работе будет рассматриваться вклад трех высотных интервалов (80–300 км, 300–800 км и 800–20000 км) в отклик высокоширотного РЭС на геомагнитные бури.

Ключевые слова: численное моделирование, геомагнитные бури, ионосферные возмущения, региональное электронное содержание.

Abstract. Based on the Global Self-Consistent Model of the Thermosphere, Ionosphere and Protonosphere (GSM TIP), the response of the regional electron content of the ionosphere (REC) at high latitudes was calculated for the storm of March 17, 2015 and for an isolated reference geomagnetic AE storm obtained by averaging the AE index variation using the superposition of epochs with key moments corresponding to the AE index maximum. In this paper, the contribution of three altitude intervals (80–300 km, 300–800 km and 800–20000 km) to the response of high-latitude REC to geomagnetic storms will be considered.

Keywords: numerical modeling, geomagnetic storms, ionospheric disturbances, regional electron content.

ВВЕДЕНИЕ

Система ионосфера-протоносфера Земли играет ключевую роль в распространении коротковолновых радиосигналов и оказывает существенное влияние на космическую радиосвязь, радиолокацию, навигацию и работу систем позиционирования навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS. Восстановленные значения полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы по данным измерений задержек сигналов глобальных навигационных спутниковых систем являются весьма удобным параметром для анализа изменчивости ионосферы, как в глобальном, так и в региональном масштабе. Полное электронное содержание состоит из ионосферного и плазмосферного электронного содержания. Довольно часто плазмосферный резервуар игнорируется при анализе и оценке данных ПЭС исходя из следующих двух предположений: (1) величина плазмосферного вклада в ПЭС на несколько порядков меньше ионосферного вклада [Gallagher et al., 2000]; (2) вариации ПЭС и NmF2 сильно коррелируют [Liu et al., 1996]. За последние 20 лет различными коллективами авторов [Lunt et al., 1999; Balan et al., 2002; Gulyaeva and Gallagher, 2007; Lee et al., 2013;

Klimenko et al., 2015] было установлено, что предыдущие оценки вклада плазмосферы в ПЭС являются заниженными, и процентный вклад плазмосферы может при определенных условиях быть весьма значительным (более 50 % от значения ПЭС). Эта недооценка плазмосферного резервуара и привела к тому, что у многих ученых выработался стереотип о малом вкладе плазмосферы в ПЭС по сравнению с вкладом ионосферы.

Следует заметить, что ионосферно-плазмосферные возмущения являются следствием изменений космической погоды, вызываемых, в том числе геомагнитными бурями. В недавних работах было показано, что возмущения NmF2 и ПЭС во время геомагнитных бурь могут значительно отличаться даже по знаку возмущений [Klimenko et al., 2018]. К настоящему моменту остается открытым вопрос об изменении плазмосферного вклада в ПЭС во время геомагнитных бурь. На этот вопрос мы попытаемся дать ответ в данной статье. Исследования будут основываться на результатах численного моделирования отклика системы ионосфера-плазмосфера на геомагнитные бури и на экспериментальной базе данных глобальной сети приемников сигналов ГЛОНАСС и GPS.

ОПИСАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Основой данного исследования являются результаты расчетов проведенные на Глобальной Самоогласованной Модели Термосферы, Ионосферы и Протоносферы (ГСМ ТИП) для геомагнитной бури 17–23 марта 2015 г. и для изолированной эталонной геомагнитной АЕ бури в весеннее равноденствие. На рис. 1 показаны вариации АЕ-индексов для этих геомагнитных бурь. Эталонная геомагнитная АЕ буря была получена усреднением вариации АЕ-индекса методом наложения эпох с ключевыми моментами, соответствующими максимуму АЕ-индекса для изолированных событий. Были проведены расчеты отклика регионального электронного содержания ионосферы (РЭС) в высоких широтах, представляющего собой интеграл ПЭС по всем долготам в интервале широт от северного/южного полюса до 60° северной/южной широты. Эталонный отклик РЭС рассчитывался по следующей схеме: расчет РЭС по картам полного электронного

содержания на основании результатов моделирования и по данным наблюдений; расчет возмущений РЭС, как отклонений модельных/наблюдаемых значений от фоновых значений (в случае наблюдений от 27-дневного скользящего среднего значения РЭС); расчет эталонного наблюдаемого отклика РЭС усреднением возмущений методом наложенных эпох.

На рис. 1 также показан отклик высокоширотного РЭС в северном и южном полушарии для эталонной геомагнитной бури (черная линия) и бури марта 2015 г. (розовая линия). Разница в амплитудах отклика РЭС на эти бури связана с разницей в АЕ-индексе для этих бурь. Можно также отметить и разницу между этими событиями в возмущении РЭС на фазе восстановления. Для эталонной бури вариации РЭС день-ото-дня незначительны в сравнении с бурей марта 2015 г. Возмущения РЭС в южном полушарии на 20% сильнее для бури марта 2015 г., а возмущения РЭС для эталонной бури практически одинаковые для обоих

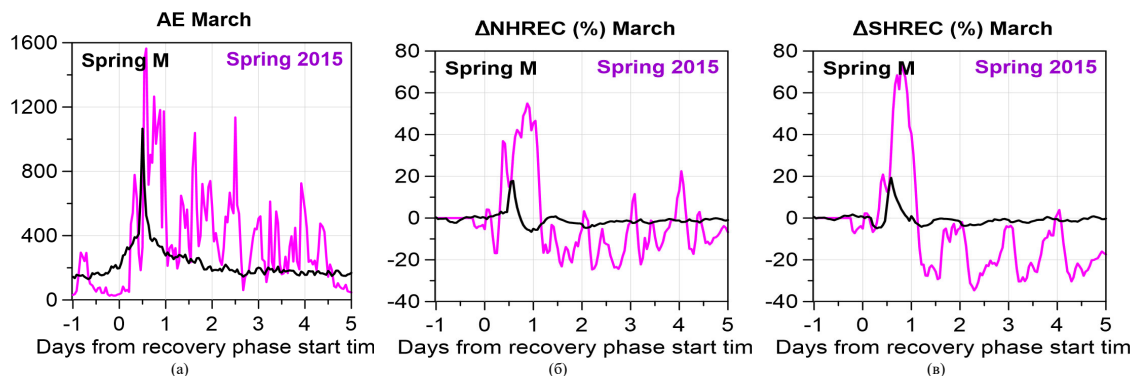


Рис. 1. Вариации АЕ-индекса (а) и возмущений высокоширотного РЭС для северного (б) и южного полушарий (в) для весенних бурь. Черной линией показаны вариации для эталонной геомагнитной бури, розовой для бури марта 2015 г.

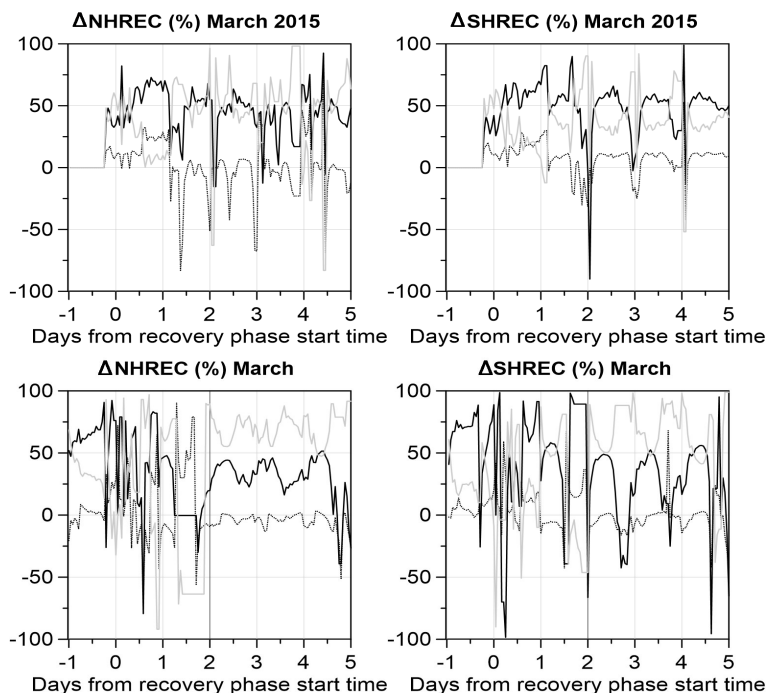


Рис. 2. Процентный вклад возмущений высокоширотного РЭС для бури марта 2015 г. (верхняя панель) и для эталонной весенней бури (нижняя панель). Пунктирной линией отмечен вклад в возмущения РЭС высотного диапазона 800–20000 км, черной линией — диапазона 300–800 км и серой линией — диапазона 80–300 км

полушарий. Для изолированной эталонной бури имеет место слабый отрицательный эффект в РЭС, а для бури марта 2015 г. видны сильные отрицательные возмущения в обоих полушариях.

Кроме того, были проанализированы вклады различных высотных диапазонов (80–300 км, 300–800 км и 800–20000 км) в возмущения высокоширотных РЭС. Мы рассчитывали вклад в процентах возмущений РЭС для конкретного высотного диапазона относительно возмущений РЭС, рассчитанного для полного диапазона высот (80–20000 км). На рис. 2 представлены процентные вклады в возмущения РЭС различных высотных диапазонов.

Анализируя результаты моделирования, можно отметить следующее: 1) возмущения на высоте 800–20000 км вносят наименьший вклад в общие возмущения РЭС для всех рассмотренных случаев (исключением является главная фаза бури); 2) на фазе восстановления основной вклад в возмущения РЭС вносят высоты 80–300 км; 3) согласно результатам моделирования отсутствует межполушарная асимметрия вкладов различных высотных диапазонов в возмущения РЭС; 4) перед началом бури вклады возмущений РЭС для диапазонов 80–300 км и 300–800 км примерно одинаковы для марта 2015 г., а для эталонной бури вклад диапазона 300–800 км больше, что связано с различиями в солнечной активности для рассмотренных событий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были проанализированы вклады различных высотных диапазонов в возмущения высокоширотного РЭС для бури 17 марта 2015 г. и для эталонной весенней бури. В качестве основных результатов можно сказать следующее: перед началом бури вклады возмущений для высот 80–300 км и 300–800 км примерно одинаковы, а на фазе восстановления

основной вклад в возмущения вносят высоты 80–300 км. Во время главной фазы геомагнитной бури вклад высотного диапазона 800–20000 км возрастает до 30 % (в остальное время он минимален 5–10 %).

Работа выполнена при поддержке Санкт-Петербургского государственного университета (идентификационный номер проекта 116234986).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Balan N., Otsuka Y., Tsugawa T. et al. Plasmaspheric electron content in the GPS ray paths over Japan under magnetically quiet conditions at high solar activity // *Earth, planets and space*. 2002. V. 54. P. 71–79.
- Gallagher D.L., Craven P.D., Comfort R.H. Global core plasma model // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2000. V. 105, N A8. P. 18819–18833.
- Gulyaeva T.L., Gallagher D.L. Comparison of two IRI electron-density plasmasphere extensions with GPS-TEC observations // *Adv. Space Res.* 2007. V. 39, N 5. P. 744–749.
- Klimenko M.V., Klimenko V.V., Despirak I.V. et al. Disturbances of the thermosphere-ionosphere-plasmasphere system and auroral electrojet at 30° E longitude during the St. Patrick's Day geomagnetic storm on 17–23 March 2015 // *J. Atmosphere. Solar-Terrestrial Phys.* 2018. V. 180. P. 78–92.
- Klimenko M.V., Klimenko V.V., Zakharenkova I.E., Cherniak I.V. The global morphology of the plasmaspheric electron content during Northern winter 2009 based on GPS/COSMIC observation and GSM TIP model results // *Adv. Space Res.* 2015. V. 55, N 8. P. 2077–2085.
- Lee H.B., Jee G., Kim Y.H., Shim J.S. Characteristics of global plasmaspheric TEC in comparison with the ionosphere simultaneously observed by Jason-1 satellite // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2013. V. 118, N 2. P. 935–946.
- Liu J.Y., Tsai H.F., Jung T.K. Total electron content obtained by using the global positioning system // *Terr. Atmos. Oceanic Sci.* 1996. V. 7, N 1. P. 107–117.
- Lunt N., Kersley L., Bailey G.J. The influence of the protonosphere on GPS observations: Model simulations // *Radio Sci.* 1999. V. 34, N 3. P. 725–732.

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ВЫСОТЫ АРКТИЧЕСКОЙ ТРОПОПАУЗЫ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВНЕЗАПНЫХ СТРАТОСФЕРНЫХ ПОТЕПЛЕНИЙ

Б.А. Бикбулатов^{1,2}, К.А. Диденко¹, Т.С. Ермакова²

¹Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова
Российской Академии наук, Троицк, Россия,
bogdan.bikbulatov1@gmail.com

²Российский Государственный Гидрометеорологический Университет, Санкт-Петербург, Россия

VARIABILITY OF ARCTIC TROPOPAUSE HEIGHT AFFECTED BY SUDDEN STRATOSPHERIC WARMING

B.A. Bikbulatov^{1,2}, K.A. Didenko¹, T.S. Ermakova²

¹The Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radiowave Propagation of
the Russian Academy of Sciences, Troitsk, Russia,
bogdan.bikbulatov1@gmail.com

²Russian State Hydrometeorological University, Saint-Petersburg, Russia

Аннотация. На основе данных радиозондирования и реанализа MERRA-2 рассматривается изменчивость высоты тропопаузы в арктическом регионе под воздействием внезапных стратосферных потеплений (ВСП). В первую очередь проводится анализ реакции высоты тропопаузы на ВСП, произошедшее 23 января 2009 г., после чего исследуется её многолетнее изменение, основанное на усреднении по десятилетиям.

Ключевые слова: Арктика, тропопауза, внезапное стратосферное потепление, реанализ.

Abstract. Based on radiosounding and ERA-2 reanalysis data, the variability of tropopause height in the Arctic region affected by sudden stratospheric warming is considered. First of all, the analysis of the reaction of the tropopause height to the sudden stratospheric warming that occurred on January 23, 2009, is carried out; then its long-term change based on averaging over decades is investigated.

Keywords: Arctic, tropopause, sudden stratospheric warming, reanalysis.

В настоящей работе исследуется изменчивость высоты тропопаузы на четырех станциях арктического региона (Черский (68°45'06" с.ш., 161°19'47" в.д.), Диксон (73°30'30" с.ш., 80°31'28" в.д.), Иллоккортоормиут (70°29'07" с.ш., 21°58'01" з.д.) и Кеймбридж-Бей (69°07'02" с.ш., 105°03'11" з.д.)) (рис. 1) во время внезапного стратосферного потепления (ВСП) в январе 2009 г. Кроме этого, на тех же станциях, рассматривается внутригодовой ход давления на уровне тропопаузы в период с 2000 по 2019 гг. и его изменчивость под воздействием ВСП. Расположение станций было выбрано не случайно. Оно подобрано таким образом, чтобы все станции находились примерно на одной параллели 70° с.ш. Это требование было введено для того, чтобы изучить влияние ВСП на вариации высоты тропопаузы вдоль широтного круга без учета меридиональной составляющей.

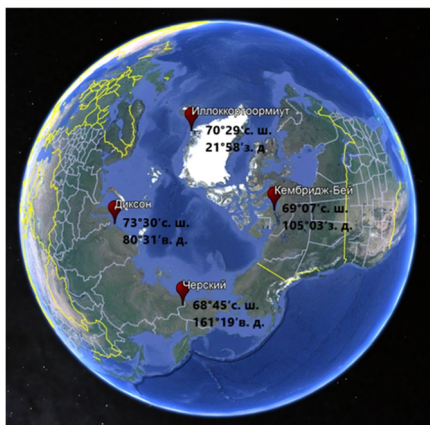


Рис. 1. Расположение станций (изображение заимствованно из Google Earth Pro)

Для того чтобы идентифицировать события ВСП были построены графики среднезонального ветра и среднезональной температуры, приведенные на рис. 2. Одновременное резкое повышение температуры и ослабление скорости зональной компоненты ветра (а также ее обращение — изменение направления с западного на восточное) в стратосфере свидетельствует о том, что в этот момент наблюдалось ВСП. Количество сильных и слабых ВСП различно в разные десятилетия в зимний период. Важно также учитывать, что внезапный стратосферный вихрь может вести себя по-разному на момент ВСП, а последствия потепления, в том числе и в тропосфере, могут сказываться на протяжении месяца после того, как температура и зональная компонента вернулись к своим нормальным значениям [Baldwin et al., 2021; Butler et al., 2017].

В предшествующем исследовании было получено (рисунок не приводится), что осредненная по срокам (00 ч) за десятилетние периоды 2000–2009 гг. и 2010–2019 гг. тропопауза в январе и феврале на станциях Черский, Диксон и Иллоккортоормиут в первом десятилетии была ниже, чем во втором. Низкая тропопауза первого десятилетия обусловлена частыми и интенсивными внезапными стратосферными потеплениями в этом десятилетии, которые, безусловно, влияли на ее высоту. Однако, на станции Кеймбридж-Бей такого изменения не было выявлено, что может быть связано с тем, что данный пункт наблюдения не попал под интенсивное воздействие ВСП на тропопаузу.

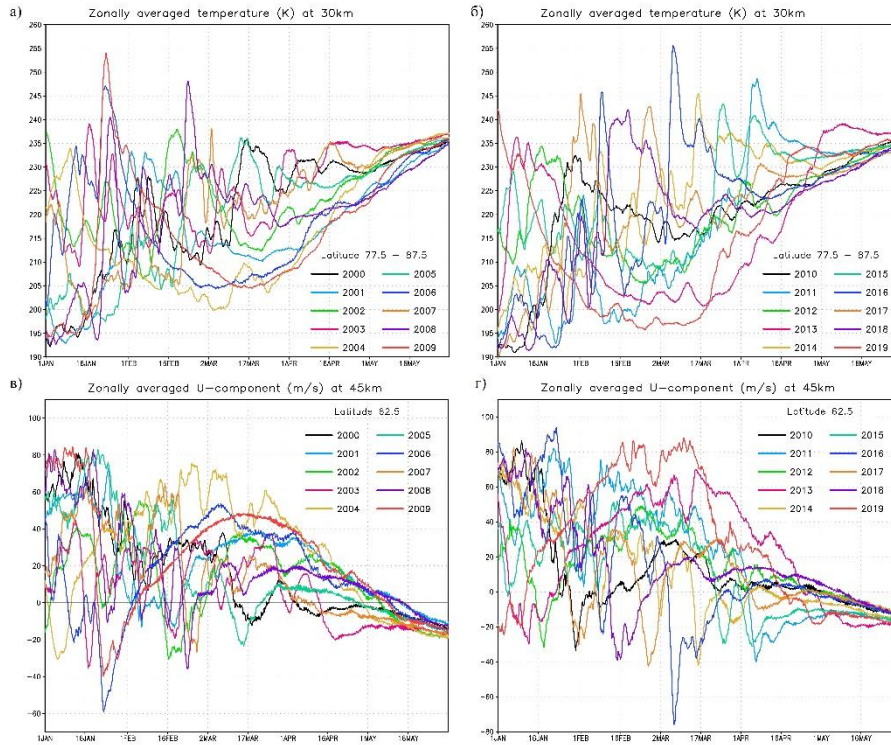


Рис. 2. Среднезональная температура (а — 2000–2009 гг., б — 2010–2019 гг.) на 77,5–87,5°с.ш. на высоте 30 км, среднезональная зональная компонента ветра (в — 2000–2009 гг., г — 2010–2019 гг.) на 62,5°с.ш. на высоте 45 км

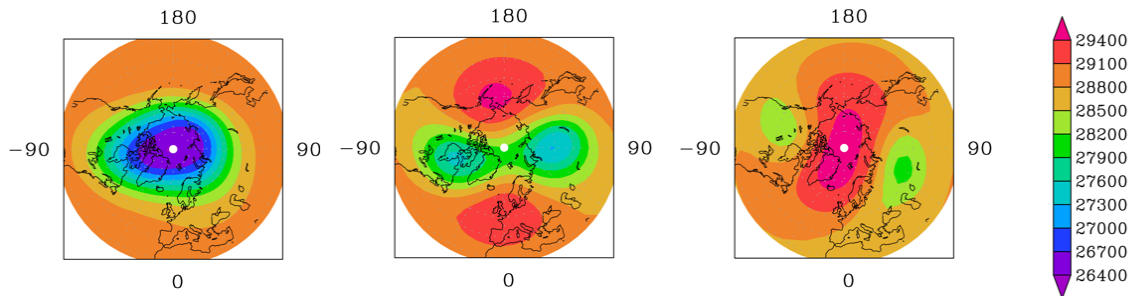


Рис. 3. Усредненные по декадам поля геопотенциальной высоты на уровне 30 гПа. Правая декада (правая панель), вторая декада (центральная панель), третья декада (левая панель)

Для наглядного рассмотрения процессов тропопазы во время ВСП следует анализировать ее ход в каждом конкретном случае. Поэтому в данной работе также исследуется изменчивость давления на уровне тропопазы во время ВСП в январе 2009 г. Из рис. 2 не трудно увидеть, что рост температуры в стратосфере начался 16 января, а максимум пришелся на 23 число того же месяца, после чего температура начала падать. Профиль ветра вел себя схожим образом. Чтобы судить о временном ходе давления на уровне тропопазы, необходимо иметь представление о том, какие процессы и в каком направлении происходят в стратосфере. С этой целью были построены усредненные по декадам поля геопотенциальной высоты на уровне 30 гПа за 10 дней до максимума температуры, 10 во время максимума и 10 дней после максимума, представленные на рис. 3. Данные были взяты из реанализа MERRA-2. Из рис. 3 видно, что во время первой декады вихрь был спокоен, во время второй декады происходило его расщепление в сторону 90°

восточной и западной долгот. Во время третьей декады вихрь распался на две отдельные слабые циклонические циркуляции, а всю полярную область заняла антициклоническая циркуляция.

На рис. 4 изображены графики временного хода давления на уровне тропопазы, полученные по данным радиозондирования.

При детальном анализе можно увидеть, что на станции Иллоккортоормиут начиная с 23 января начинается увеличение давления на уровне тропопазы, что означает ее опускание, которое достигает своих максимальных значений 1 февраля, после чего начинает расти. В Диксоне наблюдается несколько другая ситуация. 17 февраля начинается резкое падение давления, которое достигает своего пика 19 февраля и в течение недели практически не меняется, а начиная с 26 января резко начинает повышаться. В Черском постепенное повышение давления начинается с 26 января и находит свой максимум 3 февраля, после чего резко возрастает, а потом снова уменьшается. Если сопоставить данные

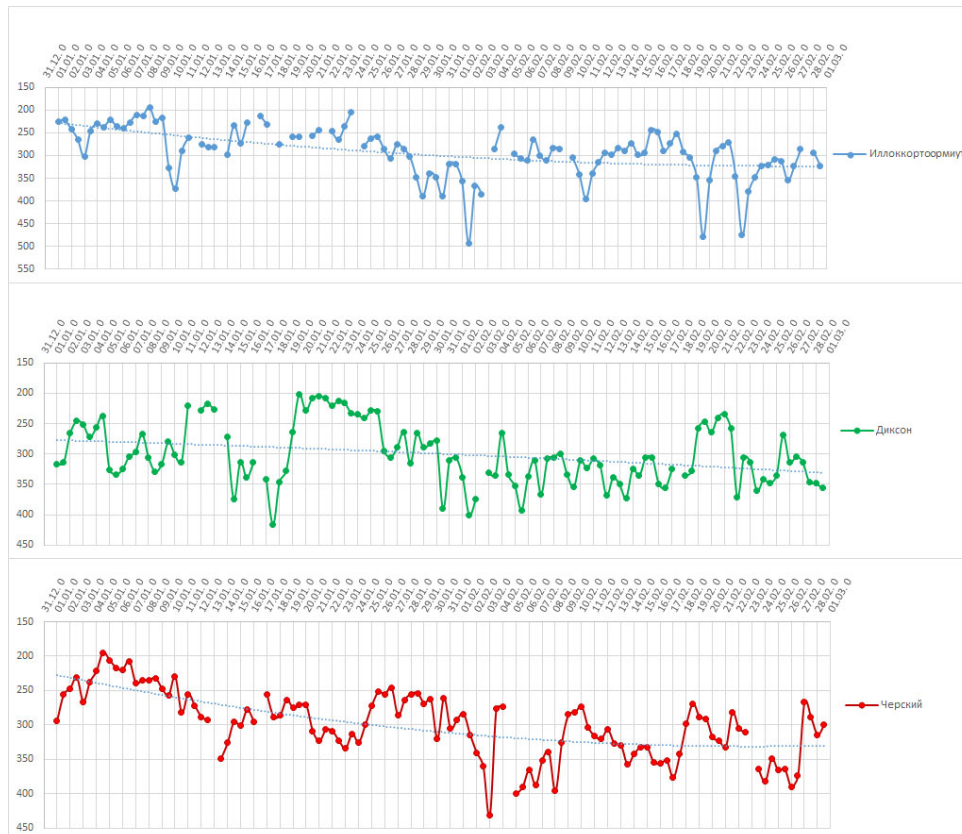


Рис. 4. Временной ход давления на уровне тропопазуы Иллоктортоормиут (верхняя панель), Диксон (средняя панель), Черский (нижняя панель)

из рис. 4 с рис. 3, то можно найти некоторую связь. Постепенное увеличение давления тропопазуы происходит на станциях (Иллоктортоормиут и Черский), над которыми в стратосфере во второй декаде наблюдается повышенные значения геопотенциальной высоты, причем максимумы давления приходятся на соседние даты. Стоит отметить, что имеется задержка между наступлением максимума температуры в стратосфере и наступлением максимальных значений давления в тропопазуе, которая равна приблизительно одной декаде. Над Диксоном же во время второй декады находилось ядро циклонического вихря, и при этом наблюдалось повышение тропопазуы, а начиная с 26 числа началось резкое понижение, которое привело тропопазу к наименьшим значениям 1 февраля, которое уже может быть связано с процессами, образующими поле геопотенциала в третьей декаде.

Основываясь на полученных данных, можно

предположить, что тропопазуа понижается во время ВСП в областях с высокими значениями геопотенциальной высоты и повышается в областях с низкими. Причем присутствует задержка порядка 10 дней между максимумом температуры в стратосфере и максимумом давления тропопазуы.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда РФ, грант №23-77-01035, <https://rscf.ru/project/23-77-01035/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Baldwin M.P., Ayarzagüena B., Birner T. et al. Sudden stratospheric warmings // *Rev. Geophys.* 2021. V. 59, iss. 1. e2020RG000708. <https://doi.org/10.1029/2020RG000708>.
- Butler A.H., Sjöberg J.P., Seidel D.J. et al. A sudden stratospheric warming compendium // *Earth Syst. Sci. Data.* 2017. V. 9, iss. 1. P. 63–76. <https://doi.org/10.5194/essd-9-63-2017>.

**СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ШКВАЛОВ,
ПРОХОДЯЩИХ ЧЕРЕЗ ВЫСОТНУЮ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКУЮ МАЧТУ
В Г. ОБНИНСК В 2014–2023 ГГ.**

Н.В. Вазаева^{1,2}, О.Г. Чхетиани¹, Г.С. Голицын¹, Л.К. Кулижникова^{3,1}, М.К. Мацкевич^{3,1}

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук, Москва, Россия, vazaevanv@ifaran.ru

²Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

³Научно-производственное объединение “Тайфун”, Калужская область, г. Обнинск, Россия

**STATISTICAL CHARACTERISTICS OF SQUALLS PASSING THROUGH
THE OBNINSK'S HIGH-ALTITUDE INSTRUMENTAL TOWER IN 2014–2023**

**Natalia V. Vazaeva^{1,2}, Otto G. Chkhetiani¹, Georgy S. Golitsyn¹, Liudmila K. Kulizhnikova^{3,1},
Mariya K. Matskevich^{3,1}**

¹A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Science, Moscow, Russia, vazaevanv@ifaran.ru

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

³Federal State Budgetary Institution Research and Production Association Typhoon, Obninsk, Kaluzhsky region, Russia

Аннотация. Шквалы — экстремальные погодные явления локального, внезапного характера, вопрос прогнозирования и выяснения причин формирования и развития которых до сих пор остается чрезвычайно актуальным. Шквалы могут обладать большой разрушающей силой и зачастую наносят значительный материальный ущерб, в частности, страдают линии электропередач и связи, повреждаются сельские постройки, нарушается работа точного оборудования и транспорта. Диагностика основных характеристик шквалов, примерная оценка ущерба возможна с использованием большого массива данных по скорости и направлению ветра, полученных с помощью высотной метеорологической мачты (ВММ) Института экспериментальной метеорологии ФГБУ «НПО «Тайфун» за 2014–2024 гг. с достаточной статистической достоверностью. Были получены первые результаты по статистическим распределениям основных диагностических характеристик — скорости, энергии и мощности ветра, — которые могут быть связаны с причинами формирования шквалов и сопутствующих им когерентных структур; а также оценены масштабы и энергии разрушения экстремальных событий, связанных с резким усилением ветра.

Ключевые слова: атмосферный пограничный слой, шквалы, статистические характеристики, данные наблюдений, высотная метеорологическая мачта.

Abstract. Squalls are extreme weather phenomena of a local, sudden nature, the issue of forecasting and elucidating the reasons for the formation and development of which remains extremely relevant. Squalls can have great destructive power and often cause significant material damage, in particular, power and communication lines are defected, rural buildings are damaged, and the operation of precision equipment and transport is disrupted. Diagnostics of the main characteristics of squalls and an approximate assessment of damage is possible using a large array of data on wind speed and direction obtained by the high-altitude instrumental tower of the Institute of Experimental Meteorology of the Federal State Budgetary Institution NPO Typhoon for 2014–2024 with sufficient statistical reliability. The first results were obtained on the statistical distributions of the main diagnostic characteristics - wind velocity, energy and power - which may be associated with the reasons for the formation of squalls and the coherent structures accompanying them; and the scale and destruction energy of such extreme events associated with a sharp increase in wind were assessed.

Keywords: atmospheric boundary layer, squalls, statistical characteristics, observational data, high-altitude meteorological mast.

ВВЕДЕНИЕ

На фоне значительного усиления интенсивности и частоты шквалов на территории России в последние годы чрезвычайно актуальными стали вопросы увеличения точности оперативного прогноза внезапных и локальных шквалов и шквалистых усилениях ветра, анализа причин их возникновения и оценке возможного приносимого ими ущерба. Эти вопросы тесно связаны с исследованием основных характеристик шквалов: скорости ветра — резкое усиление которой и являлось, в том числе, критерием выделения шквала, — энергии и мощности, то есть, по сути, третьей и четвертой степени скорости, являющихся индикаторами разрушительной силы, которая, в свою очередь, может привести к ощутимому ущербу экономике и населению. Классификация шквалов по скорости ветра [Хромов и др., 1974; Янькова и др., 2018]: слабые шквалы —

20 м/с, умеренные шквалы — 20–25 м/с, сильные шквалы — 25–30 м/с, особенно сильные шквалы — более 30 м/с. В этой работе мы выделяем и резкие усиления ветра до амплитуды скорости, меньшей 20 м/с.

На основе данных наблюдений, полученных на высотной метеорологической мачте (ВММ) Института экспериментальной метеорологии ФГБУ «НПО «Тайфун» за 2014–2024 гг. с хорошей статистической достоверностью можно выделить три основных группы шквалов [Вазаева и др., 2024]:

1. Шквалы при прохождении нескольких кучево-дождевых облаков днем, внутримассовых или перед холодным фронтом.

2. Шквал на холодном фронте.

3. Резкий шквал, когда скорость увеличивается от небольшой величины — от 0–6 м/с, — на величину, большую 15 м/с, за время до 5 мин, и с

практически вертикальной кривой изменения скорости на части этого промежутка времени.

Непрерывные ряды скорости и направления ветра, температуры и влажности воздуха являлись той базой данных, по которой определялись шквальные усиления скорости ветра в нижнем 300-метровом слое атмосферы и их характеристики. Своей внезапной универсальностью особенно интересен анализ, соответствующий статистическим распределениям основных диагностических характеристик — скорости и энергии, — которые могут быть связаны с причинами формирования шквалов и сопутствующих им когерентных структур, а также интерес представляет оценка масштабов и энергий разрушения экстремальных событий, связанных с резким усилением ветра. Первые результаты такого анализа показаны в настоящей работе.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИБОРНОЙ БАЗЫ И ПОЛУЧЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Для экспериментальной регистрации метеорологических параметров в 2014–2024 гг. приборы были установлены вблизи поверхности земли на метеоплощадке и на 5 уровнях высотной мачты: 25, 73, 121, 217 и 301 м. Скорость, направление ветра и температура воздуха регистрировались с частотой 1 раз в секунду, далее по ним вычислялись средние за 10 сек значения. Кроме пропеллерных датчиков ветра на ряде высот ВММ были установлены также акустические анемометры, измеряющие три компоненты скорости ветра, включая вертикальную составляющую скорости. Такими приборами являлись метеорологический комплекс МК-15 разработки ФГБУ «НПО «Тайфун» и акустический анемометр «Модель 81000V» фирмы R. M. YOUNG COMPANY, США. Подробно приборы описаны в [Вазаева и др., 2024].

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ОЦЕНКА ЭНЕРГИИ ШКВАЛОВ

С использованием описанных выше данных был проведен статистический анализ, оценены размеры и энергия шквалов. Для всех случаев были рассчитаны: время шквала, время усиления ветра, масштаб шквала, максимальная скорость, средняя скорость, коэффициенты масштаба, энергия, мощность и другие сопутствующие параметры. Степени скорости, в том числе для получения энергии и мощности, оценивались как интегральные значения, посчитанные с учетом шага уже усредненных за 10 сек. значений, методом трапеций. Наиболее интересные результаты показаны на рис. 1–4, в которых значения скорости, максимальной и осредненной, энергии, мощности, масштаба для разных и никак не связанных между собой шквалов, даже без учета деления на группы, ложатся на одну кривую с вероятностью примерно 95–98 %. Авторы предполагают здесь связь с турбулентностью и с субмезо-масштабными когерентными структурами.

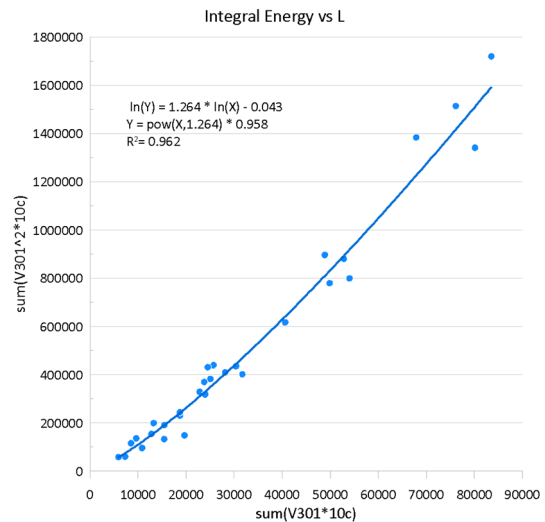


Рис. 1. Зависимость квадрата скорости (энергии) от масштаба шквала

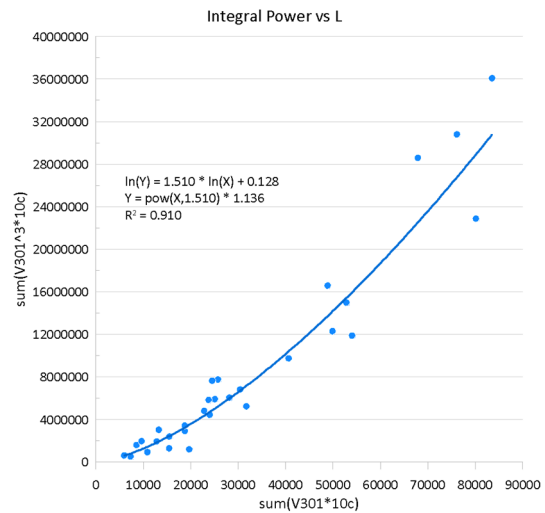


Рис. 2. Зависимость куба скорости от масштаба шквала

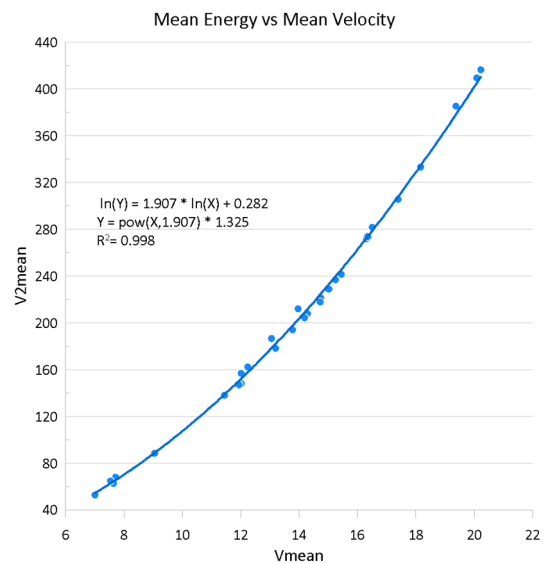


Рис. 3. Зависимость средних значений квадрата скорости (энергии) от осредненной скорости на протяжении всего шквала

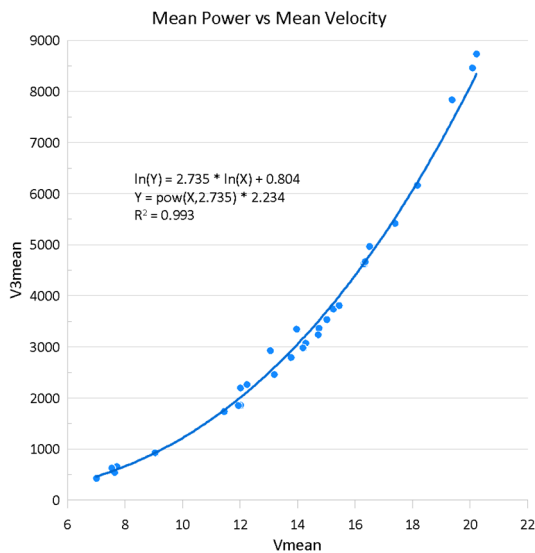


Рис. 4. Зависимость средних значений куба скорости (мощности) от осредненной скорости на протяжении всего шквала

Согласно теории Колмогорова А.Н. [Kolmogorov, 1934], квадрат скорости может быть получен $v^2 = c_1 * eps * t_1$, где $c_1 < 1$, откуда $eps = v^2 / c_1 * t_1$, где используется осредненная скорость, а площадь может быть выражена $s = c_3 * eps * t^3$, где c_3 находится в диапазоне 10–14, откуда можем получить оценку поперечного масштаба, который мы не можем померить с помощью лишь одной мачты, $l = (c_3/c_1)^{1/2} * v * t$, а отношение $(c_3/c_1)^{1/2} = ((10-14) / 1)^{1/2}$ примерно равно 3–4. То есть поперечные размеры шквалов в среднем могут быть больше в 3–4 раза. Для выводов окончательного соотношения можно воспользоваться результатами численного моделирования, например, сделанного Вазаевой и др. [2024] — где пространственные размеры в самом деле отличаются в несколько раз, для получения же более статистически обоснованной информации предполагается использовать большее количество частных случаев. По размерам шквалов можно оценить энергию разрушений через их характерные времена и форсинги.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проанализирован большой массив данных, полученных по шквалам и шквалистым усилениям ветра, проходящим через высотную метеорологическую мачту в Обнинске. Детально проведена

статистическая обработка случаев всех трех выделенных авторами ранее групп шквалов, зафиксированных на ВММ НПО «Тайфун» в 2014–2024 гг.

Статистическая обработка случаев со шквалами и смерчами (при скоростях ветра 25 м/с и более) ранее позволила выявить некоторые закономерности их возникновения [Грищенко, 2009], таких, как частота возникновения и районы, наиболее подверженные угрозе этих опасных явлений. Но точность и заблаговременность прогноза оставались недостаточными и до сих пор требуют дальнейшего изучения.

В настоящей работе показаны первые результаты анализа статистических распределений скорости, энергии и мощности, которые могут быть связаны с причинами формирования шквалов. Показано, что для разных и не связанных между собой событий усиления ветра, значения скорости, максимальной скорости и осредненной, энергии, мощности, масштаба, ложатся на одну кривую с вероятностью 95–98 %. Получена оценка масштабов и энергии разрушения исследуемых экстремальных событий. Используя теорию Колмогорова А.Н. [Kolmogorov, 1934], оценка поперечного масштаба шквала, который мы не можем померить с помощью лишь одной мачты, в среднем больше продольного в 3–4 раза.

Исследования выполнены при поддержке гранта РФФ (проект № 23-17-00273).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Вазаева Н.В., Кулижникова Л.К., Мацкевич М.К. Диагностика шквалов при прохождении через высотную метеорологическую мачту в г. Обнинск в 2014–2023 гг. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2024. (в печати).
- Грищенко И.В. Шквалы и смерчи на территории Архангельской области и Ненецкого автономного округа // Вестник поморского университета. Сер: Естественные науки. 2009. № 4. С. 5–10.
- Хромов С.П. Метеорологический словарь / С.П. Хромов, Л.И. Мамонтова. 3-е издание переработанное и дополненное. Л.: Гидрометеиздат. 1974. 568 с.
- Янькова Ю.С. и др. Шквалы на территории Иркутской области // Безопасность природопользования в условиях устойчивого развития. 2018. С. 54–61.
- Kolmogorov A.N. Zufallige Bewegungen // Annals of Mathematics. 1934. V. 35. P. 116–117.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММНО ОПРЕДЕЛЯЕМОГО РАДИО ДЛЯ МОНИТОРИНГА ВНЕЗАПНЫХ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Л.С. Варзарь, А.М. Падохин

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия,
varzar.ls18@physics.msu.ru

APPLICATION OF SOFTWARE-DEFINED RADIO FOR MONITORING OF SUDDEN IONOSPHERIC DISTURBANCES

L.S. Varzar, A.M. Padokhin

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia,
varzar.ls18@physics.msu.ru

Аннотация. В данной работе описывается разработанный программно определяемый приемник ОНЧ на основе программного обеспечения GNURadio. В результате работы приёмника были зафиксированы внезапные ионосферные возмущения, вызванные серией солнечных вспышек X и M класса в апреле–мае 2022 г. и частичным солнечным затмением в октябре 2022 г.

Ключевые слова: ОНЧ, GNURadio, внезапные ионосферные возмущения, солнечные вспышки, солнечное затмение

Abstract. This paper describes a software-defined VLF receiver based on the GNURadio software. The receiver recorded sudden ionospheric disturbances caused by a series of X- and M-class solar flares in April – May 2022 and by the solar eclipse in October 2022.

Keywords: VLF, GNURadio, sudden ionospheric disturbances, solar flares, solar eclipse

ВВЕДЕНИЕ

Одной из актуальных задач современной геофизики является исследование ионосферных возмущений, вызванных высокоэнергетическими геофизическими событиями, такими как солнечные вспышки, геомагнитные бури, протонные выбросы, гамма-вспышки, солнечные затмения, разряды молний и землетрясения. Данные явления оказывают существенное воздействие на *D*-слой ионосферы, изучение которого затруднительно из-за малой электронной концентрации [Митра, 1977]. Эффективным методом его изучения является зондирование в ОНЧ диапазоне. ОНЧ сигналы распространяются в волноводе Земли — ионосфера, верхней границей которого является *D*-слой. Вариации электронной концентрации в *D*-слое, вызванные внезапными ионосферными возмущениями, приводят к изменению параметров волновода и могут быть зарегистрированы в амплитудных и фазовых характеристиках ОНЧ сигналов.

В данной работе используется популярный в настоящее время благодаря наличию свободной среды разработки GNURadio [<https://www.gnuradio.org/>] программно ориентированный подход к построению ОНЧ приемника — детектора внезапных ионосферных возмущений, заключающийся в максимальном использовании методов цифровой обработки сигналов непосредственно в компьютере. Отметим, что с использованием данного подхода и среды GNURadio были разработаны применяемые в задачах томографии ионосферы УКВ приемники сигналов низкоорбитальных спутниковых радиомаяков [Vierinen et al., 2014], а также детектор внезапных ионосферных возмущений ОНЧ диапазона [Leesch, 2010], на программно-аппаратную реализацию которого мы во многом опирались в настоящей работе.

ПРОГРАММНО ОПРЕДЕЛЯЕМЫЙ ОНЧ ПРИЕМНИК

Учитывая пересечение частотных диапазонов ОНЧ радиоволн и звуковых волн, в качестве АЦП для регистрации ОНЧ сигналов можно использовать звуковую карту персонального компьютера. В настоящей работе была использована внешняя звуковая карта SBX X-Fi Surround 5.1 с частотой дискретизации 96 кГц, что позволяет принимать сигналы ОНЧ передатчиков в полосе 0–48 кГц. Звуковая карта была подключена через USB-порт к персональному компьютеру с операционной системой Linux Mint и установленной средой GNURadio. В качестве приёмной антенны использовалась всенаправленная, активная, электрическая, широкополосная (0–30 МГц) MiniWhip антенна, установленная на крыше физического факультета МГУ.

ПРИМЕР РЕГИСТРАЦИИ ВНЕЗАПНЫХ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Для тестирования разработанного приёмника и детектирования внезапных ионосферных возмущений в данной работе использовались сигналы двух европейских ОНЧ передатчиков: HWU (21.75 кГц) и DHO38 (23.4 кГц).

В период проведения тестовых экспериментов 30 апреля – 1 мая 2022 г. на Солнце была зарегистрирована серия вспышек M и X класса, самая интенсивная из которых (X1.1) произошла 30 апреля 2022 г. в 13:47 UT. На верхней панели рис. 2А) приведены вариации рентгеновского излучения Солнца в диапазоне 1–8 А по данным спутника GOES-16 во время солнечных вспышек. Не трудно заметить, что в момент прихода дополнительного ионизирующего излучения, вызванного солнечными вспышками, наблюдаются максимальные вариации интенсивности принятых сигналов.



Рис. 1. Схема программно определяемого ОНЧ-приемника

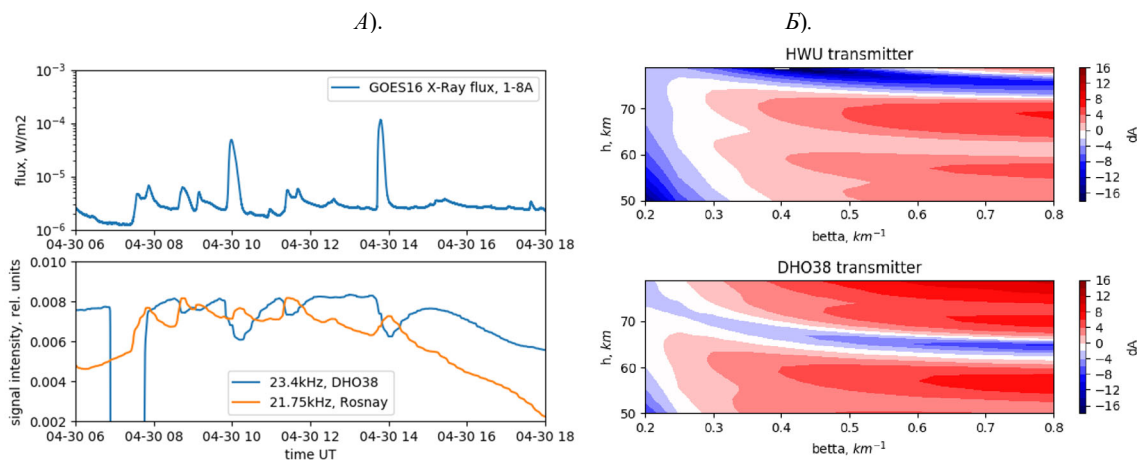


Рис. 2. А). Вариации рентгеновского излучения Солнца в диапазоне (1–8 А) по данным спутника GOES-16 (сверху) и вариации интенсивности ОНЧ сигналов станций DHO38 и HWU на приёмном пункте МГУ (снизу), 29 апреля – 2 мая 2022 г.; Б). Поле возможных значений амплитуды сигналов ОНЧ-передатчиков HWU и DHO38 на приемнике МГУ

Это связано с дополнительной ионизацией в D -слое, которая влияет на параметры распространения небесной ОНЧ волны. В случае со станцией HWU дополнительная ионизация в D -слое, вызванная вспышкой, приводит к увеличению интенсивности принимаемого сигнала, а в случае станции DHO38, наоборот, к уменьшению интенсивности. Это можно объяснить различной длиной радиотрасс, что приводит к тому, что сигналы небесной и земной волн для станций DHO38 и HWU приходят на приёмник с различным сдвигом фаз.

В работе сделана попытка оценить вариации электронной концентрации в D -слое во время рассматриваемой серии вспышек с использованием простейшей двухпараметрической модели [Wait, Spies, 1964], учитывающей эффективную высоту h' и крутизну β профиля. Для этого с помощью программы LWPC строились карты вариаций амплитуды (относительно невозмущенной) сигналов в широком диапазоне возможных значений β и h' . Такие карты для передатчиков DHO38, HWU и приемника в Москве приведены на рис. 2. Б).

Хорошо видно, что для трассы DHO38 – Москва по результатам численных расчетов наблюдается

уменьшение амплитуды сигнала при переходе от невозмущенных условий $\beta = 0.3 \text{ км}^{-1}$ и $h' = 74 \text{ км}$ в область меньших высот и большей крутизны профиля. В тоже время для трассы HWU – Москва напротив наблюдается увеличение амплитуды в той же области, что полностью согласуется с результатами эксперимента.

С использованием разработанного приемника были исследованы вариации ОНЧ сигналов одной из рассмотренных в работе станций (DHO38) в период частичного солнечного затмения 25 октября 2022 г. Они приведены на рис. 3, для сравнения также показан невозмущенный день 26 октября 2022 г. На рисунке также приведен процент перекрытия солнечного диска в точке приема сигналов. Хорошо видно, что увеличение интенсивности сигнала (по сравнению с невозмущенным днем) происходит при увеличении перекрытия площади солнечного диска. Положительные возмущения здесь можно сравнить с эффектами похожими на заход Солнца, т.е. увеличением эффективной высоты и уменьшением электронной концентрации, что согласуется с модельными расчётами, представленными на рис. 2Б).

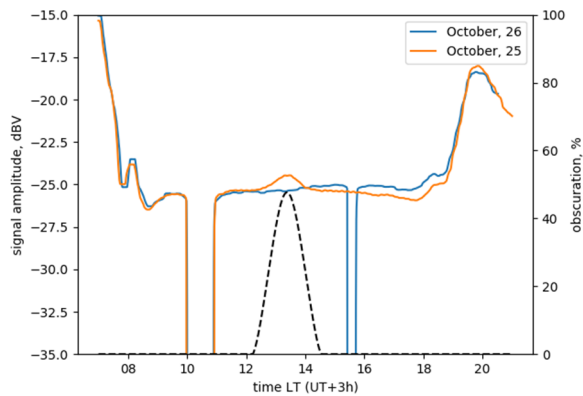


Рис. 3. Вариации интенсивности ОНЧ сигналов DHO38 25 октября 2022 г. (солнечное затмение) и 26 октября 2022 г., процент перекрытие солнечного диска 25 октября 2022 г. в Москве (пунктирная линия)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием технологии программно определяемого радио и библиотеки GNURadio был разработан и протестирован ОНЧ приёмник — детектор внезапных ионосферных возмущений. С его использованием наблюдались вариации амплитудных характеристик сигналов пары европейских ОНЧ передатчиков, вызванные серией солнечных вспышек М и X класса в конце апреля — начале мая

2022 г. и солнечным затмением в конце октября 2022 г. С использованием простейшей двухпараметрической модели проведены оценки возможных изменений h' и β во время вспышек. Для данного явления типичным откликом является уменьшение эффективной высоты и увеличение крутизны профиля. При этом основываясь исключительно на амплитудных измерениях с пары близких радиотрасс невозможно однозначно оценить значения этих параметров в периоды возмущения. Для этого необходимы данные с большего числа радиотрасс, а также фазовые измерения, которые на данный момент не реализованы на разработанном приемнике ОНЧ-сигналов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Митра А. Воздействие солнечных вспышек на ионосферу Земли. М. 1977.
- Leech M. Science without Hardware: Building an SDR SID Receiver in an Afternoon, SARA Proceedings, Mar. 20-21. 2010.
- Vierinen J., Norberg J., Lehtinen M.S. et al. Beacon satellite receiver for ionospheric tomography // Radio Sci. 2014. V. 49. P. 1141–1152. doi:10.1002/2014RS005434.
- Wait J.R., Spies K.P. Characteristics of the earth-ionosphere waveguide for VLF radio waves. 1964.
- URL: <https://www.gnuradio.org/>

ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МОЛНИЕВЫХ РАЗРЯДОВ

И.М. Вершинин, И.Ю. Зудин, М.Е. Гущин, П.А. Микрюков, Ю.В. Шлюгаев, А.А. Истомин

Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН,
Нижний Новгород, Россия, i.vershinin@ipfran.ru

LABORATORY MODELING OF PULSED ELECTROMAGNETIC RADIATION OF LIGHTNING DISCHARGES

I.M. Vershinin, I.Yu. Zudin, M.E. Gushchin, P.A. Mikryukov, Yu.V. Shlyugaev, A.A. Istomin

Federal Research Center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the RAS, Nizhny Novgorod, Russia

Аннотация. В настоящем докладе приводятся результаты экспериментального исследования параметров нано- и субнаносекундных импульсов, генерируемых положительным искровым разрядом длиной 1,3 м на генераторе Маркса с рабочим напряжением около 1 МВ. С помощью комплекта специальных импульсных электрических и магнитных датчиков и синхронной скоростной фотосъемкой удалось зарегистрировать волновые формы импульсного излучения, связать моменты его появления с фазами разряда. Излучение имеет вид одиночного сверхширокополосного электромагнитного импульса (СШП ЭМИ) длительностью около 0,5 нс и временем нарастания фронта около 200 пс. При помощи оригинальной схемы измерений выполнена пространственная локализация источника СВЧ излучения.

Ключевые слова: сверхширокополосный электромагнитный импульс, высоковольтный разряд, пробой воздуха, распространение стримеров, лабораторное моделирование

Abstract. This report presents the results of an experimental study of the parameters of nano- and subnanosecond pulses generated by a positive spark discharge of 1.3 m long on a Marx generator with an operating voltage of about 1 MV. Using a set of special pulsed electrical and magnetic sensors and synchronous high-speed photography, it was possible to register the waveforms of pulsed radiation and associate the moments of its appearance with the phases of the discharge. The radiation has the form of a single ultra-wideband electromagnetic pulse (EMP) with a duration of about 0.5 ns and a rise time of about 200 ps. Using an original measurement scheme, a spatial localization of the microwave radiation source was carried out.

Keywords: ultra-wideband electromagnetic pulse, high-voltage discharge, air breakdown, streamer propagation, laboratory modeling

Электромагнитное излучение длинных искровых разрядов, в том числе — молниевых, известно достаточно давно. В частности, мониторинг протяженных атмосферных разрядов свидетельствует о мощном радиоизлучении на частотах от десятков до сотен МГц [Brook, Kitagawa, 1964; Harvey, Lewis, 1973; Kachurin et al., 1974]. Натурные измерения импульсного радиоизлучения молний на частотах выше 1 ГГц сопряжены с множеством трудностей.

В последнее время развиваются теоретические и численные модели, предсказывающие генерацию СВЧ излучения высоковольтных разрядов в форме сверхширокополосных электромагнитных импульсов (СШП ЭМИ) нано- и субнаносекундной длительности, как следствие быстрых лавинно-стримерных процессов на малых пространственных масштабах [Kosarev et al., 1970; Cooray 2012; Luque, 2017]. Существуют экспериментальные работы, посвященные исследованию волновых форм излучения, возникающего при пробое воздушных промежутков различной длины при атмосферном давлении [Shi et al., 2019; Vernon et al., 2009; Mareev et al., 2023]. В частности, СВЧ излучение в форме отдельных всплесков субнаносекундной длительности было измерено на разряде в облаке заряженных капель [Gushchin et al., 2021] и на специальной установке для генерации импульсного излучения лавинно-стримерного разряда [Zudin et al., 2022]. Большой интерес представляет работа [Parkevich, 2023].

Перечисленные экспериментальные работы, в том числе последних лет, не являются исчерпывающими в вопросах характеристики излучения. Эти обстоятельства привели нас к проведению настоящего

исследования импульсного СВЧ излучения длинного искрового разряда на генераторе импульсных напряжений (ГИН), собранном по схеме Маркса [Mareev et al., 2023]. Длительность импульса ГИН изменяется от реализации к реализации в пределах 12–18 мкс, а амплитуда напряжения составляла примерно 800 кВ.

Регистрации СВЧ излучения осуществлялась измерительным полосковым преобразователем ИППЛ-Л [Sakharov et al., 2012], датчиком магнитного поля ТПМП и квазиупорной ТЕМ-антенной [Fedorov, 2021]. Используемые датчики позволяют правильно воспроизводить волновую форму импульсов нано- и субнаносекундной длительности.

В большинстве разрядов на установке ГИН 1 МВ был обнаружен импульс длительностью не более 1 нс и фронтом не более 0,5 нс. Такие импульсы различной амплитуды встречаются примерно в 70 % реализации искрового разряда. В некоторых реализациях импульс излучения регистрировался несколько раз. Такие импульсы обладают спектральными компонентами на частотах до нескольких ГГц. На рис. 1а–б приводятся осциллограммы сигнала с ИППЛ-Л после фильтрации при помощи цифрового ФВЧ. На рис. 1 с приведена осциллограмма исходного сигнала. На рис. 1д приведены осциллограммы с трех диагностик на наносекундной развертке. Сигнал магнитного датчика ТПМП приведен с коэффициентом 120 п, для удобства изображения осциллограммы в одних осях с сигналами электрических датчиков. Длительность фронта импульса составляет примерно 0,25 нс, а длительность самого импульса около 0,5 нс.

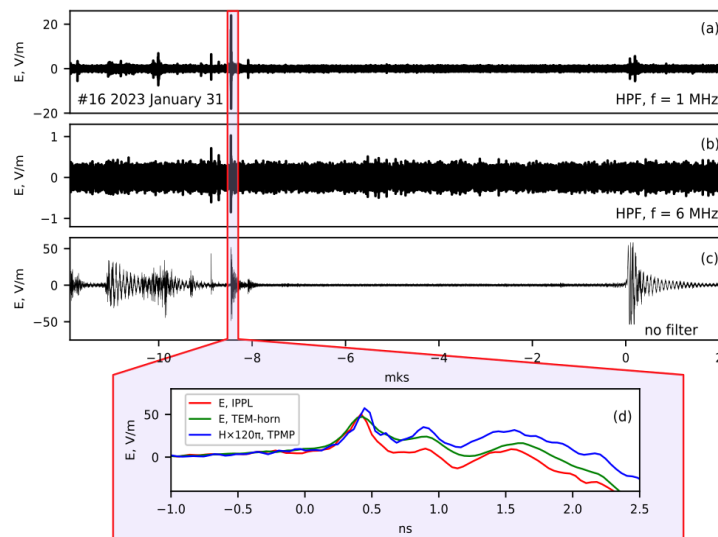


Рис. 1. Волновые формы сверхвысокочастотного излучения длинной искры. Сигнал с ИППЛ-Л после фильтрации при помощи цифрового ФВЧ с частотой среза а) 1 ГГц и б) 6 ГГц; с) исходный сигнал, зарегистрированный ИППЛ-Л, на микросекундной временной развертке; с) волновые форма наносекундного импульса: зарегистрированная при помощи ИППЛ-Л (соответствует рис. 3а–с), а также датчиками ТЕМ-антенна и ИППЛ-Л

Набор фотографий, полученных в ходе экспериментов, был отсортирован относительно момента времени регистрации СШП импульса. На каждой фотографии приведена шкала времени, где за момент времени «0» (широкая белая метка) принято время, в которое регистрировался искомым импульс. Тонкая красная метка соответствует моменту времени, в который сделана фотография (значение времени фотосъемки указано в наносекундах над шкалой времени). Введение такой системы времени позволило достаточно точно иллюстрировать стадии разряда. Фотография 2 е сделана за 180 нс до момента регистрации СВЧ. На этой фотографии хорошо видно, что на заземленном электроде присутствует свечение, обусловленное стартов контрастимера. Фотография на рис. 2f сделана через 24 нс после момента регистрации СВЧ. Можно сделать вывод, что вспышка на нижнем электроде предшествует появлению СВЧ импульса.

Эксперимент на установке ГИН 1 МВ включал измерения, направленные на локализацию источника обнаруженного СВЧ излучения. Измерения проводились с использованием двух измерительных диагностик: ТЕМ-антенны и ТПМП. ТЕМ-антенна использовалась как независимая антенна, которая оставалась неподвижной в ходе эксперимента. Длины кабелей двух диагностик выбраны одинаковыми. Датчик магнитного поля ТПМП в ходе эксперимента перемещался по вертикали.

Расстояние от уровня пола до предполагаемого источника наносекундного импульса обозначим h . Датчик магнитного поля ТПМП размещался на штативе на высоте H над уровнем пола. Расстояние между разрядным промежутком и подставкой с ТПМП в горизонтальной плоскости составляло l_0 . Можно рассмотреть два момента времени t_0 и t_1 , которые соответствуют временам прихода сигнала наносекундного импульса на ТЕМ-антенна и ТПМП соответственно; $\delta t = t - t_0$. Таким

образом, задача минимизации принимает следующий вид:

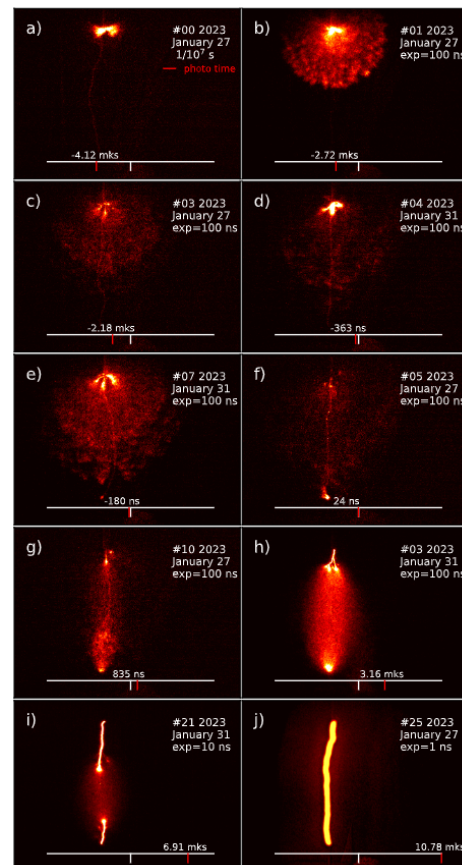


Рис. 2. Феноменология развития разряда на установке ГИН — 1 МВ. (а) Первые вспышки и рост нескольких лидеров на верхнем электроде; (б–е) рост стримерной короны с верхнего (потенциального) электрода в сторону нижнего (заземленного) электрода; (ф) фотография первых вспышек на нижнем электроде; (е) фотография, сделанная через 24,6 нс после прохождения СВЧ импульса; (г–и) развитие восходящего лидера навстречу восходящему; (j) обратный удар

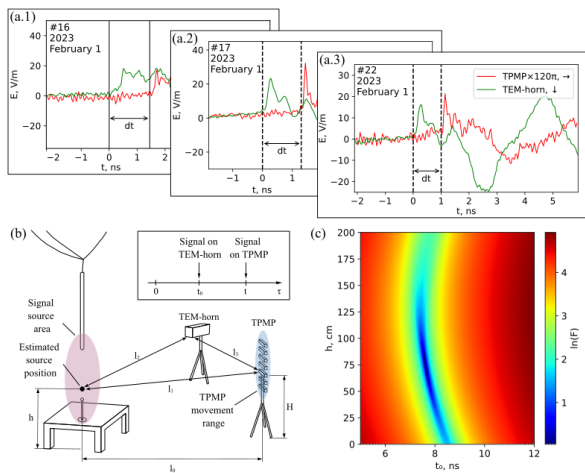


Рис. 3. Обнаружение источника СВЧ излучения, возбуждаемого длинной искрой в пространстве. а.1)–а.3) Способ вычисления задержки между сигналами, зарегистрированными разными диагностиками; б) схема пространственного размещения измерительной аппаратуры; в) графическое представление решения задачи минимизации в плоскости параметров (t_0, h)

Решение задачи минимизации выражения в плоскости параметров (t_0, h) по переменным $t_{0s} \in t_0, h_s \in h$ показано на рис. 3. На рис. 3а.1–3а.3 приводится общая методика определения задержки регистрации сигнала при помощи двух диагностик. На рис. 3в приведена схема расположения оборудования в ходе эксперимента. На рис. 3с приводится численное решение задачи минимизации. Минимальное значение невязки соответствует параметру $h \approx 70$ см. Высота нижнего электрода над полом составляет 85 см. Таким образом, источник СВЧ излучения локализован в непосредственной близости от нижнего электрода.

Работа была поддержана в рамках 10 проекта Национального центра физики и математики (НЦФМ) «Экспериментальная лабораторная астрофизика и геофизика» и Госзадания № 0030-2021-0028 «Лабораторное и численное моделирование нестационарных плазменных процессов в атмосфере и космосе».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Brook M., Kitagawa N. Radiation from lightning discharges in the frequency range 400 to 1000 mc/s // *J. Geophys. Res.* 1964. V. 69(12). P. 2431–2434.
- Harvey R.B., Lewis E.A. Radio mapping of 250- and 925-megahertz noise sources in clouds // *J. Geophys. Res.* 1973. V. 78(12). P. 1944–1947.
- Kachurin L.G., Karmov M.I., Medaliyev H.H. Osnovnyye kharakteristiki radioizlucheniya konvektivnykh oblakov // *Izvetiya Akademii nauk SSSR. Fizika Atmosfery i Okeana.* 1974. V. 10(11). P. 1164. (in Russian).
- Kosarev E.L., Zatsepin V.G., Mitrofanov A.V. Ultrahigh frequency radiation from lightnings // *J. Geophys. Res.* 1970. V. 75(36). P. 7524–7530.
- Cooray V., Cooray G. Electromagnetic radiation field of an electron avalanche // *Atmospheric Res.* 2012. V. 117. P. 18–27.
- Luque A. Radio frequency electromagnetic radiation from streamer collisions // *J. Geophys. Res.: Atmospheres.* 2017. V. 122(19). P. 10497–10509.
- Shi F., Liu N., Dwyer J. R., Ihaddadene K.M.A. VHF and UHF electromagnetic radiation produced by streamers in lightning // *Geophys. Res. Lett.* 2019. V. 46(1). P. 443–451. <https://doi.org/10.1029/2018gl080309>.
- Cooray V., Arevalo L., Rahman M. et al. On the possible origin of X-rays in long laboratory sparks // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Phys.* 2009. V. 71, iss. 17–18. P. 1890–1898.
- Parkevich E.V. Natural sources of intense ultra-high-frequency radiation in high-voltage atmospheric discharges // *Phys. Rev. E.* 2023. V. 108, N 2.
- Mareev E.A., Shlyugaev Y.V., Shatalina M.V. et al. X-Ray and Gamma Radiation of Lightning Discharge: Orbital Observations and Laboratory Simulation in Experiments with Long Sparks // *Astron. Rep.* 2023. V. 67. P. 104–114.
- Gushchin M.E., Korobkov S.V., Zudin I.Y. et al. Nano-second electromagnetic pulses generated by electric discharges: Observation with clouds of charged water droplets and implications for lightning // *Geophys. Res. Lett.* 2021. V. 48. e2020GL092108.
- Zudin I., Gushchin M., Vershinin I. et al. Amplitude–Temporal and Spectral Characteristics of Pulsed UHF-SHF Radiation of a High-Voltage Streamer Discharge in Air under the Atmospheric Pressure // *Energies.* 2022. V. 15. P. 9425.
- Sakharov K.J., Mikheev O.V., Turkin V.A. et al. Device for measuring parameters of electromagnetic pulse with ultrashort rise time // *Russian Federation patent.* 2012. RU2468375C1.
- Fedorov V.M. Antenna Array with TEM-Horn for Radiation of High-Power Ultra Short Electromagnetic Pulses // *Electronics.* 2021. V. 10. P. 1011.

ВЛИЯНИЕ СУПЕР-ЭЛЬ-НИНЬО НА ГЛОБАЛЬНУЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ЦЕПЬ

А.В. Волкова, Н.Н. Слюняев, Ф.Г. Сарафанов

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук, Нижний Новгород, Россия,
a.volkova@ipfran.ru

THE IMPACT OF SUPER EL NINO ON THE GLOBAL ELECTRICAL CIRCUIT

A.V. Volkova, N.N. Slyunyaev, F.G. Sarafanov

A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia,
a.volkova@ipfran.ru

Аннотация. Глобальная электрическая цепь — это концепция, описывающая распределение электрических токов в атмосфере. Существенную роль в образовании электрически активных облаков, служащих источниками электродвижущей силы, играет, так называемое, Эль-Ниньо Южное колебание (ЭНЮК). ЭНЮК проявляется в колебании температуры поверхностного слоя воды в экваториальной части Тихого океана. Данное исследование направлено на изучение связей между ГЭЦ и ЭНЮК. Изменчивость ГЭЦ моделируется на основе метеорологических данных, данных реанализа, математической модели Weather Research and Forecasting, а также параметризации ионосферного потенциала. Результаты показывают, что сильные Эль-Ниньо влияют на суточную изменчивость ионосферного потенциала.

Ключевые слова: Глобальная электрическая цепь, Эль-Ниньо Южное колебание, ионосферный потенциал.

Abstract. The global electric circuit is a concept describing the distribution of electric currents in the atmosphere. An essential role in the formation of electrically active clouds, which serve as sources of electromotive force, is played by the so-called El Niño Southern Oscillation (ENSO). ENSO manifests itself in fluctuations in the temperature of the surface water layer in the equatorial Pacific Ocean. This study is aimed at studying the links between GEC and ENSO. The variability of the GEC is modeled on the basis of meteorological data, reanalysis data, a mathematical model of Weather Research and Forecasting, as well as parameterization of the ionospheric potential. The results show that strong El Niño influences the diurnal variability of the ionospheric potential.

Keywords: Global electric circuit, El Niño Southern Oscillation, ionospheric potential.

ВВЕДЕНИЕ

Глобальная электрическая цепь (ГЭЦ) — распределенный токовый контур, образованный поверхностью Земли и нижними слоями ионосферы. Основными источниками ЭДС, поддерживающими потенциал ионосферы относительно Земли, служат электрически активные облака [Williams, 2009]. Из-за распределения зарядов внутри облаков, обычно электрический ток течет вверх к ионосфере в областях, занятых такими облаками, и стекает вниз к Земле в регионах, где данные облака отсутствуют. Недавние исследования подчеркивают роль ГЭЦ как важнейшего компонента земной системы. Так, ранее уже была показана связь ГЭЦ с некоторыми климатическими явлениями, например, Эль-Ниньо Южное колебание (ЭНЮК) и Колебание Маддена-Джулиана.

ЭНЮК — это крупномасштабная климатическая мода, возникающая в результате взаимодействия тропической части Тихого океана и атмосферы [McPhaden et al., 2020]. Цикл ЭНЮК состоит из теплой фазы (Эль-Ниньо), когда температура поверхности центральной части Тихого океана повышается на несколько градусов, и холодной фазы (Ла-Нинья), когда температура поверхности океана понижается [Philander, 1985]. Это масштабное изменение климата Земли вызывает разнообразные последствия по всему земному шару. В последнее время события Эль-Ниньо так сильно изменились, что был выявлен новый тип Эль-Ниньо, т.н. супер-Эль-Ниньо [Hong et al., 2014]. Супер-Эль-Ниньо отличается не только чрезвычайно сильными аномалиями температуры поверхности океана, но и связанными с ними последствиями, такими как, например, поперечная циркуляция Южного полушария. Ранее

уже было показано существование взаимосвязи между ЭНЮК и ГЭЦ, однако эти исследования не уделяли должного внимания супер-событиям.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для моделирования динамики атмосферы в данной работе использовалась модель Weather Research and Forecasting (WRF) в глобальном режиме моделирования с пространственным разрешением $1^\circ \times 1^\circ$ и с 51 уровнем высот. Всего проведено 5114 расчетов для каждого третьего дня с 1 января 1980 г. по 30 декабря 2021 г. Для исследования влияния супер-событий на ионосферный потенциал использовалась параметризация, предложенная в [Slyunyaev et al., 2019]. Данная параметризация учитывает многие атмосферные параметры и позволяет с большой точностью описывать ионосферный потенциал.

Также в данной работе были использованы экспериментальные данные о градиенте потенциала, полученные с метеорологической станции Восток, расположенной в Арктике. Всего в работе были использованы данные с 1 января 2006 г. по 31 декабря 2020 г. [Burns et al., 2012].

Для определения фаз Эль-Ниньо использовались данные архива Хэдли центра [Rayner et al., 2003], включающие данные о температуре поверхности океана. Супер-Эль-Ниньо определялись по превышению 1.5°C аномалии 5-месячного скользящего среднего температуры поверхности океана в регионе Niño 3.4. Всего в период с 1980 по 2021 гг. попало три супер-Эль-Ниньо: 1982/83 гг., 1997/98 гг. и 2015/16 гг. Данные станции Восток включают только одно супер-событие, 2015/16 гг.

На рис. 1а)–1г) черным цветом показана суточная вариация ионосферного потенциала (градиента потенциала), усредненная по 5-месячному промежутку времени с октября по февраль включительно (данный промежуток времени был выбран из-за достижения фазы Эль-Ниньо максимума именно в это время года) и по всем годам исследования. Красным цветом показана аналогичная суточная вариация для отдельных лет исследования, в которые наблюдались супер-Эль-Ниньо. Прерывистыми линиями показаны стандартные ошибки соответствующих кривых. Из рис. 1 можно видеть, что каждое отдельное событие искажает суточную вариацию ионосферного потенциала (градиента потенциала). Мы можем видеть статистически значимое уменьшение ионосферного потенциала с 16 по 20 ч по UTC

и увеличение ионосферного потенциала с 8 до 12 ч по UTC.

На рис. 2–3 показаны суточные вариации ионосферного потенциала (рис. 2) и градиента потенциала (рис. 3) во время сильных Ла-Нинья, аналогичные представленным на рис. 1 для Эль-Ниньо. Сильные Ла-Нинья, аналогично супер-Эль-Ниньо, определялись по превышению индекса Niño 3.4 1.5 °C, но с отрицательным знаком. Результаты, представленные на рис. 1–3 показывают явную асимметрию между фазами Эль-Ниньо и Ла-Нинья. Супер-Эль-Ниньо сильно искажают суточную вариацию ионосферного потенциала (градиента потенциала), в то время как сильные Ла-Нинья не имеют одинакового для всех событий влияния на ионосферный потенциал (градиент потенциала).

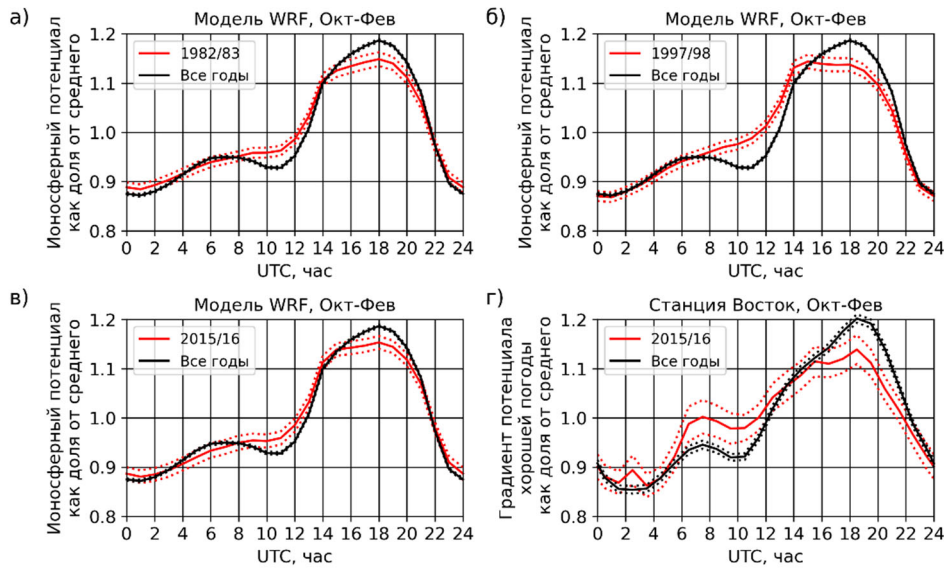


Рис. 1. Суточная вариация во время супер-Эль-Ниньо: а)–в) ионосферного потенциала, полученная при помощи данных модели WRF (для периода с 1980 г. по 2021 г.); г) градиента потенциала, полученная при помощи данных станции Восток (для периода с 2006 г. по 2020 г.)

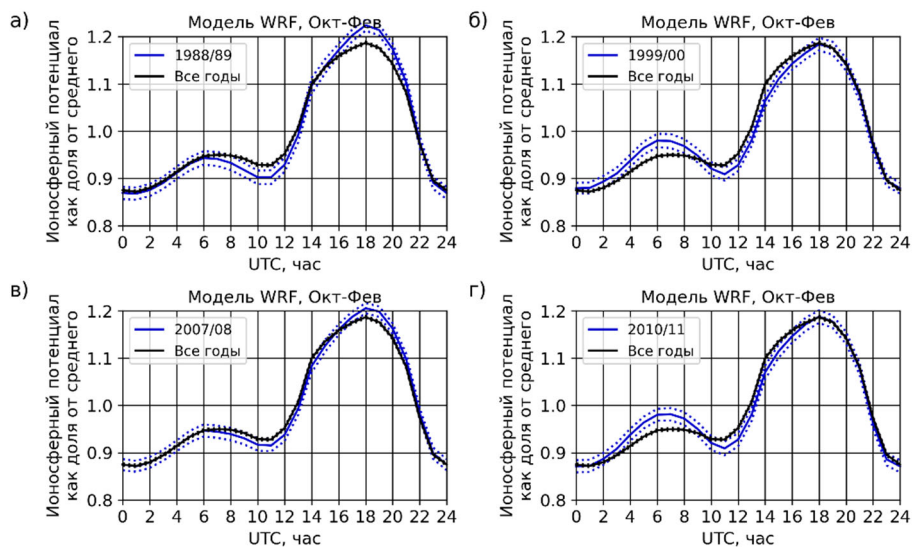


Рис. 2. Суточная вариация ионосферного потенциала во время сильных Ла-Нинья, полученная при помощи данных модели WRF (для периода с 1980 г. по 2021 г.)

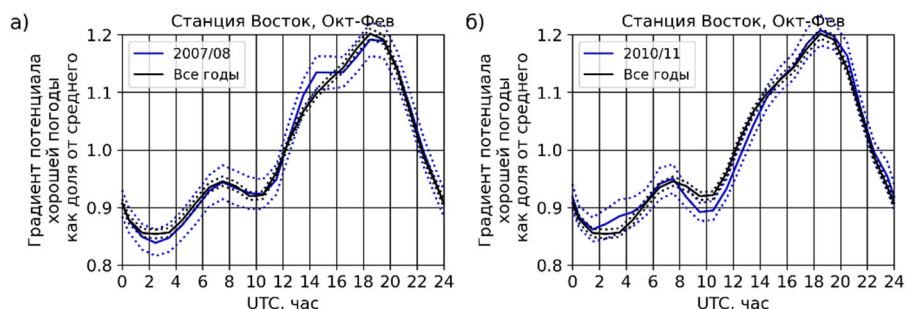


Рис. 3. Суточная вариация градиента потенциала во время сильных Ла-Нинья, полученная при помощи данных станции Восток (для периода с 2006 г. по 2020 г.)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Моделирование изменчивости ГЭЦ позволяет нам выявить статистически значимую связь между ГЭУ и супер-Эль-Ниньо. Сильные явления Эль-Ниньо и Ла-Нинья влияют на глобальное распределение электрически активных облаков в атмосфере Земли, которые в свою очередь влияют на форму суточной изменчивости ионосферного потенциала. На пике супе-событий (в декабре) относительное значение суточного потенциала уменьшается в 8:00–12:00 UTC и увеличивается в 16:00–20:00 UTC. Однако, данный эффект не заметен на сильных Эль-Ниньо. Во время сильных Эль-Ниньо суточная вариация ионосферного потенциала остается практически неизменной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Burns G.B., Tinsley B.A., Frank-Kamenetsky A.V. et al. Monthly Diurnal Global Atmospheric Circuit Estimates

Derived from Vostok Electric Field Measurements Adjusted for Local Meteorological and Solar Wind Influences // *J. Atmos. Sci.* 2012. V. 69, N 6. P. 2061–2082.

Hong L.-C., LinHo, Jin F.-F. A Southern Hemisphere booster of super El Niño // *Geophys. Res. Lett.* 2014. V. 41, N 6. P. 2142–2149.

McPhaden, M.J., Santoso, A., & Cai, W. El Niño Southern Oscillation in a changing climate (Geophysical Monograph Series 253). John Wiley & Sons, Inc.—American Geophysical Union 2020. 502 p.

Philander S. El Niño and La Nina // *J. Atmos. Sci.* 1985. V. 42. P. 2652–2662.

Rayner N.A., Parker D.E., Horton E.B. et al. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108, N D14. P. 4407.

Slyunyaev N.N., Ilin N.V., Mareev E. A. Modeling contributions of continents and oceans to the diurnal variation of the global electric circuit // *Geophys. Res. Lett.* 2019. V. 46, N 10. P. 5516–5525.

Williams E. R. The global electrical circuit: A review // *Atm. Res.* 2009. V. 91, N 2. P. 140–152.

СУТОЧНЫЕ ВАРИАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК СПОРАДИЧЕСКОГО СЛОЯ ES НАД ИРКУТСКОМ

Е.А. Воронова, К.Г. Ратовский

Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия,
vreaaj@mail.ru

DIURNAL VARIATIONS IN ES SPORADIC LAYER CHARACTERISTICS OVER IRKUTSK

E.A. Voronova, K.G. Ratovsky

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, vreaaj@mail.ru

Аннотация. Для исследования морфологических особенностей спорадического слоя *Es* велась работа с такими параметрами как вероятность наблюдения (PEs) и высота (hEs) слоя на основе данных Иркутского ионозонда DPS-4 (52.3 N, 104.3 E) за 2003–2021 гг. Путем усреднения за все года рассчитывались суточные вариации PEs и hEs для каждого месяца. Работа концентрируется на морфологических особенностях полусуточных вариациях вероятности PEs и высоты hEs над Иркутском. Выявлены следующие особенности: (1) максимумы вероятности PEs достигаются при спаде высоты hEs; и (2) наблюдается асимметрия максимумов вероятности PEs: утренние максимумы больше вечерних. Эти особенности интерпретируются на основе понятия оптимальной высоты для образования *Es* и роли фотоионизации в формировании спорадического слоя.

Ключевые слова: спорадический слой, суточные вариации, вероятность наблюдения, высота, полусуточные приливы.

Abstract. To study the morphological features of the sporadic *Es* layer, we worked with such parameters as the occurrence (PEs) and height (hEs) of the layer based on data obtained at the Irkutsk DPS-4 ionosonde (52.3 N, 104.3 E) in 2003–2021. By averaging over all years, diurnal variations in PEs and hEs were calculated for each month. The paper focuses on the morphological features of semidiurnal variations in occurrence PEs and height hEs over Irkutsk. The following features were revealed: (1) the maximum of occurrence PEs is achieved when the height hEs decreases; and (2) there is an asymmetry in the maximum of occurrence PEs: morning maxima are larger than evening ones. These features are interpreted based on the concept of the optimal height for *Es* formation and the role of photoionization in the formation of the sporadic layer.

Keywords: sporadic layer, diurnal variations, occurrence, height, semidiurnal tides.

ВВЕДЕНИЕ

Спорадический слой *Es* представляет собой тонкий слой плазмы металлических ионов, формируемый на высотах *E*-слоя от 90 до 130 км. Общепринятой концепцией формирования слоя *Es* является механизм ветрового сдвига [Haldoupris, 2011]. Вертикальные сдвиги зонального и меридионального ветра приводят к встречному дрейфу металлических ионов метеорного происхождения, что приводит к образованию тонкого слоя с высокой электронной концентрацией. Спорадический слой *Es* подвержен суточным изменениям, что выражается в суточных вариациях его параметров. На данный момент нет полного понимания, почему для определенной географической местности и определенного времени года реализуется тот или иной тип суточных вариаций. Это сложный вопрос, требующий дальнейших исследований. Данная работа посвящена исследованию суточных вариаций вероятности наблюдения и высоты спорадического слоя, выявлению морфологических особенностей суточных вариаций и их интерпретации.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ

Использовались данные ионозонда вертикального зондирования DPS-4, установленного в пункте с координатами 52.3° N, 104.3° E (Иркутск), с временным разрешением 15 мин за 2003–2021 гг. В качестве характеристик спорадического слоя были выбраны высота (hEs), полученная усреднением значений для данного месяца и местного времени за 2003–2021 гг., и вероятность наблюдения (PEs), рассчитанная как отношение количества наблюдений *Es* к полному

количеству измерений за 2003–2021 гг. для данного месяца и местного времени.

СУТОЧНЫЕ ВАРИАЦИИ ВЕРОЯТНОСТИ И ВЫСОТЫ

На рисунках 1 и 2 представлены суточные вариации для всех месяцев вероятности наблюдения PEs и высоты hEs спорадического слоя *Es*, соответственно. Из рисунка видно доминирование полусуточной составляющей для hEs с февраля по ноябрь и для PEs в феврале и с апреля по сентябрь. По всей видимости, доминирование полусуточной составляющей в суточных вариациях hEs является следствием полусуточных приливов в вариациях нейтрального ветра [Haldoupris, 2011]. При этом причина доминирования полусуточной составляющей в суточных вариациях PEs в настоящее время остается открытым вопросом. Для выявления связи полусуточных составляющих hEs и PEs рассмотрим более детально суточные вариации hEs и PEs в июне и июле, когда вероятности наблюдения слоя *Es* максимальны (рис. 3).

Из рис. 3 видно, что суточные минимумы PEs наблюдаются на фазах роста hEs, а суточные максимумы PEs – на фазах спада hEs. Утренний и вечерний максимумы hEs близки друг к другу, тогда как утренний максимум PEs больше, чем вечерний. Как вариации hEs, так и вариации PEs демонстрируют хорошо выраженную полусуточную составляющую (максимумы в утреннее и вечернее время), однако сами вариации hEs и PEs не совпадают, показывая, как бы запаздывание PEs относительно hEs.

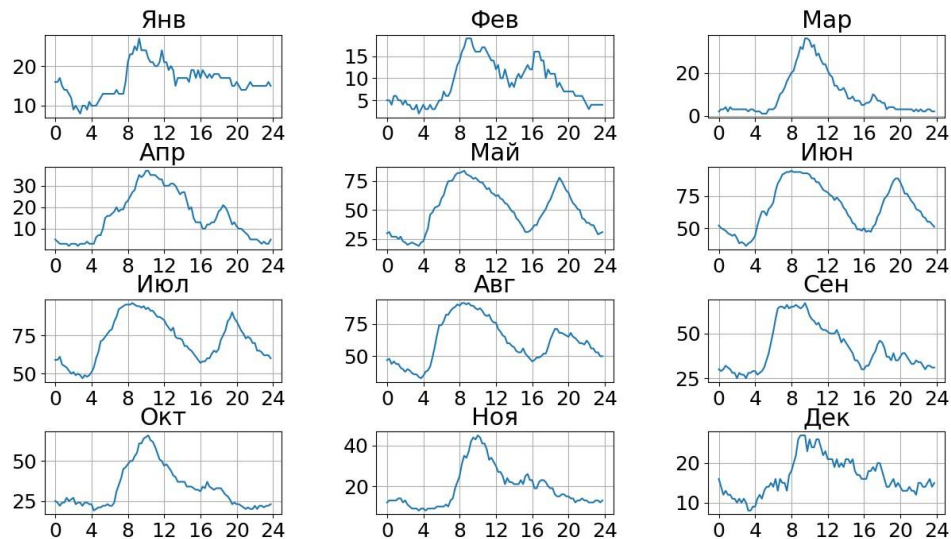


Рис. 1. Суточные вариации вероятности наблюдаемости PEс спорадического слоя Es

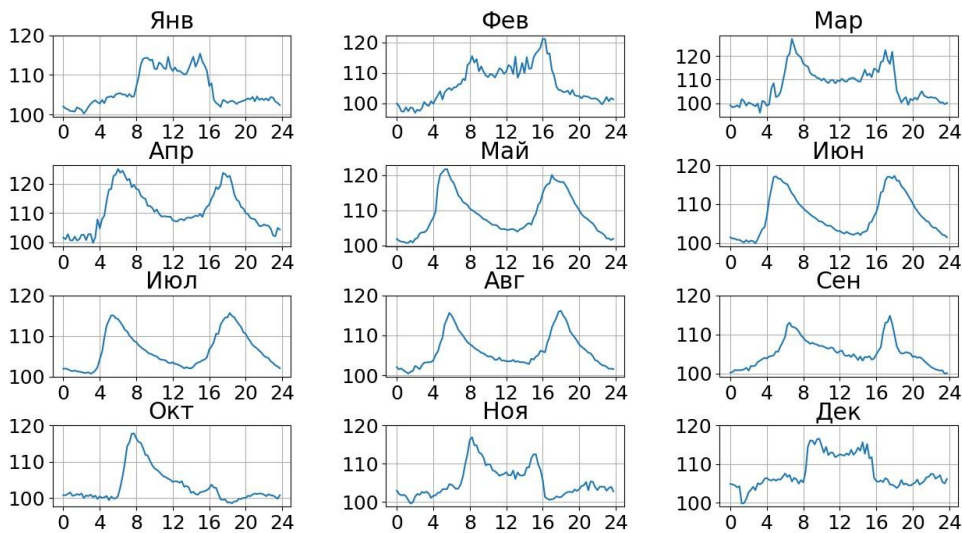


Рис. 2. Суточные вариации высоты hEs спорадического слоя Es

Подобная тенденция задержек максимумов PEс относительно максимумов hEs справедлива для всех месяцев, где достаточно хорошо выражена полусуточная составляющая PEс (рис. 1, 2). Для объяснения этой закономерности рассмотрим факторы [Haldoupis et al., 2023], влияющие на эффективность образования Es в зависимости от высоты. (1) С ростом высоты уменьшается скорость рекомбинации металлических ионов, что способствует повышению PEс с ростом высоты. (2) С ростом высоты уменьшается эффект столкновения ионов и нейтралов, препятствующего сближению ионов, что также способствует повышению эффективности образования Es с ростом высоты (3) Процесс термоабляции атомов и ионов металлов (высвобождения за счет интенсивного фрикционного нагрева) происходит преимущественно на высотах от 80 до 110 км, что способствует понижению эффективности образования Es с ростом высоты. С учетом всех трех факторов можно предположить, что существует оптимальная высота для образования спорадического слоя. Исходя из рисунков 1–3, можно предположить, что такая высота для летних месяцев находится в диапазоне 107–110 км в утреннее время и в диапазоне 111–115 км в вечернее время.

Суточная составляющая PEс (дневные значения превышают ночные) может быть объяснена суточной составляющей hEs (дневные значения превышают ночные), однако, наш взгляд, существуют факторы, для объяснения которых необходимо привлекать фотоионизацию металлических атомов. Из рис. 3 видно, что для приблизительно одного и того же диапазона hEs дневные значения PEс заметно превышают ночные. В июне диапазон hEs 102–103 км соответствует 13–14 LT и 23–23:30 LT, при этом в дневное время PEс меняется от 72 до 79 %, а в ночное время составляет ~ 62 %. В июле hEs ~ 102 км соответствует 13–14 LT и 23:30–23:45 LT, при этом в дневное время PEс меняется от 57 до 60 %, а в ночное время составляет ~ 50 %. Другим фактором, объясняемым эффектом фотоионизации, является асимметрия утреннего и вечернего максимума PEс. Максимумы PEс больше утром чем вечером, а высоты, соответствующие максимумам PEс больше вечером чем утром. Данная асимметрия может объясняться тем, что утренний спад hEs приходится на рост фотоионизации, а вечерний спад hEs — на спад фотоионизации.

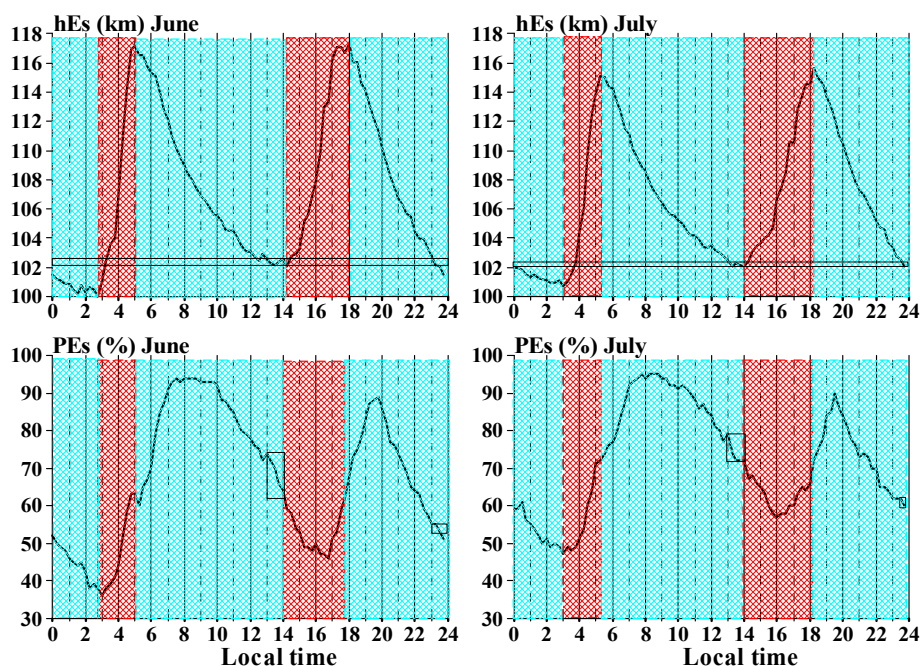


Рис. 3. Суточные вариации hEs (вверху) и PEs (внизу) для июня и июля, фазы роста hEs заштрихованы красным, фазы спада hEs — синим. Вверху прямоугольниками показаны диапазоны изменения hEs для 13–14 LT (вблизи дневного минимума hEs). Внизу прямоугольниками показаны диапазоны изменения PEs, соответствующие диапазонам изменения hEs на верхнем рисунке

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным фактором, объясняющим доминирование полусуточной составляющей в суточных вариациях hEs, являются полусуточные приливы в вариациях нейтрального ветра [Haldoupis, 2011]. Доминирование полусуточной составляющей в суточных вариациях PEs может объясняться существованием оптимальной высоты для образования спорадического слоя и преимущественно полусуточными вариациями hEs. Дополнительным фактором, влияющим на суточные вариации PEs, является

фотоионизация металлических атомов (вероятность образования Es пропорциональна фотоионизации).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Haldoupis C.A. Tutorial Review on Sporadic E Layers // *Aeronomy of the Earth's Atmosphere and Ionosphere*. 2011. P. 381–389. DOI:10.1007/978-94-007-0326-1_29
- Haldoupis C., Haralambous H., Meek C. et al. Understanding the diurnal cycle of midlatitude sporadic E. The role of metal atoms // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2023. V. 128, iss. 4. URL: <https://doi.org/10.1029/2023JA031336>

РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ НА РАДИОФИЗИЧЕСКИХ СРЕДСТВАХ ИСЗФ СО РАН

Н.А. Громик, В.А. Ивонин, В.П. Лебедев

Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия, nikita.1911@yandex.ru

DEVELOPMENT OF AN INFORMATION SYSTEM FOR COMPLEX ANALYSIS OF GEOPHYSICAL DATA OBTAINED AT ISTP SB RAS RADIO INSTRUMENTS

N. Gromik, V. Ivonin, V. Lebedev

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, nikita.1911@yandex.ru

Аннотация. В данной статье рассматриваются радиофизические инструменты ИСЗФ СО РАН, и возможности информационно-аналитических систем (ИАС) для анализа получаемых данных. Представлена архитектура разработанной ИАС, ее возможности, перспективы и результаты использования.

Ключевые слова: Информационно-аналитическая система, обработка данных, накопление данных.

Abstract. In this paper, the ISTP SB RAS radio instruments and the possibilities of information-analytical systems (IAS) for analyzing the obtained data are considered. The architecture of the developed IAS, its capabilities, prospects and results of its use are presented.

Keywords: Information and analytical system, data processing, data accumulation.

ВВЕДЕНИЕ

ИСЗФ обладает большой базой радиофизических устройств: Иркутский радар некогерентного рассеяния (ИРНР), DPS-4, ионозонды, расположенные в населенных пунктах: Торы, Патроны, г. Норильск. ИРНР представляет собой моностатический импульсный радиолокатор с частотным сканированием в диапазоне 154–162 МГц [Лебедев и др., 2022]. Широкий набор измеряемых геофизических параметров делает ИРНР уникальным инструментом, а результаты измерений важным источником геофизической информации. Сеть из разнесенных ЛЧМ-ионозондов позволяет организовать мониторинг ионосферы с высоким пространственным и временным разрешением в непрерывном режиме [Цедрик и др., 2022]. На сегодняшний день имеется значительный опыт совместного использования ИРНР и сети ионозондов, а большой объем накопленных данных измерений различных диагностических средств может быть использован для улучшения существующих моделей ионосферы. В настоящее время разработано множество ионосферных моделей, имеющих свои достоинства и недостатки [Аксенов и др., 2020]. Создание инструмента для оперативной верификации ионосферных моделей представляет актуальную задачу. Таким образом, разработка ИАС, позволяющая получить оперативный доступ к данным и предоставляющая набор инструментов для анализа данных, является крайне актуальной задачей, решению которой посвящена данная работа.

Целью работы является разработка ИАС представляющую собой программный комплекс для визуализации и анализа информации, полученной на радиофизических средствах ИСЗФ СО РАН: ИРНР, комплекс ионозондов, данные GPS-приёмников.

ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

При выборе используемых инструментов для разработки ИАС были рассмотрены существующие

решения, а также составлен собственный список критериев, которым должна соответствовать ИАС.

Критерий оперативности относится как к верификации ионосферных моделей, так и к работе всей ИАС в целом: развертывание системы, доставка обновлений, исправление ошибок, стойкость к ошибкам. Был выбран архитектурный подход клиент-серверного взаимодействия (веб-приложение).

Для достижения максимальной производительности при запуске моделей магнитного поля, ионосферы и пр. используются предварительно скомпилированные модули, разработанные с применением языков программирования «C», «C++» и «Fortran» [Ивонин, 2021].

Критерий модульности достигается не только при использовании внешних (подключаемых) моделей, но и внутри ИАС. Каждый модуль ИАС инкапсулируется в отдельный компонент. Модульность системы позволяет быстрее находить и устранять ошибки, улучшает организацию кода и позволяет при необходимости отключить тот или иной функционал. Общая структура модульной информационной системы представлена на рис. 1.

Устойчивость к ошибкам. Во время вызова скомпилированных модулей существует вероятность возникновения критической ошибки, например, если были отправлены некорректные данные. В большинстве случаев это ошибки сегментации, что приводит к зависанию, нежелательному длительному ответу от сервера и ошибки времени ожидания. Для исключения такого поведения ИАС запускает модули в два потока, где первый – поток выполнения модуля вычислений, а второй следит за первым, основываясь на заранее заданном критическом времени выполнения вычислений.

Масштабируемость ИАС достигается за счет возможности подключения дополнительных серверов или запуска ИАС в определенной сетевой видимости (например, закрытая сеть учебного

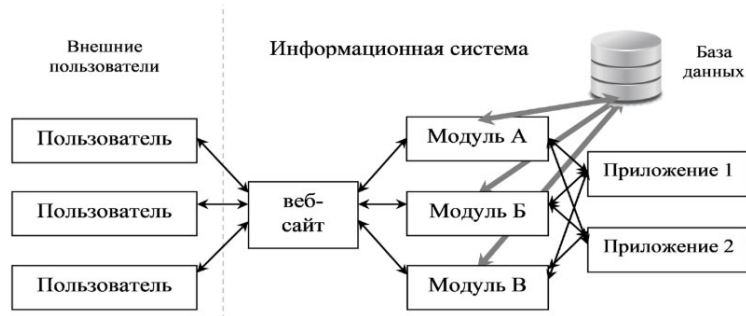


Рис. 1. Общая структура модульной ИС

учреждения). Также ИАС может быть запущена как самостоятельное ПО на каком-то одиночном устройстве, таким образом политика распространения ПО может быть пересмотрена в будущем.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На текущем этапе разработки ИАС позволяет корректировать полученные на ИРНР высотные профили электронной концентрации ионосферы путём вписывания модельного высотного профиля мощности НР-сигнала в полученный на ИРНР [Алсаткин, 2020]. Интерфейс модуля корректировки полученных на ИРНР высотных профилей электронной концентрации (N_e) представлен на рис. 2.

Интерфейс подразделяется на зоны работы с данными и их подготовки. В зоне подготовки данных (сверху) выбираются исходные данные и параметры, полученные на ИРНР. В рабочей зоне

можно наблюдать график, отображающий реальный высотный профиль N_e , модельный высотный профиль N_e и профиль N_e для заданных высот. В правой части экрана настраиваются аргументы для подгонки модельного профиля к реально измеренному. Все аргументы для всех временных реализаций можно сохранить в файл для дальнейшей постобработки.

ИАС позволяет гибко моделировать среду распространения радиосигнала. В интерфейсе модуля среды распространения радиосигнала доступен выбор широкого ряда моделей тропосферы, ионосферы и магнитного поля Земли. Каждая модель имеет свой уникальный набор параметров, который разрешается редактировать для гибкой настройки модельной среды распространения радиосигнала. Интерфейс модуля среды распространения радиосигнала представлен на рис. 3.

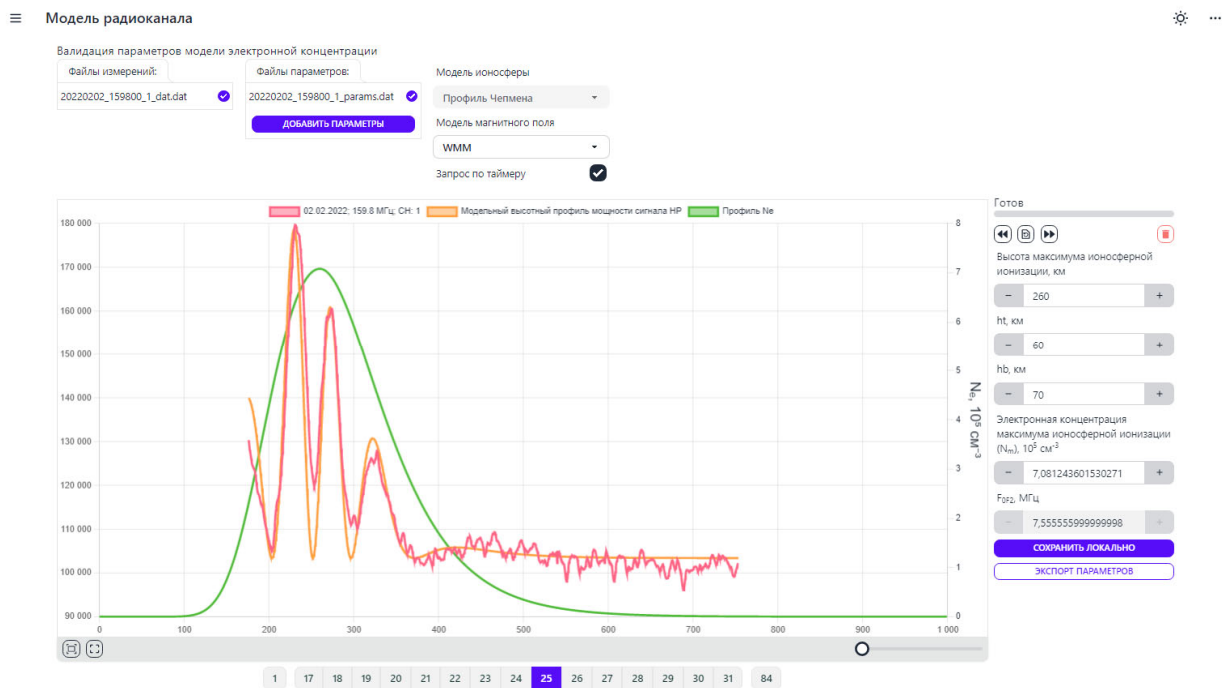


Рис. 2. Интерфейс модуля корректировки полученных высотных профилей электронной концентрации

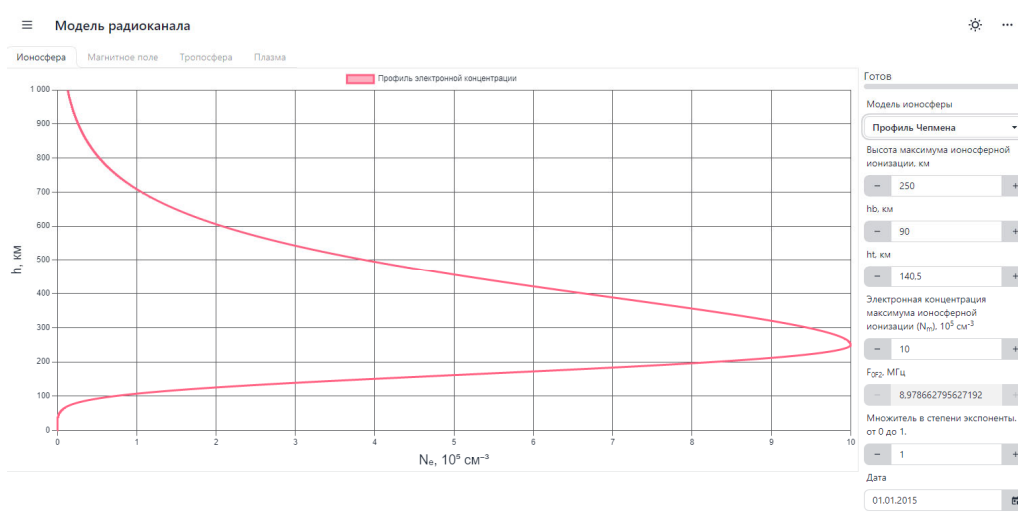


Рис. 3. Интерфейс модуля среды распространения радиосигнала

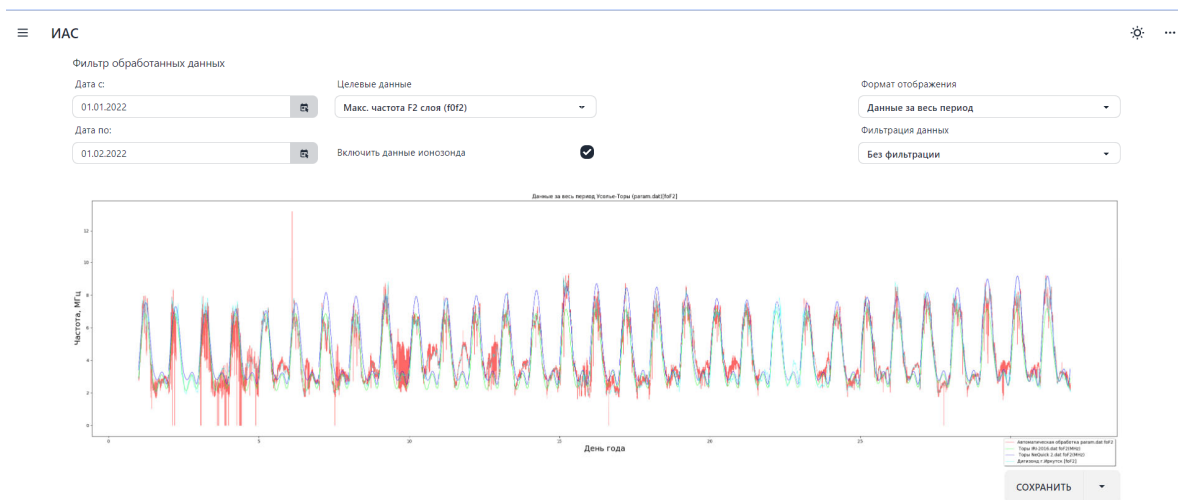


Рис. 4. Интерфейс визуализации результатов обработки за выбранный период

Помимо работы с данными ИРНР, ИАС позволяет осуществлять вторичную обработку ионограмм, полученных от ионозондов. На рис. 4 представлен вариант просмотра данных ионозондов за выбранный период. Разрешается выбрать тип фильтрации, формат разбиения данных, временной период и целевые данные.

Помимо данных ИРНР система работает и с GNSS-данными: можно производить сравнение ПЭС, рассчитанного по выбранной модели ионосферы, с ПЭС, полученным с помощью GIM карт.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены обоснования выбора технических решений и подходов, а также реализации модулей ИАС для обработки и визуализации данных полученной на радиофизических средствах ИСЗФ СО РАН.

Использование возможностей ИАС для проведения лабораторных занятий по обработке данных, демонстрации ошибок регистрации измерений, визуализации профилей электронной концентрации и т.д. позволяет говорить о наличии учебно-

методического аспекта. Данная ИАС уже использовалась сотрудниками института для проведения практических занятий со студентами.

Информационная система совершенствуется, тестируется и модернизируется. В настоящее время ведётся работа над интерфейсом для контроля состояния самой информационной системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аксенов О.Ю., Козлов С.И., Ляхов А.Н. и др. Анализ прикладных моделей ионосферы для расчета распространения радиоволн и возможность их использования в интересах радиолокационных систем. I. Классификация прикладных моделей и основные требования, предъявляемые к ним в интересах радиолокационных средств // Солнечно-земная физика. 2020. Т. 6, № 1. С. 86–96. DOI: 10.12737/szf61202008.

Алсаткин С.С., Медведев А.В., Ратовский К.Г. Особенности метода восстановления Ne на Иркутском радаре некогерентного рассеяния // Солнечно-земная физика. 2020. Т. 6, № 1. С. 97–110.

Ivonin V.A., Lebedev V.P. Simulation of Radar Signals in the VHF Range, Taking Account of Their Propagation Effects in the Troposphere and Ionosphere // 2021 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS). Hangzhou,

China, 2021. P. 2519–2525. 10.1109/PIERS53385.2021.9695088. hal-09695088.

Лебедев В.П., Сетов А.Г., Ермаков В.Ю. Антенна Иркутского радара некогерентного рассеяния: математическая модель, методы калибровки // Всероссийские открытые Армандовские чтения: Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн. 2022. № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/antenna-irkutskogo-rada-dara-nekogerentnogo-rasseyaniya-matematicheskaya-model-metody-kalibrovki>

Цедрик М.В., Подлесный А.В., Куркин В.И. Трехпозиционный прием ЛЧМ-сигналов при слабонаклонном зондировании ионосферы // Всероссийские открытые Армандовские чтения: Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн. 2022. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/trehpozitsionnyy-priem-lchm-signalov-pri-slabonaklonnom-zondirovanii-ionosfery>

ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЙ ДЖЕТ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ НАВИГАЦИИ GPS

С.И. Данилов, А.Е. Степанов, А.Ю. Гололобов

Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю. Г. Шафера СО РАН, г Якутск, Россия,
danilov@ikfia.ysn.ru

POLARIZATION JETS FROM GPS SATELLITE NAVIGATION SYSTEM MEASUREMENTS

S.I. Danilov, A.E. Stepanov, A.Yu. Gololobov

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy of SB RAS, Yakutsk, Russia,
danilov@ikfia.ysn.ru

Аннотация. В данной работе представлены материалы по определению поляризационного джета по данным измерений спутниковой системы навигации GPS. Данные измерений GPS позволяют вычислять полное электронное содержание (ПЭС) вдоль траектории луча. Установлено, что резкие падения ПЭС совпадают с временем наблюдения поляризационного джета по данным наземной станции Якутск и спутника DMSP F-17.

Ключевые слова: GPS, поляризационный джет, ионосфера, плазма.

Abstract. This paper presents materials on the determination of polarization jets from measurements of the GPS satellite navigation system. The GPS measurement data allows us to calculate the total electron content (TEC) along the beam trajectory. It was found that the sharp drops of TEC coincide with the time of observation of the polarization jet according to the data of the Yakutsk ground-based station and the DMSP F-17 satellite.

Keywords: GPS, polarization jet, ionosphere, plasma.

ВВЕДЕНИЕ

Поляризационный джет (ПД) — это узкая полос плазмы, движущаяся в западном направлении в области плазмопаузы и наиболее заметно проявляющаяся во время магнитных бурь. В ионосфере существование поляризационного джета приводит к целому ряду изменений, создающих плазменные неоднородности, которые хорошо регистрируются с поверхности Земли с помощью ионозондов и нарушают распространение радиоволн, т.е. влияют на космическую погоду.

Дрейфы плазмы со скоростями выше 1000 м/сек в вечернем секторе приводят к образованию узких провалов ионизации в результате выноса плазмы к предполуденному сектору в зоне действия джета [Степанов и др., 2019]. Многие наземные и спутниковые измерения показывают, что ширина ПД составляет от 100 до 200 км (1° – 2°). ПД наблюдается преимущественно в предполночном (18:00–24:00 MLT) секторе на инвариантных широтах 55° – 65° [Степанов и др., 2017].

Global Positioning System (GPS) является одной из глобальных спутниковых систем навигации. Система GPS состоит из 32 спутников, вращающихся по шести круговым орбитам на высоте порядка 20200 км и периодом обращения 11 ч 58 мин. Данные измерений спутников позволяют рассчитывать полное электронное содержание электронов (ПЭС) в ионосфере, что позволяет вести непрерывные наблюдения за состоянием ионосферы.

Целью настоящей работы является исследование возможности определения поляризационного джета на основе данных измерений спутниковых систем навигации, и сопоставление полученных результатов с измерениями поляризационного джета с наземной ионосферной станции Якутск и спутников серии DMSP.

ДААННЫЕ

Расчет ПЭС по данным измерений спутниковых навигационных систем основан на дисперсионной

зависимости показателя преломления радиоволн, проникающих через ионосферу. В поле зрения приемника GPS всегда находится как минимум 8 непрерывно перемещающихся спутников, что позволяет получать данные о распределении ПЭС в пространстве и времени. Данные измерений спутниковых систем навигации хранятся в формате RINEX (The Receiver Independent Exchange Format). Файл содержит в себе исходные данные необходимые для расчета ПЭС (псевдодальности P1 и P1, фазы L1 и L2) [Терещенко, 2015]. В настоящей работе данные RINEX получены с сайта <https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/data/daily>.

Измерения ионосферы на станции Якутск проводится ионозондом DPS-4. DPS-4 представляет собой приемо-передающий комплекс, способный измерять в реальном времени характеристики физических параметров ионосферы. Конечный результат зондирования, который называется ионограммой, включает амплитуды отраженного от ионосферы сигнала в зависимости от частоты и высоты.

DMSP (Defense Meteorological Satellite Program) - программа мониторинга Земли, разработанная и запущенная в 1962 г., позволяющая вести наблюдения за состоянием верхней атмосферы Земли. В данном исследовании использованы данные измерений спутника DMSP F-17, которая движется по околополярной орбите, с наклоном около $98,8^\circ$ и периодом обращения около 102 мин [Burke et al., 2011]. Спутниковые данные были получены с официального сайта проекта DMSP (<https://dmsp.bc.edu/index.html>).

Для расчетов ПЭС использована программа «GPS-TEC analysis» [Seemala, 2023]. В период с 12 по 14 ноября 2012 г. наблюдалась магнитная буря. В этот период производились одновременные наблюдения признаков ПД по данным наземной Якутской ионосферной станции и спутника DMSP F-17.

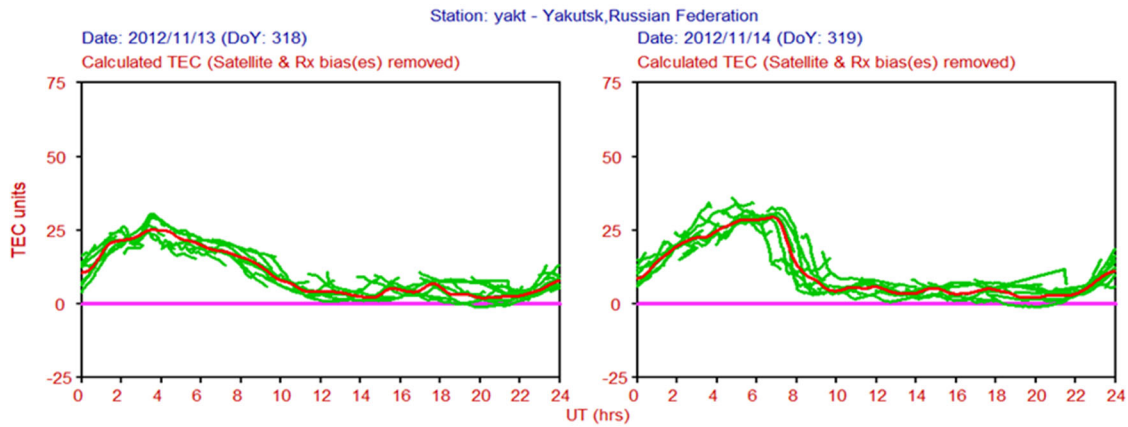


Рис. 1. Расчёты ПЭС станции Якутск за 13 и 14 ноября 2012 г. По оси абсцисс время по UT, а по оси ординат значение ПЭС. Зеленые кривые — расчеты по данным отдельных спутников, а красная кривая — их среднее значение

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЗА 14 НОЯБРЯ 2012 ГОДА

На рис. 1 показаны расчеты ПЭС с приемника на станции Якутск за 13 и 14 ноября 2012 г. Зелеными кривыми обозначены рассчитанные ПЭС по данным отдельных спутников, а красной линией показано их среднее значение. Видно, что 14 ноября в суточном ходе наблюдается резкое падение ПЭС (срыв) с 07:00 до 09:00 UT. Как будет показано ниже, примерно в то же время на ионограммах наземной ионосферной станции и данных спутника DMSP F-17 регистрировались признаки ПД. Т.к. магнитная буря продолжалась 2 сут, было проведено сопоставление рассчитанных ПЭС с данными предыдущего дня — 13 января 2012 г., когда ПД не регистрировался. На расчетах видно, что в суточном ходе ПЭС 13 января 2012 г. отсутствует резкое падение ПЭС.

В вечернем секторе 14 ноября на фоне сильной магнитной бури, которая продолжалась 44 ч, ионосферная станция Якутск зарегистрировала признаки поляризационного джета (рис. 2). Основными ионосферными признаками проявления джета по наземным данным являются резкие уменьшения критических частот f_oF2 с ~ 8 МГц до ~ 3 МГц и F3s-отражения на ионограммах вертикального зондирования (ВЗ), указывающие на появление узкого глубокого минимума (провала) концентрации электронов. Kp -индекс за этот день был равен: 6- 6+ 6- 4+ 4- 2 1- 1+.

В этот же период около 08 UT спутник DMSP F17 зафиксировал признак ПД в виде резкого падения концентрации электронов и ионов и увеличения горизонтальной скорости V_{horz} до более 1500 м/с (рис. 3). Это свидетельствует о том, что резкое падение ПЭС в суточном ходе связано с формированием ПД.

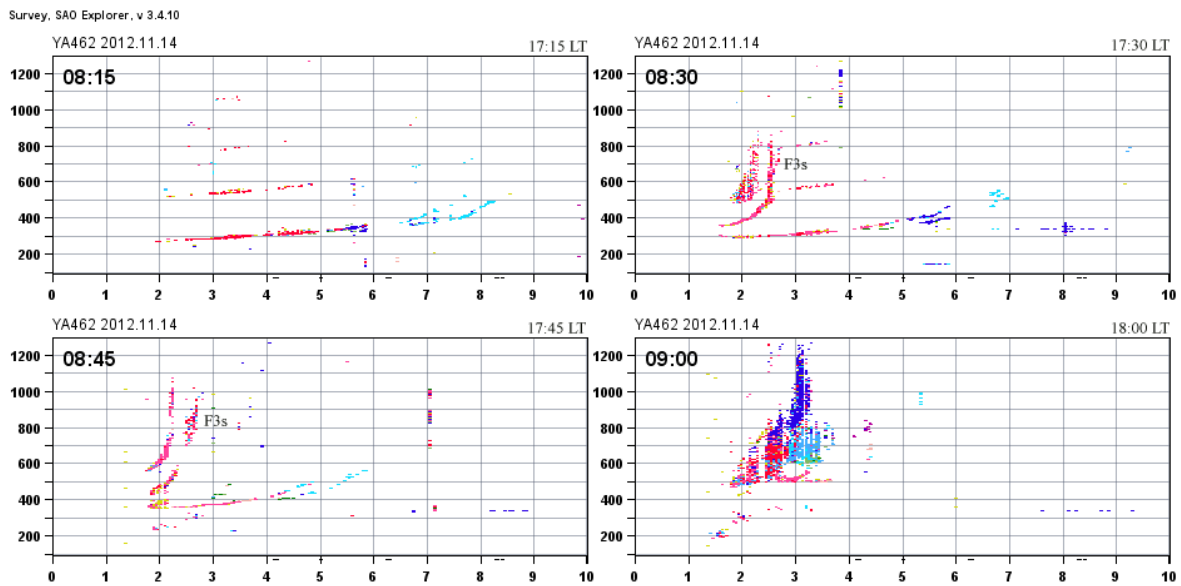


Рис. 2. Последовательность ионограмм станции Якутск 14 ноября 2012 г. По оси абсцисс — частота в МГц, а по оси ординат — высота в километрах

DMSP F17A – 14–Nov–2012 (Day 319)

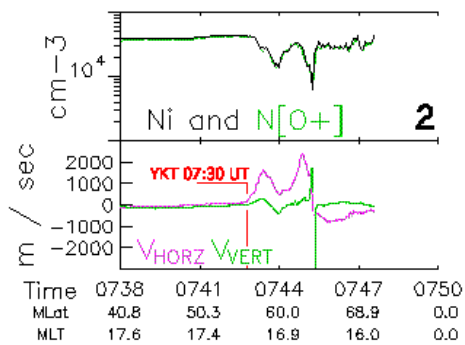


Рис. 3. Данные спутника DMSP F17. По оси абсцисс время по UT, магнитная широта MLat и местное магнитное время MLT, а по осям ординат концентрация ионов и скорость в м/с

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данные измерений GPS показали, что резкое падение ПЭС в суточном ходе совпадает по времени с наблюдением поляриционного джета по данным наземной ионосферной станции Якутск и спутника DMSP F17 и может являться признаком ПД. Дальнейшие исследования с привлечением данных

измерений спутниковых систем навигации раскрывают дополнительные возможности изучения поляриционного джета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Степанов А.Е., Кобякова С.Е., Халипов В.Л. Наблюдение быстрых субавроральных дрейфов ионосферной плазмы по данным якутской меридиональной цепочки станций // Солнечно-земная физика. 2019. Т. 5, № 4. С. 73–79.

Степанов А.Е., Халипов В.Л., Голиков И.А., Бондарь Е.Д. Поляриционный джет: узкие и быстрые дрейфы субавроральной ионосферной плазмы. Якутск: Издательский дом СВФУ, 2017. 176 с.

Терещенко Е.Д., Миличенко А.Н., Швецов М.В. и др. Определение полного электронного содержания по сигналам спутников глобальной навигационной системы ГЛОНАСС // Вестник Кольского НЦ РАН. 2015. Т. 20, № 1. С. 32–43.

Burke W.J., Wilson G.R., Lin C.S. et al. Estimating Dst indices and exospheric temperatures from equatorial magnetic fields measured by DMSP satellites // J. Geophys. Res. 2011. V. 116, A01205. doi:10.1029/2010JA015310.

Seemala G.K. Chapter 4 – Estimation of ionospheric total electron content (TEC) from GNSS observations // Atmospheric Remote Sensing. 2023. P. 63–84. doi.org/10.1016/B978-0-323-99262-6.00022-5.

АНАЛИЗ МЕЖГОДОВЫХ ВАРИАЦИЙ СТРАТОСФЕРНО–ТРОПОСФЕРНОГО ДИНАМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В СЕВЕРНОМ ПОЛУШАРИИ

К.А. Диденко^{1,2}, Т.С. Ермакова^{2,3}, А.В. Коваль², Е.Н. Савенкова³

¹ Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской Академии наук, Троицк, Москва, Россия, didenko@izmiran.ru

² Санкт–Петербургский государственный университет, Санкт–Петербург, Россия

³ Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт–Петербург, Россия

ANALYSIS OF INTERANNUAL VARIATIONS OF STRATOSPHERE–TROPOSPHERE DYNAMIC COUPLING IN THE NORTHERN HEMISPHERE

К.А. Didenko^{1,2}, Т.С. Ermakova^{2,3}, А.В. Koval², Е.Н. Savenkova³

¹ Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences, Troitsk, Russia, didenko@izmiran.ru

² St. Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

³ Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russia

Аннотация. По данным реанализа JRA–55 были рассчитаны и проанализированы трехмерные потоки волновой активности Пламба с целью анализа динамического взаимодействия в системе тропосфера–стратосфера–тропосфера. Усредненные за 64 года наблюдений значения вертикальной составляющей потока волновой активности в декабре, январе, феврале и марте позволили определить долготно–широтные области Северного полушария для изучения межгодовой изменчивости взаимодействия атмосферных слоев и оценки значимости полученных результатов. Показано, что в январе и марте над Дальним Востоком России наблюдается статистически значимый тренд на увеличение потока волновой активности из тропосферы в стратосферу.

Ключевые слова: волновая активность, поток Пламба, стратосферно–тропосферное взаимодействие

Abstract. Three–dimensional wave activity Plumb’s fluxes were calculated and analyzed using JRA–55 reanalysis data to examine the dynamic interaction in the troposphere–stratosphere–troposphere system. The vertical component of wave activity flux values averaged over 64 years of observations in December, January, February and March allowed us to determine the longitude–latitude regions in the Northern Hemisphere to study the interannual variability of interaction between atmospheric layers and to assess the significance of the results obtained. In January and March, there is a significant trend observed over the Russian Far East, corresponding to the increase in wave activity flux from the troposphere to the stratosphere.

Keywords: wave activity, Plumb’s flux, stratosphere–troposphere interaction

ВВЕДЕНИЕ

Динамика тропосферы и стратосферы составляют единое целое и неразрывно связаны, а их динамическое взаимодействие наблюдается в зимний сезон. При этом механизмы, определяющие генерацию и поддержание циркуляции, в этих атмосферных слоях различаются, так же, как и протяженность и сила влияния одного атмосферного слоя на другой [Baldwin and Dunkerton, 2001]. В тропосфере крупномасштабная циркуляция, в основном, контролируется поглощением солнечной энергии, а в стратосфере главную роль играют волновые и вихревые структуры. Генерируемые орографией и разницей нагрева океанов и материков, планетарные волны распространяются от своих источников в тропосфере, переносят энергию и импульс, вызывая вариации стратосферной циркуляции. Эти вариации, особенно вариации интенсивности стратосферного полярного вихря, вызывают отклик в тропосфере и включают механизм обратной связи, посредством которого стратосфера оказывает влияние на тропосферу [Charney and Drazin, 1961].

Исследования тропосферно–стратосферных связей уже давно занимают центральное место в работах по атмосферной динамике и посвящены анализу как динамического, так и радиационного взаимодействия [Solomon et al., 2010]. Это обусловлено тем, что межгодовые изменения этих связей являются не

только индикаторами изменений озонового слоя и климата, но и могут быть использованы в качестве предикторов экстремальных погодных явлений в зимнее время [Jadin et al., 2010]. Целью данной работы является исследование межгодовой изменчивости стратосферно–тропосферного динамического взаимодействия. Для этого было проанализировано распространение планетарных волн в атмосфере с использованием трехмерных потоков волновой активности, которые являются индикатором и важным фактором вышеупомянутого взаимодействия, на основе данных реанализа JRA–55 [Kobayashi et al., 2015]. Вертикальная составляющая потока волновой активности была усреднена по трем широтно–долготным секторам Северного полушария для месяцев с декабря по март, построены временные ряды и оценена значимость обнаруженных трендов.

МЕТОДОЛОГИЯ

Потоки волновой активности с применением алгоритма Пламба обычно рассматриваются при анализе дивергенции потока в горизонтальной плоскости, распространения планетарных волн в атмосфере и их воздействия на зональную циркуляцию [Plumb, 1985]. Алгоритм Р.А. Пламба позволяет оценить направление распространения волнового пакета на трехмерной плоскости, что успешно применяется в изучении

вертикального распространения волн из стратосферы в тропосферу, и их отражения в обратном направлении. Трехмерный вектор потока волновой активности описывает распространение планетарных волн вдоль долготы (F_x), широты (F_y), высоты (F_z):

$$\mathbf{F}_s = \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{pmatrix} = \frac{P}{P_0} \cos \varphi \begin{pmatrix} v'^2 - \frac{1}{2\Omega a \sin 2\varphi} \frac{\partial(v'\phi')}{\partial \lambda} \\ -u'v' + \frac{1}{2\Omega a \sin 2\varphi} \frac{\partial(u'\phi')}{\partial \lambda} \\ \frac{2\Omega \sin \varphi}{S} \left[v'T' - \frac{1}{2\Omega a \sin 2\varphi} \frac{\partial(\tau'\phi')}{\partial \lambda} \right] \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где P — давление; P_0 — давление, равное 1000 гПа; Ω — угловая скорость вращения Земли; λ — долгота; φ — широта; a — радиус Земли; S — параметр статической устойчивости; u' — возмущение зональной скорости (отклонение от усредненного по долготе значения); v' — возмущение меридиональной скорости; T' — возмущение температуры; ϕ' — возмущение геопотенциала. Параметр статической устойчивости определяется следующим образом:

$$S = \frac{\partial \hat{T}}{\partial z} + \frac{k\hat{T}}{H}, \quad (2)$$

где \hat{T} — температура, усредненная по территории к северу от 20° N; k — коэффициент теплопроводности; H — масштаб высоты.

ДАННЫЕ И ПОТОКИ ВОЛНОВОЙ АКТИВНОСТИ

Данные температуры воздуха, скорости зонального и меридионального ветра, давления и геопотенциальной высоты взяты из базы данных JRA-55 и усреднены за каждый месяц с 1958 по 2021 гг. Усредненные значения вертикальной составляющей потока за все годы наблюдений для декабря, января, февраля и марта в Северном полушарии на 20 км показали зону распространения восходящего потока волновой активности над Дальним Востоком России и отсутствие заметной зоны распространения нисходящего потока. В первые зимние месяцы наблюдаются наибольшие значения вертикальной составляющей потоков волновой активности Пламба из тропосферы в стратосферу. Нисходящие потоки волновой активности наблюдаются в некоторые годы над Гренландией и севером Канады, но значения практически на порядок меньше в сравнении со значениями восходящих потоков.

Полученное усреднение позволило определить области разделения территории Северного полушария на широтно–долготные сектора для исследования межгодовой изменчивости вертикальной составляющей потока, построения и оценки линейного тренда. К первому сектору (I) относится большая часть Европы, север Африки, европейская часть России и Ближний Восток, ко второму (II) — азиатская часть России и страны Азии, к третьему (III) — Канада, Гренландия, США и Северная Атлантика.

Среднемесячные значения вертикальной составляющей потока волновой активности были усреднены в каждом секторе в областях ее наблюдаемых

вариаций, т.е. в полосе 37.5–77.5° N. Усреднения проводились для уровня 20 км и результаты получены отдельно для каждого месяца с декабря по март за период с 1958 по 2021 гг. Значения уровней значимости для всех секторов и месяцев за этот период представлены в табл. 1.

Таблица 1.

Уровни значимости трендов в каждом секторе для исследуемых месяцев.

Сектор	Декабрь	Январь	Февраль	Март
I	не значим	5 %	не значим	не значим
II	не значим	5 %	не значим	10 %
III	не значим	5 %	не значим	не значим

В декабре значения потока волновой активности во II секторе в 2 раза больше значений в III секторе и в 3–4 раза больше значений в I секторе. Такая ситуация характерна для всех рассматриваемых месяцев. В III секторе в декабре наблюдается незначительное увеличение волновой активности за период с 1958 по 2021 гг., но статистическая значимость полученных результатов низкая. Статистически значимых трендов в остальных секторах не наблюдается. Однако было решено отдельно рассмотреть межгодовую изменчивость вертикальной составляющей потока, усредненную по тем же параметрам за период с 1980 по 2021 гг., так как с 1980 г. данные реанализов, в том числе используемого в этой работе, были значительно улучшены посредством использования при ассимиляции спутниковых данных.

Результаты расчета и усреднения по секторам вертикальной составляющей потока волновой активности с 1980 г для декабря показывают, что во II секторе также не наблюдается статистически значимого тренда, но и в III секторе линейный тренд не значим. Значимым становится тренд в I секторе (уровень значимости 10 %), в котором наблюдается уменьшение потока волновой активности из тропосферы в стратосферу. В декабре в III секторе наблюдается один из максимумов усредненного восходящего потока волновой активности в 2017 г., хотя в этой области нисходящие потоки наблюдаются чаще.

В январе, как и ожидалось, максимальные значения восходящей составляющей потока волновой активности, наблюдаются во II секторе, но межгодовое усиление характерно не для каждого месяца. В январе, в свою очередь, увеличение потока волновой активности из тропосферы в стратосферу характерно для всех секторов и тренд статистически значим при уровне значимости 5 %. При анализе усредненных значений с 1980 г. увеличивается значимость линейного тренда во II секторе, т.е. наблюдается усиление восходящей ветви вертикальной составляющей потока Пламба. В I секторе статистическая значимость становится низкой (уровень значимости 20 %), а в III — тренд не значим. Кроме этого, в январе, наряду с декабрем, наблюдаются максимальные (для этого сектора) значения восходящего потока волновой активности в III секторе в 1980 и 1994 г.

Статистически значимые тренды в феврале за период с 1958 по 2021 гг. отсутствуют. Выводы не

меняются при анализе результатов расчета с 1980 г. Результаты для марта показывают увеличение восходящего потока волновой активности во II секторе за период с 1958 по 2021 гг. В I и III секторах линейный тренд статистически не значим. Значимость во II секторе увеличивается при анализе результатов с 1980 г., т.е. уровень значимости с 10 % изменяется до 5 %. Кроме этого, увеличивается статистическая значимость тренда в I секторе, но этого недостаточно для выводов о каких-либо климатических изменениях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С целью исследования межгодовой изменчивости стратосферно-тропосферного взаимодействия на основе данных реанализов была проанализирована вертикальная составляющая трехмерного потока волновой активности, рассчитанная по алгоритму Пламба. Статистические оценки рассчитанных трендов потоков волновой активности показали увеличение восходящей из тропосферы в стратосферу волновой активности в январе и марте над дальним Востоком России. Межгодовое уменьшение восходящей компоненты потока с 1980 г. наблюдается только в

декабре над европейской частью России, Европой и Ближним Востоком.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда РФ, грант №23-77-01035, <https://rscf.ru/project/23-77-01035/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Baldwin M., Dunkerton T. Stratospheric harbingers of anomalous weather regimes // *Science*. 2001. N 294. P. 581–584.
- Charney J., Drazin P. Propagation of planetary-scale disturbances from the lower into the upper atmosphere // *J. Geophys. Res.* 1961. V. 66, N 1. P. 83–109.
- Jadin E.A., Wei K., Zyulyaeva Y.A. et al. Stratospheric wave activity and the Pacific Decadal Oscillation // *J. Atmos. Sol.–Terr. Phys.* 2010. V. 72. P. 1163–1170.
- Kobayashi Sh., Ota Y., Harada Y. et al. The JRA–55 reanalysis: general specifications and basic characteristics // *J. Meteorol. Soc. Japan*. 2015. V. 93. P. 5–48.
- Plumb R.A. On the Three-Dimensional Propagation of stationary waves // *J. Atmos. Sci.* 1985. V. 42, N 3. P. 217–229.
- Solomon S., Rosenlof K.H., Portmann R.W. et al. Contributions of Stratospheric Water Vapor to Decadal Changes in the Rate of Global Warming // *Science*. 2010. V. 327, N 5970. P. 1219–1223.

ВОЗМОЖНОСТЬ ОРГАНИЗАЦИИ КАНАЛОВ СВЯЗИ ЧЕРЕЗ СПОРАДИЧЕСКИЙ E_s СЛОЙ

С.А. Долгачева, А.С., Калишин, Т.Д. Борисова

Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия,
dolgachyova2010@yandex.ru

THE POSSIBILITY OF ORGANIZING COMMUNICATION CHANNELS THROUGH A SPORADIC E_s LAYER

S.A. Dolgacheva, A.S. Kalishin, T.D. Borisova

Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia, dolgachyova2010@yandex.ru

Аннотация. В работе рассмотрено распространение радиоволн КВ диапазона в АЗРФ в различных гелиогеофизических условиях в области E ионосферы на примере четырёх трасс наклонного зондирования (Соданкюла – Баренцбург, Ловозеро – Баренцбург, Ловозеро – Амдерма и Ловозеро – Диксон) с января 2021 по май 2024 г. Произведена автоматическая обработка EEs-моды отражения, получены вероятности отражения сигнала от спорадического E_s -слоя для всех частот излучаемых диапазонов передатчиков.

Ключевые слова: наклонное радиозондирование ионосферы, высокоширотная ионосфера, спорадический E_s -слой, автоматическая обработка ионосферных данных, КВ-радиосвязь

Abstract. The paper considers the propagation of HF radio waves in the Russian Arctic in various heliogeophysical conditions in the E region of the ionosphere using the example of four inclined sounding routes (Sodankula – Barentsburg, Lovozero – Barentsburg, Lovozero – Amderma and Lovozero – Dikson) from January 2021 to May 2024. Automatic processing of the EEs reflection mode was performed, the probabilities of signal reflection from the sporadic E_s layer were obtained for all frequencies of the radiated ranges of transmitters.

Keywords: oblique sounding, high-latitude ionosphere, sporadic E_s layer, automatic ionospheric data processing, HF radio communication

ВВЕДЕНИЕ

По данным наклонного зондирования высокоширотной ионосферы [Калишин и др., 2020] спорадический E_s -слой наблюдается регулярно во все сезоны, и, поэтому, выглядит перспективным для организации устойчивой радиосвязи в высоких широтах при помощи волн декаметрового диапазона (коротких волн). Был проведен анализ особенностей распространения радиоволн на примере четырёх радиотрасс: Соданкюла – Баренцбург (SOD–BBQ), Ловозеро – Баренцбург (LOZ–BBQ), Ловозеро – Амдерма (LOZ–AMD) и Ловозеро – Диксон (LOZ–DIK) (рис. 1). Диапазон излучения передатчика в геофизической обсерватории Соданкюла (Финляндия) составляет от 1 до 16 МГц. Передатчик в Ловозеро излучает в диапазоне от 2 до 29 МГц.

Поскольку по трекам на ионограммах наклонного зондирования сложно отличить отражения от

E и E_s -слоёв, параметры ионограммы оценивались в качестве суммарной односкачковой EEs-моды отражения (1EEs) и разделялись при помощи сравнения пересчитанных из частот МНЧ [Долуханов, 1960] с рассчитанными критическими частотами регулярного E -слоя на средних точках отражения (модель IRI-2016 [NASA]).

Для выявления рабочих диапазонов частот через подсчёт вероятности отражения в зависимости от времени суток, сезона и геомагнитной обстановки, был разработан алгоритм автоматического определения трека 1EEs. Периоды спокойных, слабовозмущенных и возмущенных геомагнитных условий определялись с помощью суммарного за сутки K_p -индекса. Спокойные дни соответствовали требованию $\sum K_p < 15$, слабовозмущенные $15 \leq \sum K_p \leq 24$, а возмущенные $\sum K_p > 24$.

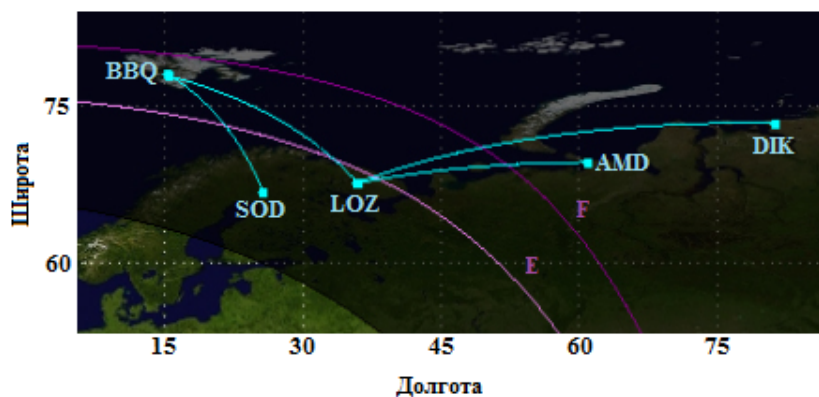


Рис. 1. Геометрия изучаемых радиотрасс. В качестве примера нанесены линии терминатора на высоте E и F областей ионосферы в 13 UT 16 декабря

ОСОБЕННОСТИ СПОРАДИЧЕСКОГО ES-СЛОЯ В РЕГИОНЕ АЗРФ

Трассы можно разделить на две группы: поперек овала сияний (LOZ-BBG и SOD-BBG) и вдоль овала (LOZ-AMD и LOZ-DIK). Спорадический слой *Es* в средних точках радиотрасс наблюдается регулярно во все сезоны. Наиболее интенсивный *Es*-слой был зафиксирован в вечерние и ночные часы в спокойных и слабовозмущенных условиях, когда средние точки трасс входят в зону овала полярных сияний. В возмущенных условиях овал сияний смещается к югу, электронная плотность в точках отражения резко уменьшается, приводя к уменьшению критической частоты *Es* и МНЧ. На ионограммах часто присутствует «разрыв» моды *Es*. На рис. 2а отражения наблюдаются в диапазоне частот от 10 до 11,8 МГц и от 25 до 28 МГц. Для объяснения причины «разрыва» трека было выполнено моделирование распространения диагностических сигналов на данной радиотрассе [Патент, 2014]. По результатам моделирования (рис. 2 б–г), в некоторых диапазонах частот распространение на трассе невозможно, поскольку все лучевые траектории проходят мимо пункта приема. Разрыв трека хорошо заметен на графике распределения вероятностей отражения частот (рис. 3).

ОСОБЕННОСТИ ОТРАЖЕНИЯ ЧАСТОТ ОТ СПОРАДИЧЕСКОГО ES-СЛОЯ

Из-за прерывистости трека, для оценки частот, пригодных для связи, была сделана автоматическая оцифровка 1EES-моды в диапазоне задержек для

каждой трассы. Алгоритм определения трека состоит из двойной фильтрации ионограммы на основе статистических методов с экспериментально подобранными порогами.

По полученным массивам частот и задержек были рассчитаны вероятности отражения для каждой частоты диапазона передатчика в различных условиях для каждого часа (рис. 3).

Результаты обработки показали два наиболее вероятных частотно-временных диапазона, общих для всех четырех трасс – ночной и вечерний. Эти два диапазона отличаются друг от друга механизмом образования спорадического *Es*-слоя. Во время ночного диапазона точки отражения трасс находятся внутри аврорального овала. Вечерний диапазон обусловлен резким увеличением ионизации в середине трассы или в области отражения волны, сопровождаемым понижением высоты слоя *Es* с одновременным ростом критической частоты. При этом МНЧ возрастает ещё и за счёт увеличения коэффициента передачи [Благовещенский, Жеребцов, 1987].

Ночной диапазон для трасс поперёк овала сияний имеет более узкие частотные границы (8–9.5 МГц), чем у трасс, расположенных вдоль овала. Для трасс поперёк овала так же характерно сужение временных рамок от лета к зиме. На трассе LOZ-AMD меняются частоты в зависимости от сезона и геомагнитной обстановки: в летний период 9–21 МГц, в период равноденствия 4–15/18/25 МГц, зимой 4–20 МГц. На трассе LOZ-BBG диапазон не меняется в рамках 21–29 МГц частоты.

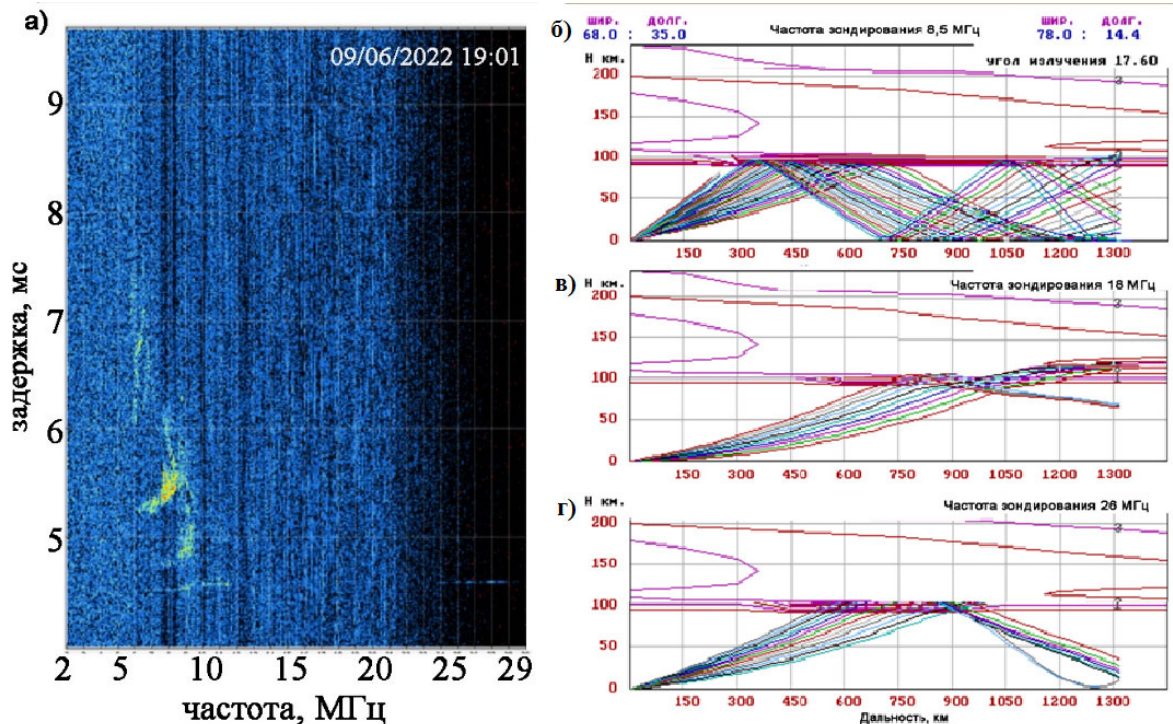


Рис. 2. Примеры ионограммы наклонного радиозондирования с прерывистым треком отражения от области *E* на трассе с. Ловозеро – п. Баренцбург в летний период (а), и результаты моделирования лучевых траекторий распространения радиоволн на трассе Ловозеро – Баренцбург для частот 8.5 МГц (б), 18 МГц (в) и 26 МГц (г)

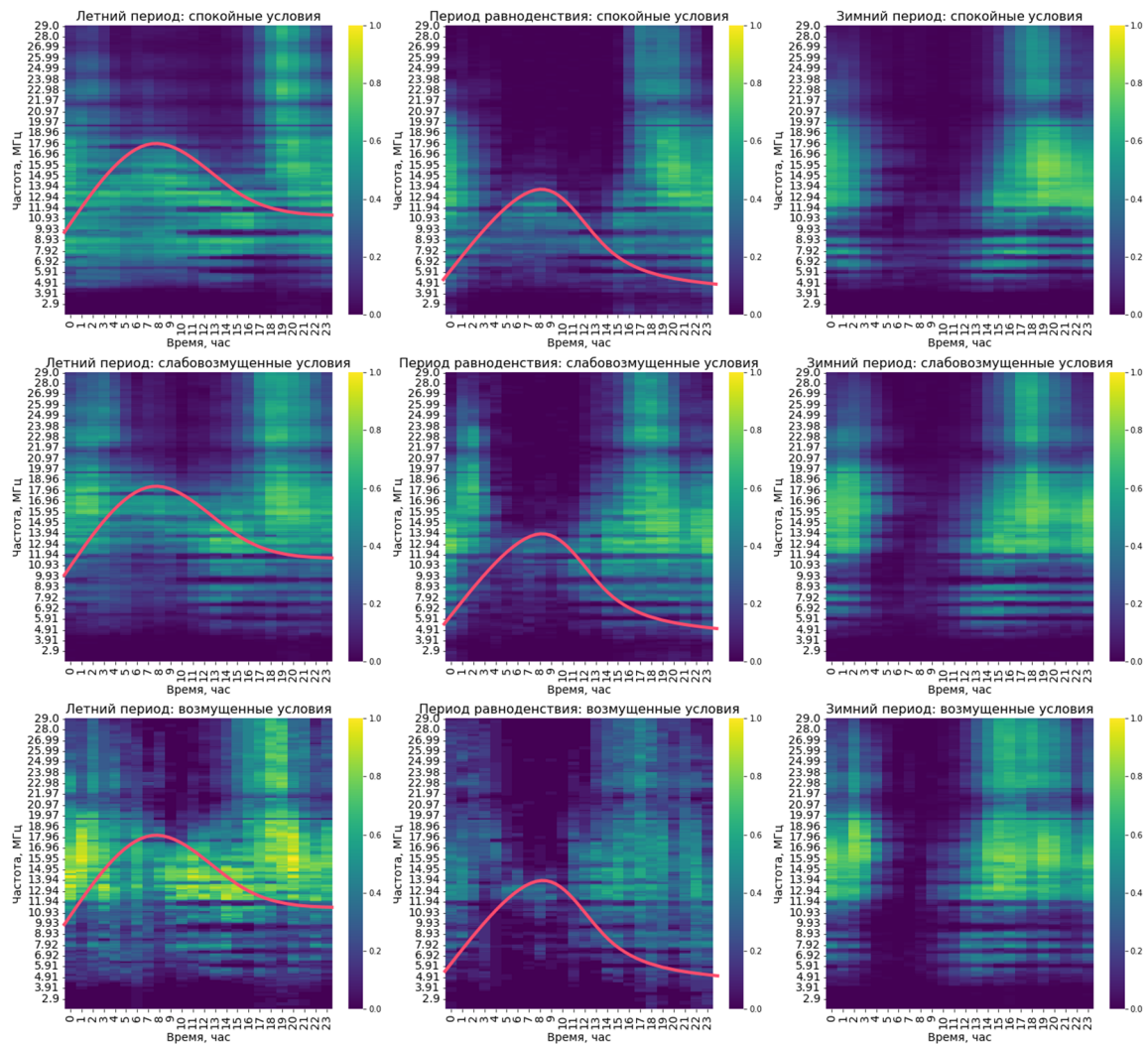


Рис. 3. Распределение вероятностей отражения по часам для каждой частоты трассы LOZ–DIK. Критические частоты регулярного E-слоя, пересчитанные в МГц, обозначены красной линией. Время в UT

Вечерний диапазон на трассах поперёк овала сияний смещается от лета к зиме на пару часов в сторону полудня. На трассе LOZ–DIK диапазон 1 присутствует от 12 до 29 МГц круглый год. На трассе LOZ–AMD верхняя граница диапазона частот меняется по сезонам 21 до 17 МГц, нижняя граница около 5 МГц.

В дополнение к этим двух диапазонам, на трассе SOD–BBG летом присутствует отражение 11–15 МГц с 1 до 22 UT, частично перекрываемое регулярным E-слоем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Было показано, что частоты, отражаемые от Es-слоя в силу геометрии распространения не всегда попадают в точку приёма, что усложняет задачу рекомендации надёжных рабочих частот, особенно в реальном времени — необходимо не только иметь оперативную информацию о состоянии ионосферы, но и считать трассировку лучей. Найденные диапазоны частот с наибольшей вероятностью отражения иллюстрируют механизмы возникновения спорадических слоёв, следовательно, могут быть предсказаны моделями высокоширотной ионосферы. Вероятность отражения частот во всех случаях, кроме

возмущенных условий в летний период, не превышает 80 %, поэтому необходимо более детальное исследование с модельными расчетами положения аврорального овала, критической частоты Es-слоя и данных со спутников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Благовещенский Д.В., Жеребцов Г. А. Высокоширотные геофизические явления и прогнозирование коротковолновых радиоканалов. М.: Наука, 1987. 271 с.
 Долуханов М.П. Распространение радиоволн. М.: Связьиздат, 1960. 391 с.
 Калишин А.С., Благовещенская Н.Ф., Трошичев О.А., Франк-Каменецкий А.В. ФГБУ «ААНИИ». Геофизические исследования в высоких широтах // Вестник РФФИ. 2020. № 3–4(107–108). С. 60–78. DOI 10.22204/2410-4639-2020-106-107-3-4-60-78.
 Патент на «Программное обеспечение для модернизации параметров KB радиоканала, учитывающего эффекты модификации высокоширотной ионосферы при воздействии мощных KB радиоволн, представляющее модель KB радиоканала (CHATRASCA: TRASSA и CHANNEL)» № 2014618249 от 13.08.2014.
 URL: <https://kauai.cmc.gsfc.nasa.gov/instantrun/iri/> (дата обращения 10.05.2024)

ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ШУМАНОВСКОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

А.А. Долинин^{1,2}, Ф.Г. Сарафанов^{1,2}, Ю.В. Шлыгаев^{1,2}

¹Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова
Российской академии наук»,
Нижний Новгород, Россия, a.dolinin@ipfran.ru

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»,
Нижний Новгород, Россия

MEASUREMENT OF THE MAGNETIC FIELD OF THE SCHUMANN WAVELENGTH RANGE

A.A. Dolinin^{1,2}, F.G. Sarafanov^{1,2}, Yu.V. Shlyugaev^{1,2}

¹Federal Research Center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences,
Nizhny Novgorod, Russia, a.dolinin@ipfran.ru

²National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia

Аннотация. Шумановские резонансы – это собственные моды электромагнитных колебаний резонатора Земля–ионосфера, источником возбуждения которых являются природные электромагнитные явления — молнии. Измерение шумановских резонансов представляет собой сложную задачу, в связи низкими амплитудами и частотами регистрируемых полей. Разработанная авторами система непрерывного мониторинга магнитного поля позволяет проводить регистрацию натуральных данных. В рамках работы проведены измерения геомагнитного поля, проведен спектральный анализ полученных данных. Исследование суточной вариации геомагнитного поля показало влияние антропогенного фактора на амплитуду и частоту резонансов Шумана. Исследованы основные характеристики первых двух гармоник шумановских резонансов. Выявлены характерные закономерности суточного хода шумановских резонансов.

Ключевые слова: резонансы Шумана, геомагнитное поле

Abstract. Schumann resonances are the proper modes of electromagnetic oscillations of the Earth–ionosphere resonator, the source of excitation of which is lightning, a natural electromagnetic phenomenon. Measuring Schumann resonances is a difficult task due to the low amplitudes and frequencies of the recorded fields. The system of continuous monitoring of the magnetic field developed by the authors makes it possible to register field data. As part of the work, measurements of the geomagnetic field were carried out, and spectral analysis of the obtained data was carried out. A study of the diurnal variation in the geomagnetic field has shown the influence of an anthropogenic factor on the amplitude and frequency of Schumann resonances. The main characteristics of the first two harmonics of Schumann resonances are investigated. The characteristic patterns of the daily course of Schumann resonances are revealed.

Keywords: Schumann resonances, geomagnetic field

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время существенно выросло внимание к естественному электромагнитному окружению Земли и, в частности, его возможным связям с изменчивостью климата и эволюцией биосистем [Williams, 1992]. Одним из наиболее важных проявлений электромагнитного окружения являются т.н. шумановские резонансы [Schumann, 1952]: собственные моды резонатора «Земля–ионосфера», возбуждаемые природными электрическими явлениями — молниями [Bózóki, 2023]. Понимание связей шумановских резонансов с крупномасштабными процессами, происходящими в атмосфере, позволит получить независимую оценку климатических изменений на Земле, что дает возможность прогнозировать климатические условия как на Земле, так и на других планетах [Nikolaenko, 2014]. Для решения данных задач, помимо моделирования из первых принципов, необходимо создавать, развивать и совершенствовать непрерывный мониторинг различных параметров шумановских резонансов.

ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для проведения высокочувствительных измерений требуется низкий уровень постоянных шумов в крайне-низкочастотном диапазоне (от 3 до 30 Гц),

связано это с очень низким уровнем мощности глобального электромагнитного окружения по сравнению с мощностью на промышленных частотах. Данная проблема широко распространена в любых видах измерений электрических и магнитных полей. Для непрерывных долговременных измерений была разработана схема бесперебойного малошумящего аккумуляторного питания. Для проведения эксперимента выбраны модифицированные датчики IMS-007 с установленным в них режекторным фильтром на 50 Гц. Регистрация аналоговых данных, поступающих с этих измерителей, предполагает применение высококачественных аналого-цифровых преобразователей (АЦП) разрядностью не менее 24 бит. Также частота дискретизации должна превышать необходимую (по критерию Найквиста) частоту для возможности дальнейшей цифровой обработки. В нашем случае была выбрана интегрированная система сбора данных (логгер) EDR 209 фирмы EarthData, предназначенная для автономной работы в полевых условиях. Для обеспечения автономности измерений реализован алгоритм автоматической выгрузки данных наблюдений из пункта регистрации на сервер, а также алгоритм отслеживания состояния системы (напряжение сети, логгера, зарядки аккумуляторов). Общая схема всей системы представлена на рис. 1.

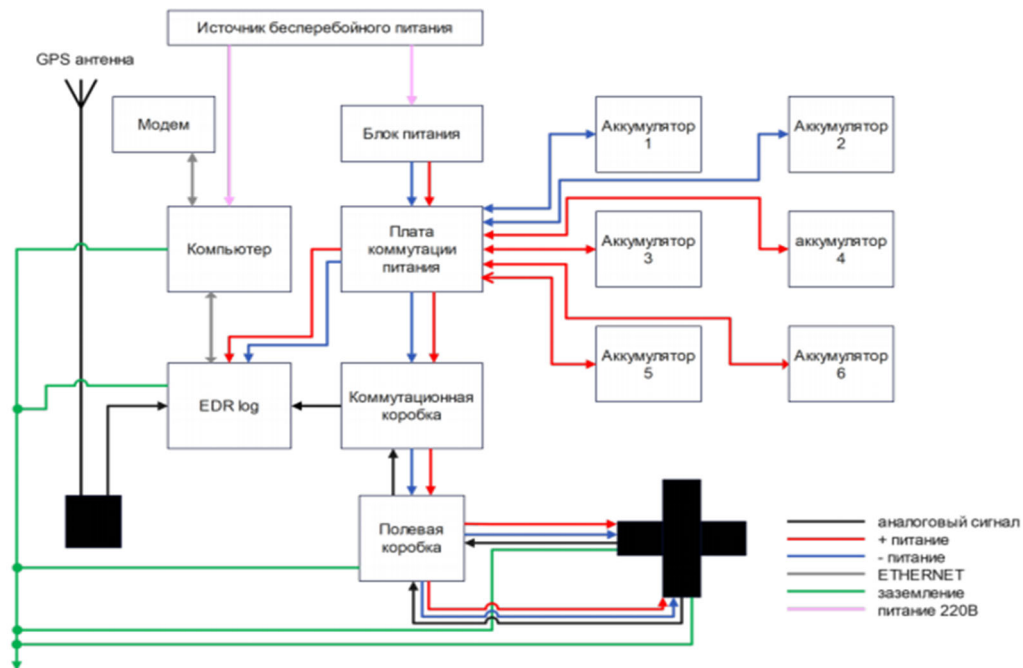


Рис. 1. Принципиальная схема подключения оборудования в пункте наблюдения

Отдельную проблему представляет расположение измерительной аппаратуры в связи с существенным уровнем электромагнитных помех антропогенного происхождения. Поэтому станции измерения и мониторинга размещают вдали от промышленных зон, населенных пунктов, транспортных магистралей и линий электропередач.

Для регистрации сигналов в электромагнитном фоне диапазона крайне низких частот (КНЧ) были выбраны позиции расположения магнетометров по минимальному уровню помех на гармониках промышленной частоты (50 Гц) в поле у деревни Дроздово Городецкого района Нижегородской области.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Проведен анализ суточных данных для первого и второго шумановского резонанса, получены суточные вариации амплитуды и частоты (рис. 2). На рис. 2а), 2в) показаны суточные вариации частоты первых двух шумановских резонансов. Частоты обоих резонансов достигают максимума в 11 ч по UTC. На рис. 2б), 2г) показан суточный ход амплитуды шумановских резонансов. Отчетливо видно два максимума амплитуды для обоих резонансов. Эти максимумы достигаются в 6 и в 14 ч UTC. Интересно заметить, что в это же время достигается максимум молниевой активности в двух крупнейших грозовых центрах Австралия и Африка.

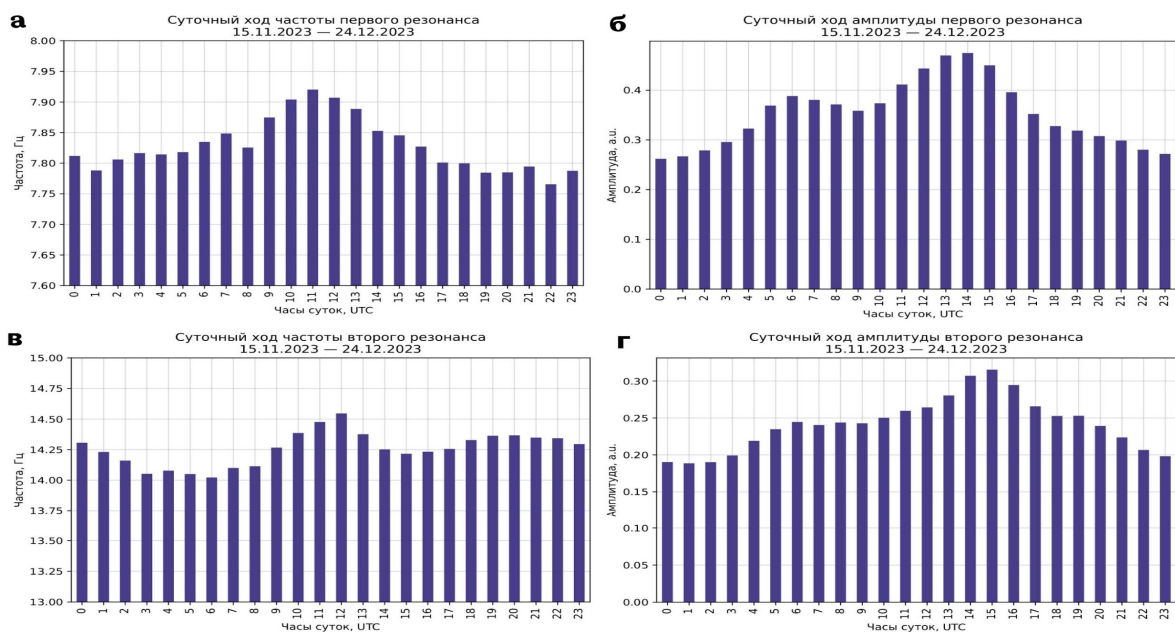


Рис. 2. Суточные вариации основных характеристик шумановских резонансов: а) частоты первого резонанса; б) амплитуды первого резонанса; в) частоты второго резонанса; г) амплитуды второго резонанса

Частотный спектр: Построен частотный спектр геомагнитного поля в полосе частот от 5×10^{-5} до 38 Гц, нормированный на амплитуду первого резонанса Шумана, с часовыми интервалами. Результаты показывают выраженные резонансы Шумана на частотах 7.83 Гц, 14.1 Гц, 20.4 Гц и 26.3 Гц, а также слабо выраженный пятый резонанс Шумана на частоте 32.4 Гц (рис. 3).

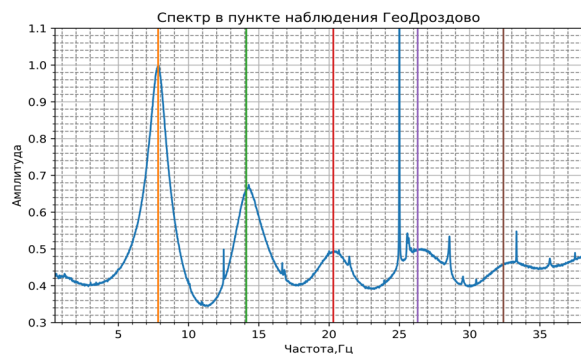


Рис. 3. Частотный спектр геомагнитного поля

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты свидетельствуют о высокой чувствительности использованной аппаратуры, что позволяет регистрировать глобальные шумановские резонансы с 1-го по 5-й порядок, а также

анализировать характеристики резонансной кривой. Созданная в рамках данной работы система непрерывного мониторинга позволяет делать долгосрочные измерения, способствующие исследованию месячных, полугодовых и годовых вариаций шумановских резонансов, а также изучению влияния антропогенных факторов на суточную вариацию амплитуды и частоты шумановских резонансов.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания ННГУ (проект 0729-20220-0037).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Bozóki T., Sántori G., Williams E. et al. Day-to-day quantification of changes in global lightning activity based on Schumann resonances // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2023. V. 128, N. 11. e2023JD038557.
- Nickolaenko A., Hayakawa M. Schumann Resonance for Tyros // *Springer Geophysics*. Tokyo: Springer, 2014. 348 p.
- Schumann W.O. Über die strahlungslosen Eigenschwingungen einer leitenden Kugel, die von einer Luftschicht und einer Ionosphärenhülle umgeben ist // *Zeitschrift für Naturforschung A*. 1952. V. 7, N 2. P. 149–154.
- Williams E.R. The Schumann resonance: a global tropical thermometer // *Science*. 1992. V. 256. P. 1184–1187.

МЕТОД ЛОКАЛИЗАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЯ СОЛНЕЧНОГО ПЯТНА В ФОКАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ ДАТЧИКА ШАКА-ГАРТМАНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НОРМАЛИЗАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЯ

М.Б. Дрига, А.Ю. Шиховцев, П.Г. Ковадло

Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия,
driga@iszf.irk.ru

METHOD OF SUNSPOT IMAGE LOCALIZATION IN THE FOCAL PLANE OF THE SHACK-GARTMANN SENSOR USING IMAGE NORMALIZATION

M.B. Driga, A.Yu. Shikhovtsev, P.G. Kovadlo

Institute of Solar-terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, driga@iszf.irk.ru, Ashikhovtsev@iszf.irk.ru,
kovadlo2006@rambler.ru

Аннотация. В настоящем докладе обсуждается метод определения координат контуров и центров солнечного пятна на субапертурах датчика Шака-Гартмана с применением алгоритма нормализации изображения. Приводится оценка среднеквадратичного отклонения площадей бинаризованных солнечных пятен, определенных по субапертурам гартманогаммы.

Ключевые слова: датчик Шака-Гартмана, оптическая турбулентность

Abstract. This paper discusses a method for determining the coordinates of the sunspot contours and centers on the subapertures of the Shack-Hartmann sensor using an image normalization algorithm. An estimate of the standard deviation of the mean square deviation of the areas of binarized sunspots determined from the Hartmann sensor subapertures is given.

Keywords: Shack-Hartmann sensor, optical turbulence

ВВЕДЕНИЕ

Разрешающая способность телескопов наземного базирования ограничена атмосферной турбулентностью. При планировании наблюдательного времени на астрономических телескопах наземного базирования, в том числе, с использованием адаптивной оптики, а также при подстройке систем адаптивной оптики необходимо знать вертикальные профили оптической турбулентности [Ботыгина, 2013; Лукин, 2024]. Информация об этих профилях позволяет определять характеристики функции размытия точки системы оптический телескоп-атмосфера. При определении вертикальных профилей оптической турбулентности в месте расположения астрономического телескопа наземного базирования одной из задач является развитие методов и алгоритмов по автоматизированной обработке изображений. В частности, при определении характеристик оптических искажений важным оказывается использовать методы автоматического определения центров тяжести субизображений, а также координатного определения контуров изображений протяженных объектов солнечной поверхности, например, солнечного пятна или группы солнечных пятен. Корректное определение координат контуров солнечных пятен и их центров тяжести в пределах одного субизображения, формируемого субапертурой датчика Шака-Гартмана, как и определение этих характеристик для всего набора субизображений лежит в основе совершенствования и разработки новых методов профилирования оптической турбулентности [Shikhovtsev, 2024; Шиховцев, 2022].

Для того, чтобы хранить значения пикселей изображения, которое представляет собой гартманогамму используется положительный целочисленный тип данных, который может принимать 65535 значений.

Солнечное пятно на субапертуре гартманогаммы представляет собой протяженную размытую область, из-за чего бинаризация этой области затруднена, а, следовательно и затруднено определение координат центра этой размытой области. Поэтому перед этапом бинаризации был включен этап нормализации изображения субапертуры гартманогаммы, который позволяет сделать край солнечного пятна более резким, что позволяет более точно выделить солнечное пятно на изображении при дальнейшей бинаризации.

Во время компьютерной обработки гартманогамм возникает потребность в повышении их резкости за счет уменьшения диапазона значений, используемого для хранения значений каждого из пикселей. В данной работе для этого используется формула линейного преобразования представленная в формуле

$$i_{norm} = v_{min} + \frac{(x - \min(i_{orig})) \times (v_{max} - v_{min})}{\max(i_{orig}) - \min(i_{orig})},$$

где i_{norm} — нормализованное значение, i_{orig} — исходное значение, v_{min} — минимальное значение нового диапазона, v_{max} — максимальное значение нового диапазона.

ЛОКАЛИЗАЦИЯ СОЛНЕЧНОГО ПЯТНА НА СУБАПЕРТУРЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НОРМАЛИЗАЦИИ

На первом этапе применяется алгоритм локализации субапертуры. Результат работы этого алгоритма представлен на рис. 1.

Применение фильтра размытия к субапертуре позволяет убрать мелкозернистый шум. В результате чего получается изображение, представленное на рис. 2.

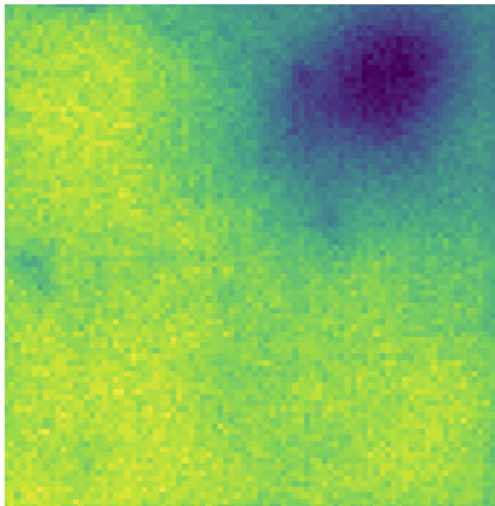


Рис. 1. Седьмая субапертура на первой гартманограмме исходного набора данных

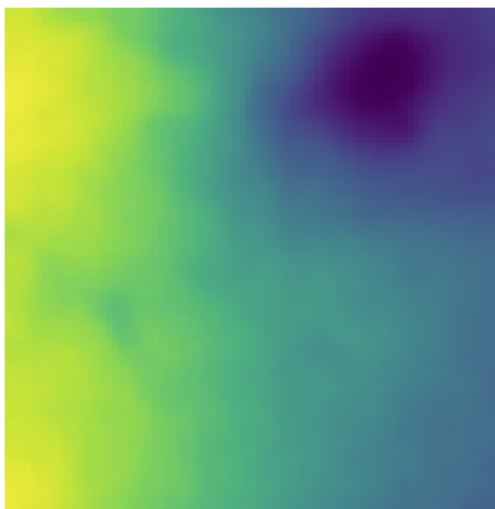


Рис. 2. Седьмая субапертура размытая блочным фильтром

Далее изображение гартманограммы нормализуется до 5 значений. Результат нормализации представлен на рис. 3.



Рис. 3. Седьмая субапертура нормализованная до пяти значений пикселя [0;4]

Результат этой бинаризации представлен на рис. 4.



Рис. 4. Бинаризованная седьмая субапертура

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение алгоритма бинаризации для всех субапертур одной гартманограммы дало среднее значение площади солнечного пятна в пикселях 209 при среднеквадратичном отклонении площади солнечного пятна 81.

Применение метода моментов к бинаризованному изображению субапертуры дает координаты центра солнечного пятна (64 по оси x , 19 по оси y).

Результаты получены с использованием Уникальной научной установки Большой солнечный вакуумный телескоп <http://ckp-rf.ru/usu/200615/>. Исследования выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ботыгина Н.Н., Ковадло П.Г., Копылов Е.А. и др. Оценка качества астрономического видения в месте расположения Большого солнечного вакуумного телескопа по данным оптических и метеорологических измерений // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26, № 11. С. 942–947.

Лукин В.П., Лукин И.П. Обзор современных технологий измерения, прогнозирования и коррекции турбулентных искажений в оптических волнах // Компьютерная оптика. 2024. Т. 48, № 1. С. 68–80.

Shikhovtsev A.Yu. Reference optical turbulence characteristics at the Large Solar Vacuum Telescope site // Publications of the Astronomical Society of Japan. 2024. psae031.

Шиховцев А.Ю. Метод определения характеристик оптической турбулентности по лучу зрения астрономического телескопа // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35, № 01. С. 74–80.

ДИАГНОСТИКА ВОЗМУЩЕННОЙ ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ И ГНСС РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ

В.В. Емельянов¹, Д.А. Когогин¹, Д.С. Максимов¹, И.А. Насыров¹, А.Б. Белецкий³,
А.В. Шиндин², С.М. Грач², Р.В. Загреддинов¹

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия,
evv960722@gmail.com

²Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

³Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

DIAGNOSTICS OF A DISTURBED REGION OF THE IONOSPHERE BASED ON OPTICAL MEASUREMENTS AND GNSS RADIO SOUNDING

V.V. Emelyanov¹, D.A. Kogogin¹, D.S. Maksimov¹, I.A. Nasyrov¹, A.B. Beletsky³,
A.V. Shindin², S.M. Grach², R.V. Zagretdinov¹

¹Kazan Federal University, Kazan, Russia,
evv960722@gmail.com

²Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia

³Institute of Solar-Terrestrial physics SB RAS, Irkutsk, Russia

Аннотация. В работе проведено исследование области ионосферы, возмущенной мощным радиоизлучением стенда «Сура» в экспериментах 2021–2023 гг. на основе совместного анализа снимков ночного неба в линии 630 нм и карт вариаций полного электронного содержания. Выявлены временные изменения нейтральной и заряженной компонент ионосферной плазмы как в течение всего эксперимента, так и в пределах одного цикла воздействия.

Ключевые слова: ионосфера, искусственное свечение, 630 нм, ГНСС, ПЭС, карты ПЭС, УНУ стенд Сура.

Abstract. We carried out an investigation of the region of the ionosphere disturbed by powerful radio emission from the Sura facility in the 2021–2023 experiments based on a joint analysis of images of the night sky in the 630 nm line and maps of the total electron content variations. Temporal changes in the neutral and charged components of the ionosphere plasma were revealed both during the entire experiment and within one cycle of exposure.

Keywords: ionosphere, airglow patches, 630 nm, GNSS, TEC, TEC maps, Sura facility.

ВВЕДЕНИЕ

За период 2021–2023 гг. на стенде «Сура», расположенном на радиофизическом полигоне «Васильсурск» (географические координаты 56.15° с.ш., 46.10° в.д.) Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Лобачевского (ННГУ) проводились регулярные эксперименты по изучению процессов взаимодействия мощного высокочастотного радиоизлучения с ионосферой. В работе представлены результаты оптических экспериментов, а именно возникновения искусственного свечения ионосферы в красной линии $\lambda = 630$ нм, связанное с релаксационным переходом атомов кислорода из возбужденного состояния $O(^1D_2)$ в основное состояние $O(^3P_2)$ [Грач и др., 2023].

Воздействие на ионосферу осуществлялось коротковолновым радиоизлучением обыкновенной поляризации. Диаграмма направленности стенда «Сура» имела два варианта ориентации: излучение вертикально вверх (В) и в «магнитный зенит» (МЗ) — наклон на 12° на юг в плоскости магнитного меридиана. Частота излучения изменялась в интервале от $f_0 = 4300$ кГц до $f_0 = 5828$ кГц в зависимости от состояния ионосферы. Воздействие осуществлялось шестиминутными периодами: 2.5 мин непрерывное излучение, 3.5 мин пауза, эффективная мощность излучения составляла порядка $P_{эф} \sim 100$ МВт.

Для регистрации снимков ночного неба использовалась камера КЕО Sentinel с ПЗС матрицей. Оптическая система камеры была оснащена красным

светофильтром на длину волны $\lambda = 630$ нм с полосой пропускания $\Delta\lambda = 2$ нм и объективом типа «рыбий глаз» с полем зрения 145°. Размер изображения камеры с учетом биннинга составлял 512×512 пикселей. Регистрация изображений была синхронизирована с режимом воздействия на ионосферу стенда «Сура» и производилась в периодическом режиме каждые 30 с в нулевую и тридцатую секунды с экспозицией 25 с. Камера была расположена в пригороде Казани на территории магнитной обсерватории КФУ (географические координаты 55.56° с.ш., 48.45 в.д.) примерно в 170 км к востоку от стенда «Сура».

ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Всего в 2021–2023 гг. было проведено более 20 экспериментальных серий по наблюдению эффекта стимулированного оптического свечения ионосферы. Из них для анализа были выбраны 11 дней, когда эффект свечения в красной линии удалось уверенно наблюдать не менее чем на пяти циклах воздействия. Для выделения областей свечения на снимках ночного неба использовалась методика, описанная в статье [Шиндин и др., 2017]. Данная методика дополнительно была расширена добавлением нескольких этапов, позволивших повысить качество обработки. На следующем этапе обработки изображения с выделенными на них областями свечения были преобразованы из координат пикселей в географические координаты (широта, долгота), т.е. были получены проекции снимков

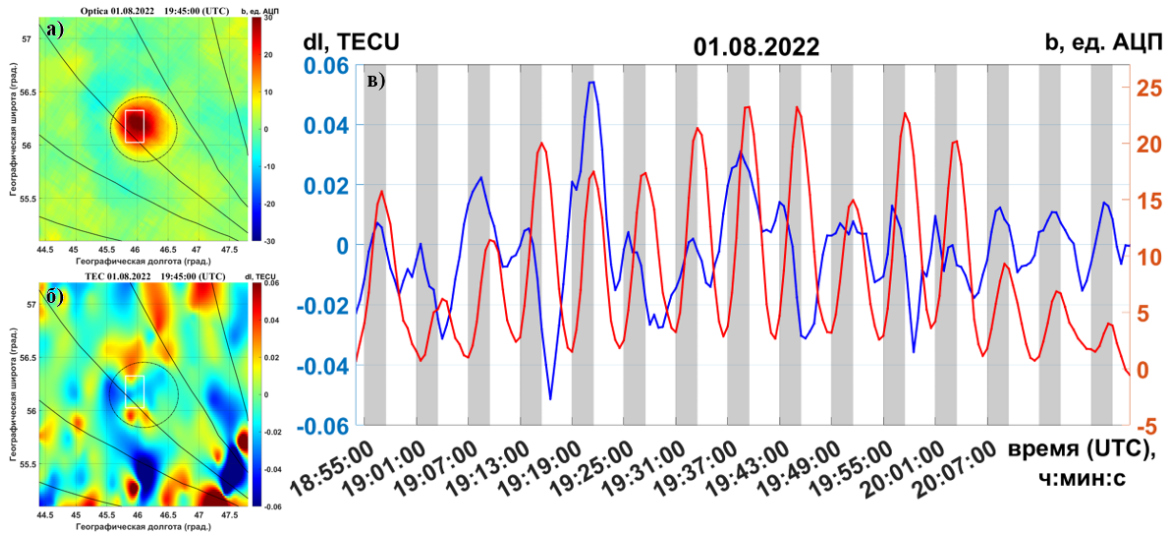


Рис. 1. Снимок ночного неба с выделенной областью свечения в проекции на географические координаты (а) и соответствующая ему карта вариаций ПЭС (б). Сплошными линиями показаны проекции линий магнитного поля, черный круг — проекция диаграммы направленности станда «Сура». (в) — зависимость интенсивности стимулированного свечения ионосферы b (красная линия) и вариаций ПЭС dI (синяя линия) от времени для эксперимента 1 августа 2022 г. Серыми прямоугольниками показан режим воздействия на ионосферу станда «Сура»

ночного неба поверхность Земли. Для этого использовалась методика аналогичная изложенной в статье [Сыренова и др., 2021], которая так же была дополнена некоторыми этапами.

Таким образом были получены изображения ночного неба в географических координатах с выделенными на них оптическими эффектами стимулированного свечения (рис 1а). Каждому такому изображению сопоставлялась карта вариаций полного электронного содержания (ПЭС) (рис 1б). Значения ПЭС рассчитывались по данным радиозондирования ионосферы сигналами глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), записанным на широкой распределенной сети наземных станций. Для построения карт ПЭС использовалась методика, описанная в статьях [Когогин и др., 2020, Maletckii et al., 2020].

Такие пары изображений построены для всех имеющихся данных 2021–2023 гг. По полученным изображениям построены графики зависимости изменений интенсивности стимулированного оптического свечения b и вариаций ПЭС dI от времени (рис. 1в). Значения интенсивности свечения рассчитывались как медианные значения по прямоугольной площадке $0.3 \times 0.3^\circ$ (белый прямоугольник на рис. 1) с центром, соответствующим центру области свечения. Значения вариаций ПЭС рассчитывались аналогичным образом.

По полученным описанным выше образом изображениям и графикам наблюдается четкая зависимость между изменениями интенсивности свечения ионосферы и режимами воздействия на нее (увеличение в процессе воздействия и плавное уменьшение в паузу). Однако такой явной зависимости не прослеживается ни на картах вариаций ПЭС, ни на соответствующих им графиках. Поэтому для выделения периодических изменений в этом случае применялся метод наложения эпох. Для этого графики вариаций ПЭС разбивались на шестиминутные интервалы, соответствующие периоду режима воздействия с

последующим сложением и осреднением по значениям соответствующих точек из интервалов.

На рис. 2 показаны результаты применения метода наложения эпох для всех дней 2021–2023 гг. когда область свечения наблюдалась не менее чем на пяти экспериментальных циклах подряд. График построен для объединения всего набора данных 2021–2023 гг. и его поведение можно описать следующим образом: значения интенсивности оптического свечения растут в процессе воздействия на ионосферу, а затем плавно спадают до фонового уровня в паузу, что согласуется с ранее проведенными оптическими и фотометрическими измерениями [Клименко и др., 2017]. Зависимость вариаций ПЭС в свою очередь можно описать как небольшое увеличение в первые 30–40 с воздействия, затем плавное уменьшение в течение примерно 3.5 мин с последующим возрастанием до фонового уровня к началу нового цикла.

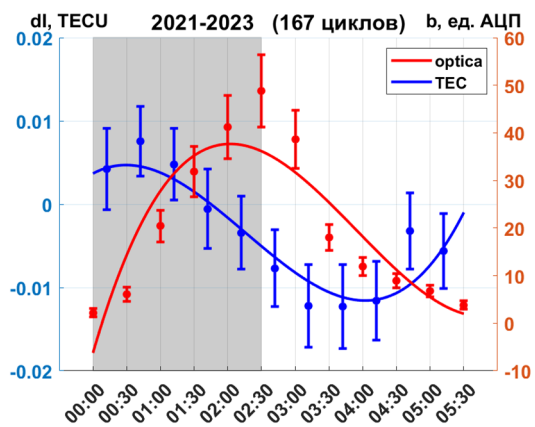


Рис. 2. Зависимость изменения интенсивности стимулированного свечения ионосферы b (красная линия) и вариаций ПЭС dI (синяя линия) в пределах одного цикла по результатам применения метода наложения эпох. Серый прямоугольник соответствует интервалу времени, когда воздействие включено

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведен анализ возмущенной области ионосферы в экспериментах на стенде «Сура», проведенных в 2021–2023 гг. Проанализированы данные оптических измерений в линии 630 нм, характеризующие поведение нейтральной составляющей ионосферной плазмы, и построены соответствующие им карты вариаций ПЭС, описывающие поведение заряженной компоненты. Выявлены периодические зависимости изменений интенсивности оптического свечения ионосферы и соответствующих вариаций ПЭС как в течение всего эксперимента, так и в пределах одного цикла воздействия. Получено, что интенсивность свечения в пределах цикла растет в процессе воздействия, а затем плавно спадает в паузу. Значения вариаций ПЭС в свою очередь возрастают в первые 30–40 с после начала воздействия, затем плавно спадают, достигая минимума примерно к середине паузы, после чего снова возрастают до фонового уровня к началу нового цикла.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-77-10029. Эксперименты на УНУ стенд СУРА проведены при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 20-12-00197. Экспериментальные данные получены с использованием оборудования ЦКП «Ангара» (ИСЗФ СО РАН).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Клименко В.В., Грач С.М., Сергеев Е.Н. и др. Характеристики искусственного свечения ионосферы при

омическом нагреве и при ускорении электронов плазменной турбулентностью, инициированными мощным радиоизлучением стенда «Сура» // Изв. вузов. Радиофизика. 2017. Т. 6, № 6. С. 481–501.

Когогин Д.А., Насыров И.А., Шиндин А.В. и др. Динмическая картина стимулированной мощным радиоизлучением области свечения ионосферы, полученная по результатам совместного анализа снимков ночного неба в линии 630 нм и карт вариаций полного электронного содержания // Изв. вузов. Радиофизика. 2020. Т. 63, № 2. С. 89–104.

Сыренова Т.Е., Белецкий А.Б., Васильев Р.В. Географическая привязка кадров широкоугольных оптических систем // Журнал технической физики. 2021. Т. 91, № 12. С. 1990–1996.

Шиндин А.В., Клименко В.В., Когогин Д.А. и др. Пространственные характеристики области генерации искусственного свечения ионосферы в линии 630 нм при воздействии радиоизлучением стенда «Сура» // Изв. вузов. Радиофизика. 2017. Т. 60, № 11. С. 949–966.

Maletckii V.M., Yasyukevich Y.V., Vesnin A.M. Wave signatures in total electron content variations: filtering problems // Remote Sensing. 2020. V. 12, N. 8. P. 1340.

Грач С.М., Легостаева Ю.К., Емельянов В.В. и др. Первые результаты трехпозиционных измерений искусственного оптического свечения в красной линии атомарного кислорода на нагревном стенде «Сура» в 2021 и 2022 гг. // Всероссийские открытые Армандовские чтения [электронный ресурс]: Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции радиоволн / Материалы Всероссийской открытой научной конференции. Муром: МИ ВлГУ. 2023. С. 240–247.

ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ПРОВАЛА ИОНИЗАЦИИ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

Г.А. Загорский, А.С. Калишин, Н.Ф. Благовещенская, Т.Д. Борисова, И.М. Егоров

Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия,
gazagorskiy@aari.ru

FEATURES OF THE IONOSPHERIC TROUGH'S INFLUENCE ON RADIO WAVE PROPAGATION

G.A. Zagorskiy, A.S. Kalishin, N.F. Blagoveshchenskaya, T.D. Borisova, I.M. Egorov

Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia,
gazagorskiy@aari.ru

Аннотация. В работе приведены результаты наблюдений главного ионосферного провала (ГИП) в широтном ходе электронной концентрации на высотах $F2$ -области в различных геомагнитных условиях по данным вертикального и наклонного радиозондирования ионосферы. Также, дано краткое описание оборудования, его технические характеристики, геометрия радиотрасс.

Ключевые слова: высокоширотная ионосфера, главный ионосферный провал (ГИП), наклонное зондирование ионосферы, вертикальное зондирование ионосферы, электронная концентрация.

Abstract. The work presents results of observations of the main ionospheric trough (MIT) in the latitudinal variation of the electron concentration at the height of the $F2$ layer in different geomagnetic conditions using an oblique HF ionospheric sounding network. A brief description of the equipment and its technical characteristics is presented. The geometry of the radio tracks is also given.

Keywords: high latitude ionosphere, main ionospheric trough (MIT), oblique sounding, vertical sounding, electron density.

ВВЕДЕНИЕ

Особенностью субавроральной ионосферы является провал в широтном ходе электронной концентрации N_e на высотах $F2$ -области. Главный ионосферный провал (ГИП) — в основном, зимнее ночное явление. Вероятность его появления на освещенной стороне Земли ниже 20 %, чем на затененной (более 80 %). Впервые он был обнаружен по данным спутника Alouette [Muldrew, 1965]. Глубина провала в N_e на высотах $F2$ -области может составлять от 3–5 раз до 10 раз. Как правило, северная стенка провала круче экваториальной стенки. Ширина же может колебаться от нескольких градусов до 20° широты. Средняя ширина в ночное время около 10° , утром и вечером увеличивается. Пример профиля ГИП, как функции N_e от геомагнитных координат [Ercha, 2020] представлен на рис. 1. Пунктирной линией обозначен фоновый уровень электронной концентрации, точками T_z , T_m и T_c на кривой электронной концентрации отмечены начало экваториальной стенки провала, минимум N_e — дно провала и северная стенка провала соответственно.

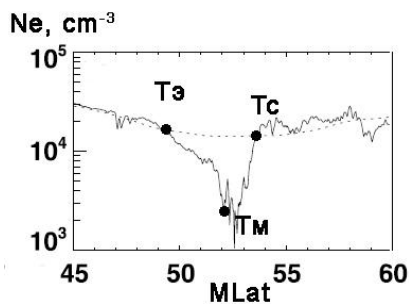


Рис. 1. Профиль ГИП, как функция электронной концентрации от геомагнитных координат

Максимальная широта положения провала достигается в вечерние часы, минимальна ночью

(около 63° инвариантной широты). С увеличением магнитной активности провал сужается и смещается к экватору на $2-3^\circ$ на единицу Kp -индекса [Брюнелли, Намгаладзе, 2015]. При спокойных геомагнитных условиях ГИП может вытянуться вдоль всей авроральной зоны.

Полярная стенка провала соответствует экваториальной стенке зоны авроральной ионизации, в F - и E -областях ионосферы возрастает N_e , часто образуются спорадические E_s -слои и аномальная ионизация F -слоя. Достаточно крутая полярная стенка провала представляет собой резкий горизонтальный градиент электронной концентрации и влияет на условия распространения радиоволн (РРВ), что проявляется в виде возникновения нестандартных боковых мод [Благовещенский, Жеребцов, 1987].

Образование провала — одно из проявлений ионосферно-магнитосферного взаимодействия, определяющего режим полярной ионосферы в целом, и является значительно более сложным образованием, чем простое снижение N_e в определенном интервале широт.

СХЕМА ПРОВЕДЕНИЯ НАБЛЮДЕНИЙ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА

Положение ГИП оценивалось при помощи данных вертикального зондирования ионосферы (ВЗИ) с использованием ионозонда CADI (Canadian Advanced Digital Ionosonde) и эмпирической модели, представленной в [Halcrow, Nisbet, 1977]. Влияние ГИП на характеристики радиосигналов оценивалось на базе станций наклонного радиозондирования ионосферы (НЗИ), расположенных в европейской части Арктической зоны [Рогов и др., 2015]. На рис. 2 показана геометрия радиотрасс, отмечены приемно-передающие пункты и средние точки трасс. Приемно-передающие пункты НЗИ совмещены с пунктами ВЗИ. Четыре трассы

расположены вдоль провала ионизации и одна Санкт-Петербург (НИС «Горьковская») — Мурманск (с. Ловозеро) поперек. Комплексы наклонного радиозондирования используют сигналы с линейно-частотной модуляцией (ЛЧМ-сигналы), наблюдения проводятся в диапазоне частот 2–29 МГц. Для оценки положения и влияния ГИП были проанализированы 30-минутные данные НЗИ и ВЗИ в зимние периоды в годы минимума цикла солнечной активности (2019–2021 гг). Рассматривались отдельно спокойные, слабовозмущенные и возмущенные геомагнитные условия. В качестве спокойных условий выбирались дни при $\Sigma Kp < 15$, слабо-возмущенных $15 \leq \Sigma Kp \leq 24$ и возмущенных дней $\Sigma Kp > 24$.

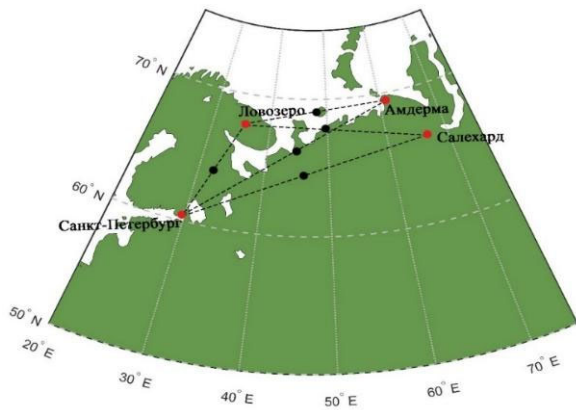


Рис. 2. Трассы наклонного зондирования ионосферы. Красными точками обозначены прямо-передающие пункты, совмещенные с ВЗИ, черными — средние точки радиотрасс

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ В РАЗЛИЧНЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

В табл. 1 и 2 приведены результаты вертикального и наклонного радиозондирования в различных геофизических условиях. Данные ВЗ показывают, что значения $foF2$ в послеполуденном секторе снижаются при приближении стенки ГИП к пункту зондирования со скоростью 0,6 – 0,8 МГц/ч. После достижения дна провала, фиксируются минимальные критические частоты суточного хода. Отношение значений $foF2$ в провале к суточному максимуму представлено в табл. 1.

Приближение полярной стенки отчетливо идентифицируется по ионограммам ВЗ, где появляется трек бокового отражения. По мере приближения момента T_c , действующая высота и предельная частота наклонных отражений уменьшаются.

При возрастании магнитной активности эффект провала в электронной концентрации «размывается», суточный максимум $foF2$ уменьшается, а частоты в провале возрастают. Этот эффект наблюдается на всех пунктах ВЗ. Например, на станции вблизи Санкт-Петербурга в спокойных геомагнитных условиях критическая частота слоя $F2$ уменьшается в 3,5 раза по сравнению с суточным максимумом, а при возмущенных условиях отношение $foF2_{max} / T_m \approx 2,5$. В вечерние часы, особенно при наличии магнитных возмущений, оценить изменение $foF2$ не удалось, по причине наличия сильных отражений от спорадического E -слоя и экранировки $F2$ -слоя.

Таблица 1.

Сопоставление результатов ВЗИ при различных геофизических условиях

Фоновые условия	Санкт-Петербург				
	$foF2_{max}$, МГц	T_m , МГц	T_c , МГц	$foF2_{max} / T_m$, %	T_c / T_m , %
спокойные	5,7	1,6		356	
слабовозмущенные	5,2	1,7		306	
возмущенные	4,8	1,9		253	

	Мурманск				
	$foF2_{max}$, МГц	T_m , МГц	T_c , МГц	$foF2_{max} / T_m$, %	T_c / T_m , %
спокойные	4,5	1,7	3,1	265	82
слабовозмущенные	4,5	1,8	3	250	67
возмущенные	4,3	2,6		165	
	Амдерма				
	$foF2_{max}$, МГц	T_m , МГц	T_c , МГц	$foF2_{max} / T_m$, %	T_c / T_m , %
спокойные	4,4	1,9	3,5	232	84
слабовозмущенные	4,7	2,3	3,7	204	61
возмущенные	4,4	2,4		183	
	Салехард				
	$foF2_{max}$, МГц	T_m , МГц	T_c , МГц	$foF2_{max} / T_m$, %	T_c / T_m , %
спокойные	5,2	1,8		289	
слабовозмущенные	5,2	2,5		208	
возмущенные	4,4	2,4		183	

Сопоставление результатов НЗИ при различных геофизических условиях

Фоновые условия	Мурманск - Амдерма				
	МНЧ max, МГц	Тм, МГц	Тс, МГц	МНЧ max /Тм, %	Тс /Тм, %
спокойные	8,7	3		290	
слабовозмущенные	8,9	3,9		228	
возмущенные	8,7	5,3	6	164	11
	Мурманск - Салехард				
	МНЧ max, МГц	Тм, МГц	Тс, МГц	МНЧ max /Тм, %	Тс /Тм, %
спокойные	11,6	4,5	7,9	258	43
слабовозмущенные	11,4	6	8,6	190	30
возмущенные	9,9	5,6		177	
	Санкт-Петербург - Амдерма				
	МНЧ max, МГц	Тм, МГц	Тс, МГц	МНЧ max /Тм, %	Тс /Тм, %
спокойные	15,1	4,4		343	
слабовозмущенные	14,2	4,9	7,8	290	37
возмущенные	12,2	6,4		190	
	Санкт-Петербург - Салехард				
	МНЧ max, МГц	Тм, МГц	Тс, МГц	МНЧ max /Тм, %	Тс /Тм, %
спокойные	16,1	4,4		366	
слабовозмущенные	15,4	5,3		291	
возмущенные	13,3	6,6		202	
	Санкт-Петербург - Мурманск				
	МНЧ max, МГц	Тм, МГц	Тс, МГц	МНЧ max /Тм, %	Тс /Тм, %
спокойные	9,9	3,2		309	
слабовозмущенные	8,8	4		220	
возмущенные	8,2	3,8		216	

В суточном ходе МНЧ моды 1F2 (табл. 2) наблюдаются идентичные закономерности, как и в ходе f_oF2 при ВЗ. Приближение экваториальной стенки провала к средней точке радиотрассы (точке отражения) вызывает постепенное уменьшение МНЧ. При вхождении точки в днище провала, МНЧ падает в 2,6–3,5 раза по отношению к максимальному значению МНЧ за сутки. Трассы, более высокоширотные, находящиеся в авроральной зоне, подвержены воздействию полярной стенки провала, при прохождении которой через точку отражения МНЧ возрастают. Приближение полярной стенки к трассе вдоль дуги большого круга можно зафиксировать по наличию боковых мод распространения на ионограмме.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрено воздействие главного ионосферного провала (ГИП) на частотный диапазон распространения диагностических сигналов сети

наклонного радиозондирования ионосферы. Показано, что ГИП оказывает сильное влияние на частотные диапазоны радиотехнических систем, работающих на F-модах распространения. Ширина диапазона частот, в котором возможно проведение сеансов радиосвязи, в течении суток будет изменяться в 2–3 раза и зависеть от геомагнитной активности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Благовещенский Д.В., Жеребцов Г.А. Высокоширотные геофизические явления и прогнозирование КВ радиоканалов. М.: Наука, 1987. 272 с.
- Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука. 1988. 527 с.
- Рогов Д.Д., Выставной В.М., Благовещенская Н.Ф. Российская высокоширотная сеть наклонного зондирования ионосферы // Метеорология и гидрология. 2021. № 4. С. 5–13.
- Aa E., Zou S., Erickson P.J. et al. Statistical Analysis of the Main Ionospheric Trough Using Swarm in Situ

Measurements // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2020. V. 125. e2019JA027583. <https://doi.org/10.1029/2019JA027583>.

Halcrow B.W., Nisbet J.S. A model of *F*2 peak electron densities in the main trough region of the ionosphere // Radio Sci. 1977. V. 12, N. 5. P. 815–820.

Ishida T., Ogawa Y., Kadokura A. et al. Seasonal

variation and solar activity dependence of the quiet-time ionospheric trough // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2014. V. 119. P. 6774–6783. <https://doi.org/10.1002/2014JA019996>.

Muldrew D.B. F-layer ionization troughs deduced from Alouette data // J. Geophys. Res. 1965. V. 70, N 11. P. 2636–22650.

**АНАЛИЗ ВАРИАЦИЙ МОЩНОСТИ РАДИОЛОКАЦИОННОГО СИГНАЛА
ОТ СПУТНИКОВ ГРУППИРОВКИ «STARLINK»
ПО ДАННЫМ ИРКУТСКОГО РАДАРА НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ**

В.А. Ивонин, В.П. Лебедев

Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия,
ivonin1480@iszf.irk.ru

**ANALYSIS OF VARIATIONS IN RADAR SIGNAL POWER FROM STARLINK SATELLITES,
ACCORDING TO IRKUTSK INCOHERENT SCATTER RADAR DATA**

V.A. Ivonin, V.P. Lebedev

Institute of Solar-Terrestrial Physics of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia,
ivonin1480@mail.iszf.irk.ru

Аннотация. В работе представлены результаты анализа данных о радиолокации спутников группировки «Starlink», проводившейся на Иркутском радаре некогерентного рассеяния с 2019 по 2023 гг. Подтверждено предположение о связи суточной динамики мощности принятого радиолокационного сигнала с суточным ходом Солнца.

Ключевые слова: Starlink, эффективная площадь рассеяния, радиолокация, фазовый угол, Иркутский радар некогерентного рассеяния.

Abstract. This paper presents the results of the radar data analysis of the Starlink constellation satellites, carried out at the Irkutsk Incoherent Scatter Radar from 2019 to 2023. An assumption about the coupling between the diurnal dynamics of the received radar signal power and the diurnal cycle of the Sun has been confirmed.

Keywords: Starlink, radar cross section, radiolocation, phase angle, Irkutsk Incoherent Scatter Radar.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время низкоорбитальная спутниковая группировка «Starlink» насчитывает около 6 000 космических аппаратов (КА) [<https://www.space-track.org/#catalog>] и стремительно расширяется. Её планируемый максимальный размер — 12 000 спутников с возможным расширением до 34 400 [<https://en.wikipedia.org/wiki/Starlink>]. Уже при текущем размере группировки она порождает проблемы для оптической [Gallozzi et al., 2020] и радиоастрономии [Grigg et al., 2023]. С помощью Иркутского радара некогерентного рассеяния (ИРНР) осуществляют зондирование ионосферы и определяют параметры ионосферной плазмы до высот около 600 км. Высота орбиты подавляющей части КА «Starlink» — около 550 км [<https://www.space-track.org/#catalog>], в связи с чем они вносят помехи в принимаемый на ИРНР высотный профиль сигнала некогерентного рассеяния, что затрудняет его обработку и последующее восстановление высотного профиля электронной концентрации ионосферы.

В течение 4 лет (с конца 2019 по 2023 гг.) с помощью ИРНР проводилась радиолокация КА этой группировки совместно с зондированием ионосферы. Анализ мощности принятого радиолокационного (РЛ) сигнала, выявление особенностей его суточной динамики могут в дальнейшем способствовать разработке метода

нивелирования помех, вносимых этими спутниками в сигнал некогерентного рассеяния.

Цель работы — выявление и анализ суточной динамики КА «Starlink» по данным ИРНР.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Радиолокация спутников рассматриваемой группировки на ИРНР проводилась в течение четырёх лет, с 10.12.2019 г. по 20.10.2023 г. За рассматриваемый период радар отработал 184 сут. В качестве целей выбирались КА с близкими координатными характеристиками: наклонение орбиты — 53°, высота орбиты — ~552 км, пролетающие в области центра сектора сканирования [Лебедев и др., 2022]. Т. к. совместно с радиолокацией проводятся измерения параметров ионосферной плазмы [Алсаткин и др., 2020] (данные этих измерений использовались для анализа), в режиме радиолокации ИРНР работал каждые 5 мин. В качестве модели геомагнитного поля использовалась «JGRF-13» [Alken et al., 2021].

Существует несколько версий КА «Starlink» [<https://space.skyrocket.de/>] (табл. 1). Всего ИРНР регистрировал КА «Starlink» 52105 раз за указанный период измерений. Как видно из таблицы, в основном это КА версий «v1.0» и «v1.5», поэтому анализироваться будут именно они. Основное их отличие — в массе: у версии «v1.5» она больше из-за наличия лазерной межспутниковой линии связи [Пехтерев, 2022].

Таблица 1.

Сравнительные характеристики версий КА «Starlink»

Версия	Масса, кг	Орбита	Первый запуск	Зарегистрировано на ИРНР раз
v0.9	227	550 км × 550 км, 53° (типичная)	Май 2019	472
v1.0	~260	550 км × 550 км, 53° (типичная)	Ноябрь 2019	43 882
v1.5	~300	550 км × 550 км, 53° (типичная)	24.01.2021	7 735
v2.0	~1 250	550 км × 550 км, 53° (типичная)	27.02.23	0
v2.0 Mini	~750	550 км × 550 км, 53° (типичная)	19.04.2023	16

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Для анализа привлекались следующие результаты измерений: мощность РЛ сигнала КА, дальность и углы прихода, электронная концентрация ионосферы, измеряемая методом некогерентного рассеяния. Мощность РЛ сигнала ($P_{пр}$) от КА определяется так:

$$P_{пр}(\vec{R}) = \frac{P_{изл} \lambda^2 G^2}{(4\pi)^3 R^4} \sigma(\vec{R}) \cos^2(\Omega(\vec{R})), \quad (1)$$

где $P_{изл}$ — мощность излучённого сигнала, \vec{R} — радиус-вектор цели (в СК ИРНР), λ — длина волны сигнала, G — коэффициент усиления антенны, σ — эффективная площадь рассеяния (ЭПР) цели, Ω — угол поворота большой полуоси эллипса поляризации радиоволны вследствие эффекта Фарадея при распространении от радара до цели и обратно:

$$\Omega(\vec{R}) = \frac{q_e^3}{c \epsilon_0 m_e^2 \omega^2} \int_0^{\vec{R}} N_e(\vec{r}') |\vec{B}(\vec{r}')| \cos(\alpha(\vec{r}')) d\vec{r}' \quad (2)$$

где q_e — элементарный заряд, c — скорость света в вакууме, ϵ_0 — электрическая постоянная, m_e — масса электрона, ω — рабочая циклическая частота сигнала, $N_e(\vec{r}')$ — электронная концентрация вдоль луча зрения, $\vec{B}(\vec{r}')$ — геомагнитная индукция, $\alpha(\vec{r}') = \vec{r}' \vec{B}$.

Среднесуточная динамика мощности (1) строится следующим образом: за каждые сутки, в которые проводилась радиолокация, вычисляются усреднённые отчёты мощности за эти сутки с заданным шагом усреднения; затем за каждый отсчёт времени, соответствующий выбранному шагу усреднения, производится усреднение мощности по отсчётам в этот момент времени за все исследуемые сутки.

В формуле (1) можно учесть тот факт, что спутники группировки «Starlink» регистрируются на ИРНР под примерно одними и теми же углами и на одних и тех же дальностях и частотах, и тогда эти параметры и зависящие от них величины можно исключить из усреднения. Таким образом, среднесуточная динамика мощности пропорциональна ЭПР спутника и квадрату косинуса угла поворота эллипса поляризации радиоволны вследствие эффекта Фарадея. Известно, что спутник группировки «Starlink» состоит из двух плоских частей, пересекающихся под прямым углом: прямоугольной панели с солнечными батареями и панели практически прямоугольной формы со всеми остальными компонентами КА [Пехтерев, 2022]. В течение суток КА меняет свою ориентацию в соответствии с ходом Солнца. Вследствие этого можно предположить, что ЭПР такого спутника имеет чётко выраженную суточную динамику. Тогда

формула среднесуточной динамики мощности примет вид:

$$\bar{P}(t_j) \sim \overline{\sigma(t_j) \cos^2(\Omega)_j}, \quad (3)$$

где t_j — узел сетки усреднения, $j = \overline{0, N-1}$, N — количество отсчётов среднесуточной динамики, $\cos^2(\Omega)_j$ — среднесуточная динамика квадрата косинуса угла поворота эллипса поляризации радиоволны вследствие эффекта Фарадея (является почти постоянной).

Для проверки этого предположения вычислялся по аналогичной методике среднесуточный ход фазового угла β — угла между радиус-вектором (в СК ИРНР) КА и вектором, направленным от КА на Солнце (рис. 1). Данный угол вычислялся так:

$$\beta = \arccos\left(\frac{\vec{r}_s(\vec{r}_\odot - \vec{r}_s)}{|\vec{r}_s| |\vec{r}_\odot - \vec{r}_s|}\right), \quad (4)$$

где \vec{r}_s — радиус-вектор спутника, \vec{r}_\odot — радиус-вектор Солнца.

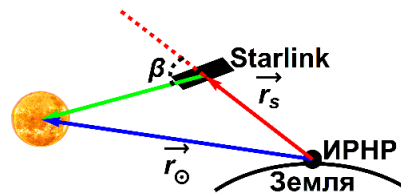


Рис. 1. Схема расчёта фазового угла

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 2 на среднесуточные динамики мощности принятого РЛ сигнала (формулы (2), (3)) от КА «Starlink» версий «v1.0» и «v1.5» наложена среднесуточная динамика квадрата косинуса фазового угла с Солнцем (формула (4)). Видно, что для обеих версий среднесуточная динамика имеет два выраженных пика: дневной (в 07:30 UT) и ночной (в 19:30 UT), как и среднесуточная динамика квадрата косинуса фазового угла (только у неё они сдвинуты на час назад). У версии «v1.5» дневной пик разделён на два. Времена пиков среднесуточной динамики мощности в целом соответствуют временам пиков среднесуточной динамики квадрата косинуса фазового угла, что подтверждает предположение о том, что суточная динамика мощности РЛ сигнала обусловлена ходом Солнца. Это свидетельствует о том, что КА «Starlink» действительно меняет свою ориентацию в пространстве в зависимости от времени суток в соответствии с направлением на Солнце, а это, в свою очередь, приводит к изменению ЭПР — ЭПР КА «Starlink» имеет суточный ход.

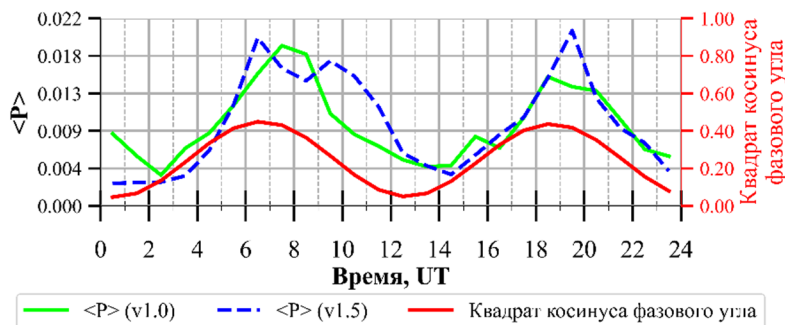


Рис. 2. Сравнение среднесуточных динамик мощности

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проанализированы данные ИРНР по принятой мощности РЛ сигнала от КА «Starlink» с 2019 по 2023 гг. В основном регистрировались КА версий «v1.0» и «v1.5». Для них построены среднесуточные динамики мощности. Они имеют два ярко выраженных пика: дневной (в 07:30 UT) и ночной (в 19:30 UT). У версии «v1.5» дневной пик разделён на два. Сравнение этих динамик со среднесуточной динамикой квадрата косинуса фазового угла показывает, что такой бимодальный вид суточной динамики мощности РЛ сигнала обусловлен суточным ходом Солнца (спутник поворачивается в зависимости от направления на Солнце), и в результате ЭПР КА «Starlink» также меняется и имеет суточный ход.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алсаткин С.С., Медведев А.В., Ратовский К.Г. Особенности метода восстановления Ne на Иркутском радаре некогерентного рассеяния // *Солнечно-земная физика*. 2020. Т. 6, № 1. С. 97–110. DOI: 10.12737/szf-61202009.
- Лебедев В.П., Сетов А.Г., Ермаков В.Ю. Антенна Иркутского радара некогерентного рассеяния: математическая модель, методы калибровки // *Мат-лы Всероссийской открытой науч. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн»*, Муром, 28–30 июня 2022 г. С. 527–537. DOI: 10.24412/2304-0297-2022-1-527-537.
- Пехтерев С.В., Макаренко С.И., Ковальский А.А. Описательная модель системы спутниковой связи Starlink // *Системы управления, связи и безопасности*. 2022. № 4. С. 190–255. DOI: 10.24412/2410-9916-2022-4-190-255.
- Alken P., Thébault E., Beggan C.D. et al International Geomagnetic Reference Field: the thirteenth generation // *Earth Planets Space*. 2021. V. 73, iss. 49. DOI: 10.1186/s40623-020-01288-x.
- Gallozzi S., Scardia M., Maris M. Concerns about ground based astronomical observations: a step to safeguard the astronomical sky // *Instrumentation and Methods for Astrophysics 2020*. arXiv:2001.10952
- Grigg D., Tingay S.J., Sokolowski M. et al. Detection of intended and unintended emissions from Starlink satellites in the SKA-Low frequency range, at the SKA-Low site, with an SKA-Low station analogue // *Astronomy & Astrophysics*. 2023. V. 678. L6. DOI: 10.1051/0004-6361/202347654.
- URL: <https://www.space-track.org/#catalog> (дата обращения 30.05.2024).
- URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Starlink> (дата обращения 30.05.2024).
- URL: <https://space.skyrocket.de/> (дата обращения 30.05.2024).

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ГАЛО 46° ПРИ ИЗМЕНЕНИИ РАЗМЕРА
АТМОСФЕРНЫХ ЛЕДЯНЫХ ГЕКСАГОНАЛЬНЫХ ЧАСТИЦ
В РАМКАХ МЕТОДА ФИЗИЧЕСКОЙ ОПТИКИ**

Н.В. Кан¹, В.А. Шишко¹, Н.В.Кустова¹, А.В. Коношонкин^{1,2}

¹ Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Россия,
n.kan.08@mail.com

²Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

**STUDY OF FORMATION OF A 46° HALO WHEN CHANGING SIZE OF ATMOSPHERIC ICE
HEXAGONAL PARTICLES WITHIN THE FRAMEWORK OF PHYSICAL OPTICS METHOD**

N.V. Kan¹, V.A. Shishko¹, N.V. Kustova¹, A.V. Konoshonkin^{1,2}

¹V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia,
n.kan.08@mail.com

²National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

Аннотация. Работа посвящена исследованию изменчивости гало 46° при росте мелкого хаотически ориентированного ледяного гексагонального столбика. Решение строилось в рамках приближения физической оптики по всей сфере направлений рассеяния для хаотически ориентированного гексагонального столбика в диапазоне размеров от 10 до 30 мкм, при длине волны 0.532 мкм, показателе преломления 1.3116. Результаты демонстрируют, как формируется гало 46° при росте размера гексагонального кристалла.

Ключевые слова: рассеяние света, физическая оптика, частицы льда, перистые облака, физическая оптика, оптические свойства

Abstract. The paper is devoted to the study of the variability of a 46° halo during the growth of a small chaotically oriented hexagonal ice column. The solution was built within the physical optics approximation over the entire sphere of scattering directions for a chaotically oriented hexagonal column in the size range from 10 to 30 microns, with a wavelength of 0.532 microns and a refractive index of 1.3116. The results demonstrate how a 46° halo is formed with an increase in the size of a hexagonal crystal.

Keyword: light scattering, physical optics, ice particles, cirrus clouds, physical optics, optical properties

ВВЕДЕНИЕ

Перистые облака покрывают значительную часть земной поверхности (до 30 %) и состоят из ледяных кристаллических частиц различной формы. Они существенно влияют на процесс переноса солнечной энергии через атмосферу и, соответственно, на формирование климата нашей планеты [Hong, 2007]. В зависимости от формы и ориентации кристаллических частиц, эти облака могут, как задерживать проникновение солнечного излучения вглубь атмосферы к земной поверхности, так и препятствовать выходу теплового излучения Земли в открытый космос, усугубляя парниковый эффект. Поэтому важно получить решение задачи рассеяния света на всем многообразии частицах перистых облаков, для их корректного учета в климатических моделях.

Задача рассеяния света на ледяных несферических частицах является сложной задачей атмосферной оптики, которая традиционно решается точными численными методами, такими как DDA, FDTD, PSTD и др. Однако область применимости точных численных методов ограничена размером частиц 5-10 мкм, поскольку для более крупных частиц решение является слишком ресурсозатратным. Так как размеры частиц перистых облаков и крупного полевого аэрозоля достигают 1000 мкм, то общепринятым методом в таком случае является приближение геометрической оптики [Коношонкин и др., 2014]. Однако полученное решение непригодно для интерпретации данных лазерного

зондирования атмосферы, поскольку не может разрешить пик обратного рассеяния, очень важный для задач лазерного зондирования. Эту проблему можно обойти, используя метод физической оптики [Shishko et al., 2019]. Благодаря данному методу могут быть получены решения для кристаллических частиц. Приближение физической оптики основано на алгоритме трассировки пучков [Коношонкин и др., 2015]. Данный метод рассчитывает рассеянное поле в ближней зоне в рамках приближения геометрической оптики, а при переходе к дальней зоне учитываются дифракция и интерференция. Однако расчет дифракции для каждого рассеянного пучка – очень затратная операция, особенно для случая произвольно ориентированных частиц в облаке. Больше всего время расчета в приближении физической оптики возрастает с увеличением количества граней в частице.

Помимо радиационного воздействия, ледяные облака вызывают в атмосфере различные оптические явления, такие как гало, паргелии, околозенитные и касательные дуги, а также солнечные столбы [Moilanen, Gritsevich, 2022].

При некоторых условиях атмосфера бывает насыщена мелкими кристаллами, имеющими шестигранные основания, прямой угол между шестигранным основанием и боковой гранью, ответствен за отклонение луча света на 46°, так образуется красноватое с внутренней стороны гало, но оно может состоять и из всех цветов спектра. Такой вид гало называется гало 46°. Гало 22° часто

наблюдается в природе и является широко известным оптическим явлением, оно образовано двугранным углом 60° между боковыми гранями кристалла. В отличие от гало 22° , гало 46° наблюдается значительно реже.

В некоторых исследованиях моделировались гало и другие оптические явления путем расчета траекторий лучей, которые зависят от взаимного расположения Солнца и кристаллов льда (или ориентации кристаллов льда), а также от пути солнечного света через грани кристаллов. Для такого моделирования доступно несколько программ (например, HaloSim и HaloPoint), использующих известные минимальные отклонения солнечного света для заданных форм кристаллов льда и относительных положений между Солнцем и кристаллами льда. Также оценивали геометрию кристаллов льда на основе углов, под которыми наблюдались гало, в частности, для объяснения редко встречающихся описанных гало, таких как 9° , 18° , 20° [Um, McFarquhar, 2022].

Для таких направлений исследования как перенос излучения и калибровка положения спутников на орбите (в случае, когда используется лазерный луч и атомные часы), необходимо иметь решение задачи рассеяния света на атмосферных кристаллических частицах для всей сферы направлений рассеяния. Такое решение можно получить в рамках приближение физической оптики.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА

Решение строилось по всей сфере направлений рассеяния для гексагонального столбика размерами 10, 20 и 30 мкм при длине волны 0.532 мкм, зависимость элемента M_{11} матрицы обратного рассеяния света от угла рассеяния θ показан на рис. 1.

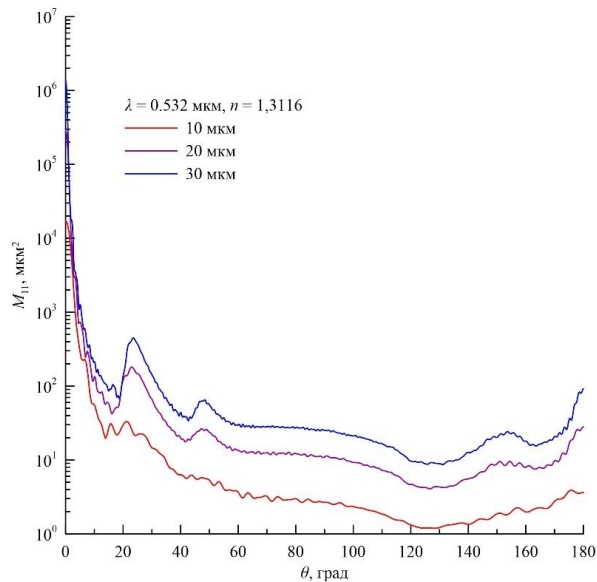


Рис. 1. Зависимость элемента M_{11} матрицы обратного рассеяния света от угла рассеяния θ в рамках приближения физической оптики для гексагонального столбика размером 10, 20 и 30 мкм

На рис. 1 видно, что гало 46° наблюдается, как для 20 мкм, так и для 30 мкм гексагонального

столбика, но не наблюдается у 10 мкм столбика. Поэтому было решено провести дополнительное исследование влияния размера гексагональной кристаллической частицы на формирование гало 46° . Для этого было построено решение для диапазона размеров столбика от 10 до 20 мкм с шагом 1 мкм. В результате удалось показать, как формируется гало 46° в зависимости от размера гексагонального столбика (рис. 2).

Из рис. 2 видно, что для гексагональных столбиков длиной до 10 мкм гало 46° не наблюдается. Оно начинает формироваться с ростом размера кристалла, а когда гексагональный кристалл становится порядка 15 мкм, гало 46° уже отчетливо распознается.

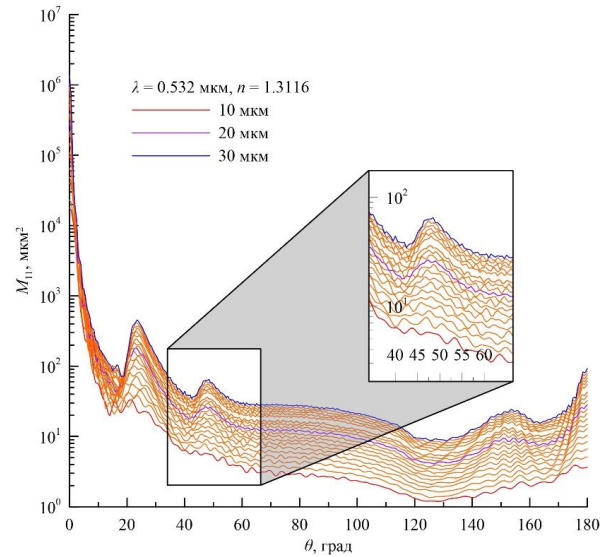


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, только размер гексагонального столбика варьировался от 10 до 30 мкм с шагом 1 мкм

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты численного исследования показали, что у гексагональных столбиков размером менее 10 мкм гало 46° не наблюдается, оно начинает формироваться с ростом размера кристалла, и когда кристалл становится порядка 15 мкм, гало 46° уже отчетливо распознается.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Коношонкин А.В., Кустова Н.В., Боровой А.Г. Граница применимости приближения геометрической оптики для решения задачи обратного рассеяния света на квазигоризонтально ориентированных гексагональных ледяных пластинках // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27, № 08. С. 705–712.
- Коношонкин А.В., Кустова Н.В., Боровой А.Г. Алгоритм трассировки пучков для задачи рассеяния света на атмосферных ледяных кристаллах. Часть 1. Теоретические основы алгоритма // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28, № 04. С. 324–330.
- Hong G. Parameterization of scattering and absorption properties of nonspherical ice crystals at microwave frequencies // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. D11208.

Junshik Um, Greg M. McFarquhar. Formation of atmospheric halos and applicability of geometric optics for calculating single-scattering properties of hexagonal ice crystals: Impacts of aspect ratio and ice crystal size // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2015. V. 165. P. 134–152.

Moilanen Ja., Gritsevich M. Light scattering by airborne

ice crystals – An inventory of atmospheric halos // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2022. V.290, P. 108313.

Shishko V.A., Konoshonkin A.V., Kustova N.V. et al. Coherent and incoherent backscattering by a single large particle of irregular shape // Opt. Express. 2019. V. 27, N 23. P. 32984–32993.

**ДИНАМИКА ПРОДОЛЬНЫХ ТОКОВ ЗОНЫ 1 ИИДЖИМЫ-ПОТЕРМЫ
В ПЕРИОД СТАЦИОНАРНОЙ МАГНИТОСФЕРНОЙ КОНВЕКЦИИ
ПО ДАННЫМ ТЕХНИКИ ИНВЕРСИИ МАГНИТОГРАММ**

В.Э. Капустин, С.Б. Лунюшкин, Ю.А. Караваев, Ю.В. Пенских, В.В. Мишин

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия,
kapustin@iszf.irk.ru

**DYNAMICS OF FIELD-ALIGNED CURRENTS IN REGION 1 OF IJIMA-POTERMA DURING
THE PERIOD OF STATIONARY MAGNETOSPHERIC CONVECTION ACCORDING TO
THE MAGNETOGRAM INVERSION TECHNIQUE**

V.E. Kapustin, S.B. Lunyushkin, Y.A. Karavaev, Y.V. Pensikh, V.V. Mishin

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia,
kapustin@iszf.irk.ru

Аннотация. Представлено исследование интенсивностей крупномасштабных пространственных распределений дневных и ночных продольных токов (ПТ), полученных на основе техники инверсии магнитограмм (ТИМ) в период стационарной магнитосферной конвекции (SMC) 24 сентября 1998 г. Количественно-качественный анализ показал, что в ходе SMC наблюдалось монотонное усиление и квазиравенство между дневными и ночными интенсивностями ПТ зоны 1, при этом рост интенсивности дневных ПТ начался во время слабой суббури, случившейся перед началом SMC, а перед окончанием SMC наблюдался общий спад интенсивностей ПТ зоны 1.

Ключевые слова: стационарная магнитосферная конвекция, продольные токи зоны 1.

Abstract. A study of intensities of large-scale spatial distributions of dayside and nightside field-aligned currents (FAC), obtained using the magnetogram inversion technique (MIT) from ground-based magnetometers, during the period of stationary magnetospheric convection (SMC) on September 24, 1998 is presented. Quantitative and qualitative analysis showed that during the SMC period there was a monotonic increase and quasi-equilibrium between dayside and nightside FACs intensities of region 1, while the increase in the intensity of dayside FAC began before the SMC, during the substorm; before the end of SMC, a decrease in FAC intensities was observed.

Keywords: stationary magnetospheric convection, field-aligned currents region 1.

ВВЕДЕНИЕ

Для объяснения различных типов геомагнитных возмущений (суббурь, бурь и т.д.), которые возникают при взаимодействии солнечного ветра с магнитосферой, Дж. Данжи [Dungey, 1961] предложил общую концепцию механизма пересоединения между межпланетным (ММП) и геомагнитным полем. Одним из таких типов является стационарная магнитосферная конвекция (SMC), предложенная Sergeev et al. [1996]. С ростом пересоединения на дневной магнитопаузе антисолнечная конвекция создает накопление открытого магнитного потока в долях хвоста, что в ионосфере проявляется как расширение полярной шапки (ПШ). Затем пересоединение открытых силовых линий в дальнем хвосте магнитосферы вызывает обратную магнитосферную конвекцию. Предполагается, что во время SMC скорости дневного и ночного пересоединения равны между собой. SMC наблюдается, как правило, в течение 3–6 ч при устойчивой южной компоненте ММП, без характерных для взрывной фазы суббури резких изменений продольных токов (ПТ) при слабо меняющихся индексах AU (~150 nT) и AL (~200 nT) ($dAL/dt < 250$ nT/min); SMC может начинаться и заканчиваться суббурей [Sergeev et al., 1996; DeJong et al., 2009].

Считается, что крупномасштабные ПТ отражают интенсивность и конфигурацию магнитосферной конвекции, которая управляется параметрами солнечного ветра и ММП. При исследовании динамики крупномасштабных ПТ по данным

AMPERE, Anderson et al. [2014] пришли к результату, что в подготовительной фазе суббури дневные ПТ создаются пересоединением на дневной магнитопаузе, а остальные части системы ПТ формируются по мере того, как конвекционные потоки движутся обратно к Солнцу. Сильная взаимосвязь между ПТ зоны 1 и дневным пересоединением была также отмечена в работе [Cohon et al., 2014]. Однако до сих пор остается неясной взаимосвязь дневных и ночных ПТ зоны 1 в период SMC и их роль в системе ионосфера–магнитосфера. В связи с этим данная работа посвящена изучению динамики крупномасштабных ПТ зоны 1 во время события SMC 24.09.1998.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Геомагнитная обстановка 24.09.1998 г. в период 14:00–00:00 UT представлена на рис. 1, где наблюдались две суббури и SMC. Первая слабая суббуря наблюдалась с 14:00 по 16:30 UT (начало взрывной фазы 15:13 UT) и затем перешла в режим SMC (16:30–20:25 UT), который закончился сильной суббурей в 20:25–23:30 UT (начало взрывной фазы 20:25 UT).

Во время SMC наблюдалась преимущественно южная компонента ММП ($B_z < 0$, рис. 1а), при этом скорость солнечного ветра была повышенной и постоянной $v = 440$ км/с (рис. 1б). В геомагнитных индексах SMU, SML и SME (рис. 1 в, г) при их высоком уровне в ходе SMC признаков суббури не наблюдалось.

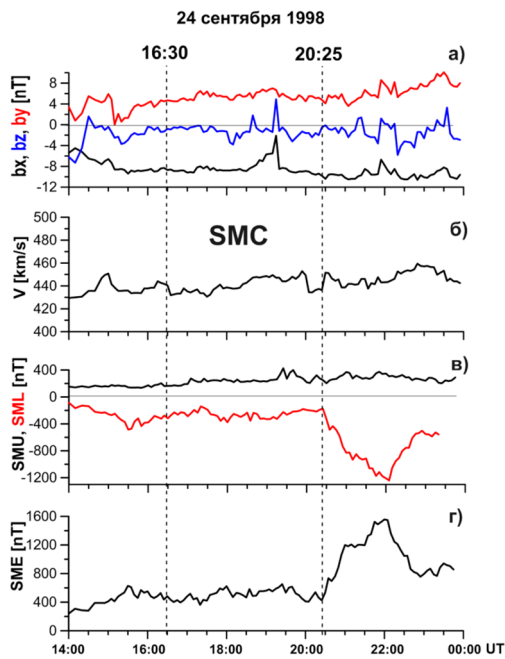


Рис. 1. Графики изменения компонент ММП (а), скорости солнечного ветра (б), авроральных индексов SML, SMU (в) и SME (г) для 14:00–24:00 UT 24.09.1998; пунктирными линиями отмечены границы режима SMC

Для исследования SMC использовался наземный метод ТИМ (техника инверсии магнитограмм) [Базаржапов et al., 1979], а также основанный на нём метод диагностики границ АО [Пенских et al., 2021]. ТИМ обеспечивает расчет карт двумерных распределений эквивалентных токов, электрического потенциала, горизонтальных и ПТ и других электродинамических параметров высокоширотной ионосферы на основе 1-минутных данных непрерывных геомагнитных измерений на мировой сети наземных станций. Одним из ключевых выходных параметров ТИМ является интенсивность втекающих и вытекающих крупномасштабных ПТ зоны 1 Иджимы-Потермы. Разделив меридианом «утро–вечер» (06–18MLT) карты крупномасштабных ПТ, в период 14:00–00:00 UT (с шагом 5 минут) были получены значения интенсивностей дневных и ночных ПТ зоны 1, как полусумма интенсивностей втекающих–вытекающих системы ПТ зоны 1 на дневной и ночной стороне для северного полушария (рис. 2).

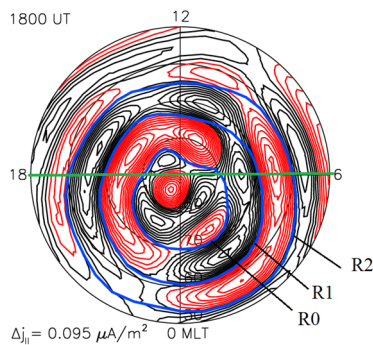


Рис. 2. Распределение плотности ПТ для 18:00 UT 24.09.1998 по данным ТИМ; красные изолинии — вытекающий ПТ, черные — втекающий ПТ, синие линии — границы зон ПТ, зеленая линия — меридиан «утро–вечер»

РЕЗУЛЬТАТЫ

Одной из причин возникновения SMC 24.09.1998 г. стало, по-видимому, развитие небольшой суббури в 14:00–16:30 UT. В этот период наблюдался явный дисбаланс между дневными и ночными интенсивностями ПТ зоны 1 (рис. 3а, б). Резкое усиление ночного ПТ происходит вследствие развития суббурового токового клина, как процесса пересоединения замкнутых магнитных силовых линий в околоземной части (10–15 R_E) плазменного слоя [Mishin et al., 2017]. Одновременно с усилением интенсивности ночных ПТ монотонно усиливались и дневные ПТ, которые были непосредственно связаны с крупномасштабной динамикой ПТ. После 16:00 UT интенсивность ночных ПТ уменьшалась, но при этом интенсивность дневных ПТ продолжала усиливаться.

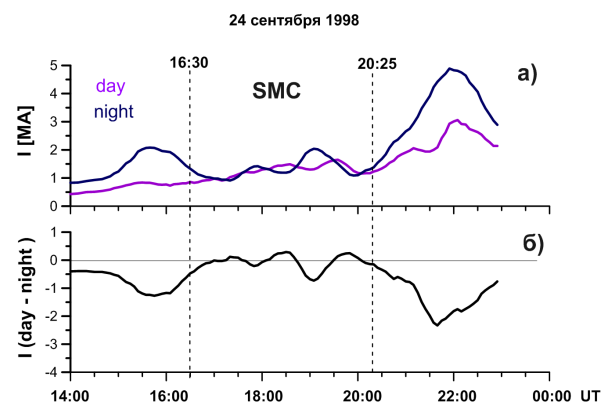


Рис. 3. Графики изменения интенсивностей дневных (day) и ночных (night) ПТ зоны 1 (а), разница между дневными и ночными интенсивностями ПТ зоны 1 (б)

После окончания суббури в период 16:30–20:25 UT устанавливается SMC, где наблюдалось монотонное усиление (рис. 3а) и квазиравенство между дневными и ночными интенсивностями ПТ (рис. 3б). Мы предполагаем, во-первых, что в этот период источником дневных ПТ является генератор ЭДС, работающий на нормальной к магнитопаузе компоненте магнитного поля V_p в открытой плазменной мантии магнитосферного хвоста. Во-вторых, источником ночных ПТ является генератор ЭДС, который сформировался в среднем хвосте магнитосферы (35–50 R_E) в результате перемещения околоземной X-линии. Также мы предполагаем, что в период SMC непрерывно действуют два генератора, которые обеспечивают монотонный рост и равенство между дневными и ночными интенсивностями ПТ, при этом дневные ПТ усиливались еще до SMC.

Спустя некоторое время усиление ПТ прекратилось и в 20:00 UT начался спад интенсивностей ПТ. Скорее всего такая реакция ПТ, связана с инверсией знака южной компоненты ММП, которая возникла в период 19:20–19:45 UT (рис. 1а). Как правило, уменьшение скорости пересоединения на дневной стороне магнитосферы или поворот южной компоненты ММП к северу должны приводить к окончанию SMC в виде развития суббури или затухания

геомагнитной активности [Sergeev et al., 1996]. Действительно, в нашем случае после уменьшения интенсивностей ПТ снова наблюдается их резкий рост, который соответствует началу взрывной фазы сильной суббури (20:25 UT) после режима SMC.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам данного исследования можно предположить, что процессы дневного и ночного пересоединений влияют соответственно на дневные и ночные интенсивности ПТ зоны 1 во время SMC. Увеличение общей интенсивности ПТ в этот период может также свидетельствовать об усилении магнитосферной конвекции. Наши результаты согласуются с работой Kissinger et al. [2012], в которой авторы предположили, что выполнения условия баланса скоростей дневного и ночного пересоединений недостаточно для поддержания SMC. Для этого необходимо еще и формирование во внутренней магнитосфере высокоскоростных конвекционных потоков плазмы, которые должны быстро возвращаться на дневную сторону и при этом усиливать общую интенсивность ПТ зоны 1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Базаржапов А.Д., Матвеев М.И., Мишин В.М. Геомагнитные вариации и бури. Новосибирск, Наука, 1979, 248 с.
Пенских Ю.В., Лунюшкин С.Б., Капустин В.Э. Геомагнитный метод автоматической диагностики границ авроральных овалов в двух полушариях Земли // Солнечно-земная физика. 2021. Т. 7, №. 2. С. 63–76. DOI: 10.12737/szf-72202106.

Anderson B.J., Korth H., Waters C.L. et al. Development of large-scale Birkeland currents determined from the Active Magnetosphere and Planetary Electrodynamics Response Experiment // *Geophys. Res. Lett.* 2014. V. 41, N 9. P. 3017–3025. DOI: 10.1002/2014gl059941.

Coxon J.C., Milan S.E., Clausen L.B.N. et al. A superposed epoch analysis of the regions 1 and 2 Birkeland currents observed by AMPERE during substorms // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2014. V. 119, N 12. P. 9834–9846. DOI: 10.1002/2014ja020500.

DeJong A.D., Ridley A.J., Cai X., Clauer C.R. A statistical study of BRIs (SMCs), isolated substorms, and individual sawtooth injections // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2009, V. 114, N A8. P. A08215. DOI: 10.1029/2008ja013870.

Dungey J.W. Interplanetary Magnetic Field and the Auroral Zones // *Phys. Rev. Lett.* 1961. V. 6, N 2. P. 47–48. DOI: 10.1103/PhysRevLett.6.47.

Kissinger J., McPherron R.L., Hsu T.S., Angelopoulos V. Diversion of plasma due to high pressure in the inner magnetosphere during steady magnetospheric convection // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2012. V. 117, N A5. P. A05206. DOI: 10.1029/2012ja017579.

Mishin V.M., Mishin V.V., Lunyushkin S.B. et al. 27 August 2001 substorm: Preonset phenomena, two main onsets, field-aligned current systems, and plasma flow channels in the ionosphere and in the magnetosphere // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2017. V. 122, N 5. P. 4988–5007. DOI: 10.1002/2017ja023915.

Sergeev V.A., Pellinen R.J., Pulkkinen T.I. Steady magnetospheric convection: A review of recent results // *Space Sci. Rev.* 1996. V. 75, N 3. P. 551–604. DOI: 10.1007/bf00833344.

ИОНОГРАММЫ С НЕТИПИЧНЫМИ СЛЕДАМИ, ПОЛУЧЕННЫЕ В ОБСЕРВАТОРИИ КАЛИНИНГРАДСКОГО ФИЛИАЛА ИЗМИРАН В 2023 ГОДУ

А.А. Климанова, А.В. Тимченко, М.В. Клименко

Калининградский филиал института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н. В. Пушкова Российской академии наук, Калининград, Россия,
klimanova.nastasya@internet.ru

IONOGRAMS WITH UNIQUE TRACES OBTAINED AT THE OBSERVATORY OF WD IZMIRAN IN 2023

A.A. Klimanova, A.V. Timchenko, M.V. Klimenko

West Department of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation,
Russian Academy of Sciences, Kaliningrad, Russia,
klimanova.nastasya@internet.ru

Аннотация. В данной работе представлены уникальные (нетипичные) для Калининградской области ионограммы вертикального зондирования. Ионограммы получены при помощи ионозонда «Парус-А», расположенного в обсерватории Калининградского Филиала ИЗМИРАН в пос. Ульяновка Калининградской обл. (54,36° с.ш. и 20,12° в.д.). Нами были отобраны ионограммы со следующими особенностями: дополнительный F3s след, экранирующий спорадический Es-слой и авроральный спорадический Es-слой.

Ключевые слова: ионограмма, F3s след, Es-слой.

Abstract. This work presents unique (untypical) vertical sounding ionograms for the Kaliningrad region. The ionograms were obtained using the Parus-A ionosonde located at the observatory of WD IZMIRAN in Ladygino village, Kaliningrad region (54.36° N and 20.12° E). We selected ionograms with the following unique features: manifestations of the F3s trace, the shielding sporadic Es layer, and the auroral sporadic Es-layer.

Keywords: ionogram, F3s trace, Es-layer.

ВВЕДЕНИЕ

Ионозонд несмотря на то, что является стародавним средством мониторинга и исследования ионосферы [Брюнели и Намгаладзе, 1988] по-прежнему остаётся актуальным инструментом получения информации о состоянии ионосферы от E области до максимума электронной концентрации в F области [Литвинов и др., 2023]. Ионозонд может применяться не только для вертикального зондирования, но и для наклонного зондирования, для калибровки радаров некогерентного рассеяния, для оценки скоростей дрейфов. Также с помощью ионозонда можно наблюдать проявления неоднородностей ионосферы различного масштаба: перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ), F рассеяние, поляризационный джет, спорадические Es-слои различного типа. Следует отметить, что в периоды геомагнитных бурь указанные особенности проявляются ярче и на более низкоширотных станциях по сравнению со спокойными геомагнитными условиями. Как было описано в работе [Степанов, 2023] поляризационный джет на ионограмме проявляется как дополнительный F3s след на ионограмме в субавроральной ионосфере. На рис. 1. представлена ионограмма полученная над Якутском с явным проявлением F3s следа в частотном диапазоне 2–5 МГц.

ДААННЫЕ

В данной работе показаны ионограммы, полученные с помощью ионозонда «Парус-А». Данный ионозонд работает в 15-минутном режиме. Его основные характеристики представлены ниже (табл. 1):

Таблица 1.

Характеристики приёмного и передающего устройств «Парус-А» [Гивишвили и др., 2015].

1. Характеристика	Радиопередающее устройство
Диапазон рабочих частот	1 – 20 МГц
Длительность импульсов	100 – 200 мкс
Максимальная импульсная мощность излучения	12 кВт
Средняя мощность излучения, не более	60 Вт
2. Характеристика	Радиоприёмное устройство
Диапазон рабочих частот	1 – 20 МГц
Уровень собственных шумов	–185 дБ*Вт/Гц
Динамический диапазон, более	110 дБ*Вт
Погрешность измерения амплитуд отражённых сигналов	1 дБ
Погрешность привязки времени к шкале времени ГНСС	1 мкс

Нами было просмотрено ~23092 ионограмм в период с 01 января по 31 августа 2023 г. в поисках проявлений поляризационного джета, полной экранировки спорадическим Es-слоем, спорадического слоя, отражающего радиоволны во всём доступном диапазоне частот, а также спорадических Es-слоёв аврорального типа.

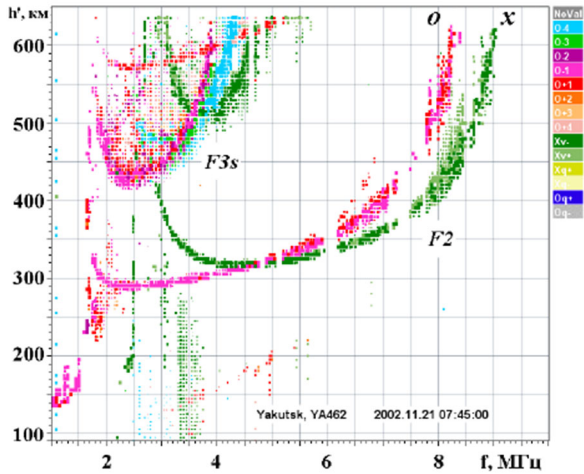


Рис. 1. Ионограмма с дополнительным характерным следом отражения (F3s), зарегистрированный на ст. Якутск 21 ноября 2002 г. в 16.45 местного времени [Степанов, 2023]

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

В таблице 2 представлено количество уникальных ионограмм за первую половину 2023 г., разделённым по нашим критериям.

Таблица 2.

Количество уникальных ионограмм с дополнительными следами различного типа.

след F3s и ПИВ	Полная экранировка Es	Es по всему диапазону частот
49	18	3

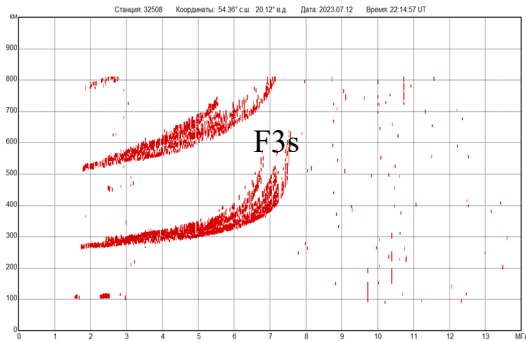


Рис. 2. Ионограммы над Калининградской обл., на которых виден дополнительный след отражения F3s, являющийся характерным проявлением поляризационного джета

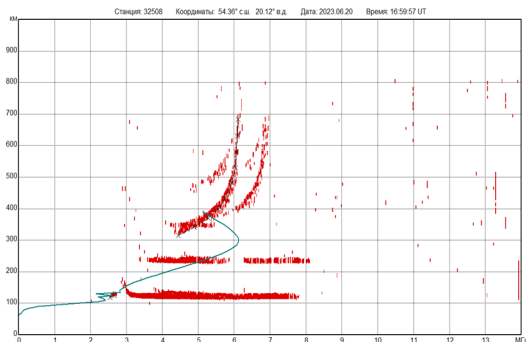


Рис. 3. Ионограммы над Калининградской обл., на которых виден дополнительный след, являющийся отражением перемещающегося ионосферного возмущения

Таблица 3.

Количество ионограмм с зафиксированными следами F3s и ПИВ с разделением по времени суток

Время, UT	Количество, шт
Ночь (21:00 – 03:00)	22
Утро (03:00 – 09:00)	6
День (09:00 – 18:00)	6
Вечер (18:00 – 21:00)	15

Как видно из таблицы 3 основное количество случаев приходится на ночное и вечернее время. В дневное время проявление поляризационного джета наблюдаться не может.

На рис. 2 и 3 представлены примеры ионограмм, иллюстрирующие дополнительный F3s след, перемещающиеся ионосферные возмущения и авральный спорадический Es-слой. Так на рис. 2 показаны дополнительные следы отражения F3s ассоциируемые с поляризационным джетом.

На рис. 3 изображены ионограммы со следом ассоциируемым с ПИВом. Интересной особенностью следов отражения F3s и ПИВов является то, что их достаточно сложно отличить друг от друга. Для более чёткого разделения их между собой необходимо проанализировать данные геомагнитных индексов, а также последовательность ионограмм. На левой ионограмме наблюдается X-образный след, а на правой видны множественные кратные отражения, которые не соответствуют отражениям от F2-слоя. Такие следы являются признаками перемещающихся ионосферных возмущений.

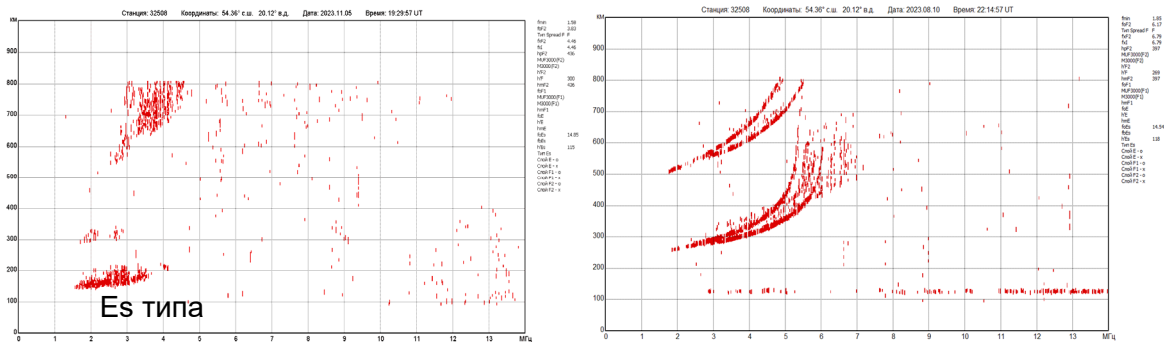


Рис. 4. Ионограммы над Калининградской обл., на которых видны спорадический *Es*-слой аврорального типа (слева) и спорадический *Es*-слой занимающий весь диапазон частот

На рис. 4. показана ионограмма со спорадическим *Es*-слоем аврорального (а) типа (слева) и спорадический *Es*-слой занимающий весь диапазон частот. Особенностью ионограммы с *Es* типа а является то, что данный тип *Es*-слоя ранее не фиксировался над Калининградской обл. Правая ионограмма представляет особый интерес тем, что на ней можно рассмотреть отображения не только ПИВа, но и поляризационного джета, а также *Es*, занимающий весь диапазон частот. Так же, хотим заметить, спорадический слой хоть и отражает на всех частотах, но при этом не является экранирующим. Данная особенность характерна для всех случаев с *Es* занимающим весь диапазон частот.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе было проанализировано ~23092 ионограмм, полученных за половину 2023 г. на магнитно-ионосферной обсерватории (54,36° с.ш. и 20,12° в.д.) КФ ИЗМИРАН в Калининградской обл. Примерно на одинаковых количествах ионограмм проявляются следующие особенности: дополнительный след F3s, связанный с поляризационным джетом, дополнительный след перемещающихся ионосферных возмущений, и спорадический *Es*-слой с полной экранировкой *F* области. В

единичных случаях (всего 3) спорадический *Es*-слой занимает весь частотный диапазон на ионограмме.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-77-10004, <https://rscf.ru/project/23-77-10004/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Брюнели Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988.

Гивишвили Г.В., Крашенинников И.В., Лещенко Л.Н. Ионозонд «ПАРУС-А»: новый измерительный комплекс ИЗМИРАН. М.: ИЗМИРАН, 2015. С. 150–159.

Литвинов С.В., Глинкин И.А., Скрипачев В.О. Мониторинг ионосферы Земли методом совмещенного зондирования // Всероссийские открытые Армандовские чтения: Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн. 2023. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/monitoring-ionosfery-zemli-metodom-sovmeschennogo-zondirovaniya>.

Степанов А.Е. Исследования крупномасштабных структур высокоширотной ионосферы и поляризационного джета по измерениям на якутской цепочке ионозондов и спутниковым данным: Автореферат дис. д.ф.-м.н. Якутск. 2023.

ВЛИЯНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ НА ТРУБОПРОВОДЫ В ВЫСОКИХ ШИРОТАХ

Д.В. Костарев¹, В.А. Пилипенко^{2,3}, О.В. Козырева^{2,3}

¹Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия,
kostarev@iszf.irk.ru

²Геофизический центр Российской академии наук, Москва, Россия

³Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

IMPACT OF SPACE WEATHER ON PIPELINES IN HIGH-LATITUDE REGIONS

D.V. Kostarev¹, V.A. Pilipenko^{2,3}, O.V. Kozyreva^{2,3}

¹Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia,
kostarev@iszf.irk.ru

²Geophysical Center of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

³Schmidt Institute of Physics of the Earth of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Аннотация. При организации систем катодной защиты трубопроводов необходимо иметь возможность рассчитывать вариации потенциала «труба – земля» при геомагнитных возмущениях. С этой целью авторами разработан программный код для расчета потенциала трубопровода при заданном возмущении электротеллурического поля в поверхностных слоях Земли. В качестве примера проведены оценки искажения потенциала «почва – труба» при суббуре, имевшей место 9 октября 2018 г. Использована база данных магнитных станций в Российской Арктике и глобальная модель проводимости поверхностных слоев Земли. Возмущение теллурического поля построено с помощью пересчета зарегистрированного магнитного возмущения в амплитуду теллурического поля по импедансному соотношению. Модельная трубопроводная сеть представлена в виде набора эквивалентных схем замещения, которые объединяются между собой для формирования узловой сети проводимости. При помощи метода узловой матрицы полной проводимости определены значения потенциала в узлах трубопроводной системы.

Ключевые слова: катодная защита, потенциал «труба – земля», геомагнитные пульсации, геоиндуцированные токи

Abstract. When organizing cathodic protection systems for pipelines, it is necessary to be able to calculate variations in the “pipe-ground” potential during geomagnetic disturbances. For this purpose, the authors have developed a software code for calculating the pipeline potential for a given disturbance of the electrotelluric field in the surface layers of the Earth. As an example, the distortion of the «soil-pipe» potential was assessed during the substorm that took place on October 9, 2018. A database of magnetic stations in the Russian Arctic and a global model of the conductivity of the Earth’s surface layers were used. The telluric field disturbance is constructed by recalculating the recorded magnetic disturbance into the telluric field amplitude using the impedance relationship. The model pipeline network is presented in the form of a set of equivalent circuits, which are combined with each other to form a nodal conductivity network. Using the nodal admittance matrix method, the potential values at the nodes of the pipeline system were determined.

Keywords: cathodic protection, pipe-to-soil potential, geomagnetic pulsations, geinduced currents

ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее значимых факторов космической погоды являются геоиндуцированные токи (ГИТ) в технологических проводящих заземленных системах, вызываемые резкими изменениями геомагнитного поля dB/dt (см. обширную литературу в обзоре [Пилипенко, 2021]). Во многих странах ведутся исследования по влиянию ГИТ на энергетические системы, включающие линии электропередачи (ЛЭП) и высоковольтные трансформаторы. Помимо негативных воздействий на энергетические системы, геомагнитные возмущения и связанные с ними вариации геоэлектрического поля создают колебания потенциала «почва– труба» (ППТ), способные выводить напряжение трубопровода из безопасного диапазона защиты от электрокоррозии (обычно катодная защита подпитывает отрицательный потенциал около 2 В). При нарушениях катодной защиты в трубопроводах усиливается коррозия в точках заземления или повреждения изоляции, выходят из строя электронные системы контроля. Эти проблемы особенно актуальны для высокоширотных центров газонефтедобычи и транспортировки (арктический шельф,

Ямал), где геомагнитные возмущения наиболее интенсивны.

Таким образом, влияние явлений, обусловленных магнитосферными возмущениями (бурь, суббурь и геомагнитных пульсаций), необходимо учитывать при организации системы катодной защиты трубопроводов. Возможные вариации ППТ в условиях геомагнитных возмущений можно оценить исходя из карты амплитуд возбуждаемых теллурических полей в поверхностных слоях Земли и модельных расчетов индукции в заземленном проводнике, как это предложено в [Lehtinen, Pirjola, 1985; Boteler, 2013]. Следуя этому подходу, авторами данной работы разработан программный код для расчета потенциала модельного трубопровода с определенной конфигурацией при заданном возмущении электротеллурического поля. В качестве примера применения численного метода рассмотрена суббуря, имевшая место 9 октября 2018 г. Оценка теллурического поля проведена путем пересчета магнитного возмущения, зарегистрированного на магнитных станциях в Российской Арктике, в амплитуду теллурического поля с учетом данных о структуре проводимости земной коры.

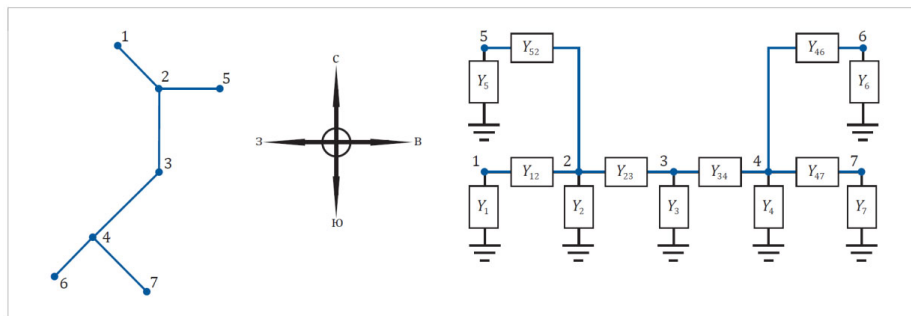


Рис. 1. Схема модельного трубопровода, где каждое соединение определяется как узел сети: магистральный трубопровод проходит от узла 1 до узла 4 и имеет ответвления от узла 2 до узла 5 и от узла 4 до узлов 6 и 7

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛА «ПОЧВА – ТРУБА» С ПРИМЕНЕНИЕМ П-ОБРАЗНЫХ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ

В силу значительной протяженности и сложной топологии трубопроводной системы ее участки могут существенно различаться параметрами проводимости как подстилающей поверхности, так и самого трубопровода (ответвления могут иметь меньший относительно основной трубы диаметр, возможны разные варианты электрохимической защиты и т. д.). Для расчета наведенного потенциала между трубой и грунтом в конкретной точке должна приниматься во внимание вся трубопроводная сеть. Поэтому сложную трубопроводную систему удобно представить в виде набора эквивалентных схем замещения, объединенных между собой в узловую электрическую цепь. Такая цепь состоит из соединений между узлами и соединений с землей от каждого узла. Затем, используя метод узловой матрицы полной проводимости, определяют значения ППТ в любой точке моделируемой трубопроводной сети. При этом потенциалы в узлах ищутся как решение системы линейных уравнений, полученных для каждого узла цепи на основании закона Ома и правил Кирхгофа [Boteler, 2013].

ПРИМЕР РАСЧЕТА ВАРИАЦИИ ПОТЕНЦИАЛА «ПОЧВА – ТРУБА»

Схема модельного трубопровода представлена на рис. 1. Каждое соединение или изгиб на схеме определяется как узел сети. Магистральный трубопровод проходит от узла 1 до узла 4 и имеет ответвления от узла 2 до узла 5 и от узла 4 до узлов 6 и 7. Участок 2–3 направлен вдоль линии север – юг, ответвление 2–5 ориентировано с запада на восток. Остальные участки расположены под углом 45°. Длины участков L_{ik} между узлами i и k равны: $L_{12} = 50$ км, $L_{23} = 100$ км, $L_{34} = 120$ км, $L_{25} = 50$ км, $L_{46} = 40$ км, $L_{47} = 80$ км. Диаметр и толщина стенки приняты: основной трубы – $D_M = 762$ мм и $\delta_M = 15,6$ мм, ответвлений – $D_B = 381$ мм и $\delta_B = 10$ мм, соответственно. Удельное сопротивление трубной стали считали равным $\rho = 0,18 \cdot 10^{-3}$ Ом/км, проводимость покрытия $C = 5 \cdot 10^{-6}$ См/м².

Рассмотрим отклик модельного трубопровода на суббурю. Изолированная суббуря началась 9 октября 2018 г. в ~15 UT и закончилась в тот же день в ~19 UT (рис.2). Рассмотрим регион вблизи станции Диксон (DIX). Синтезированное по данным магнитных

вариаций (x , y компоненты) теллурическое поле (E_x , E_y компоненты) в районе станции DIX показано на рис.3. Для моделирования использованы данные магнитной обсерватории DIX и модель проводимости в области обсерватории.

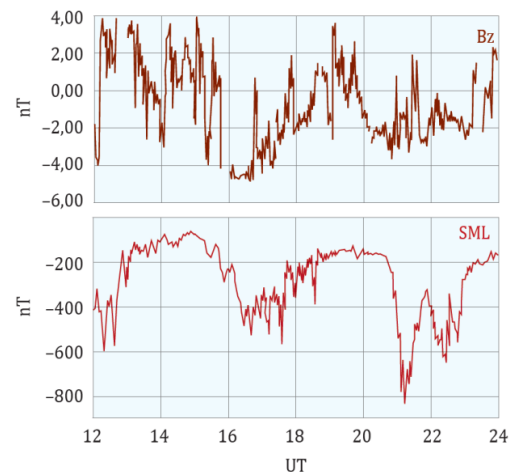


Рис. 2. Межпланетное магнитное поле Bz, SME-индекс в период 09.10.2018, 12–24 UT

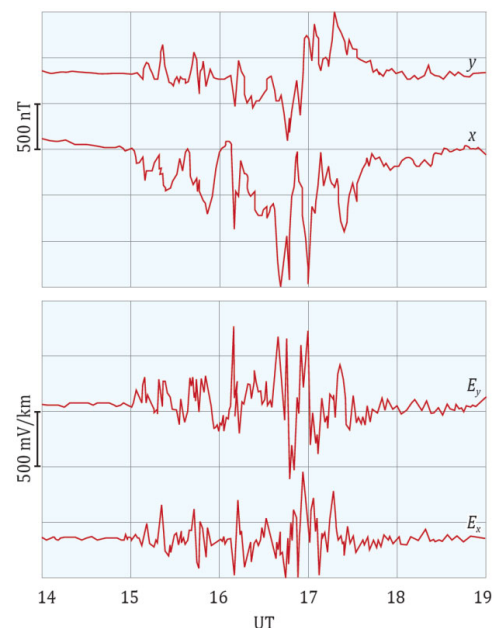


Рис. 3. Вариации горизонтальных компонент магнитного поля x , y на станции DIX и синтезированное по данным магнитных вариаций теллурическое поле E_x , E_y для периода 09.10.2018, 14–19 UT

С использованием вариаций теллурического поля в качестве входного параметра по изложенной выше методике были рассчитаны вариации ППТ V в различных узлах модельного трубопровода (Рис.4). Установлено, что максимальный размах осцилляций потенциала в узлах трубопровода меняется от ~ 10 до ~ 100 В. Отметим, что модельный расчет дает несколько завышенные значения из-за выбранного большого сопротивления изоляции и пренебрежения реальным заземлением.

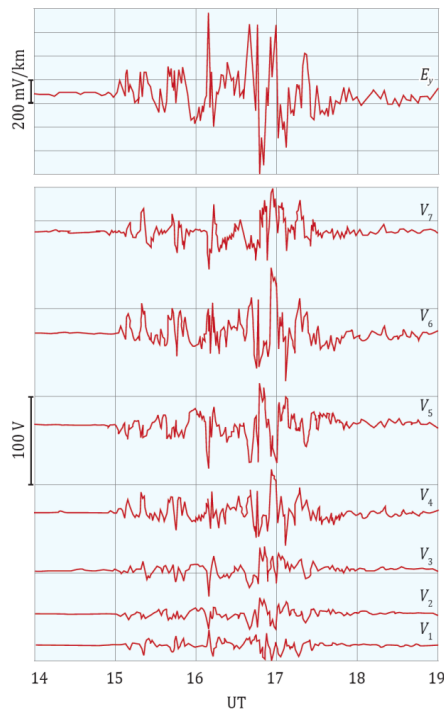


Рис. 4. Вариации теллурического поля E_y на станции DIK и вызванные ими вариации ППТ модельного трубопровода в узлах 1–7

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе авторы хотели продемонстрировать, что имеется как экспериментальная база, так и расчетные методики для количественной оценки вероятности риска выхода трубопровода из режима защиты от электрокоррозии. Детальной информации о трубопроводных системах в открытом доступе нет, поэтому приведенные в работе расчеты являются приближенной оценкой. Для дальнейшего развития метода моделирования необходимы более точные сведения о характеристиках трубопроводов и сравнение полученных модельных результатов с изменениями ППТ на реальных трубопроводах. Основная цель настоящей статьи состоит в том, чтобы привлечь внимание к проблеме влияния космической погоды на безопасность трубопроводных систем и начать диалог геофизиков со специалистами нефтегазовой отрасли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Пилипенко В. А. Воздействие космической погоды на наземные технологические системы // Солнечно-земная физика. 2021. Т. 7, № 3. С. 72–110.
- Lehtinen M., Pirjola R. Currents produced in earthed conductor networks by geomagnetically induced electric fields // Annales Geophysicae. 1985. V. 3. P. 479–484.
- Boteler D. H. A new versatile method for modelling geomagnetic induction in pipelines // Geophysical Journal International. 2013. V. 193. P. 98–109.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АТМОСФЕРНЫХ ВОЛН, ГЕНЕРИРУЕМЫХ ТРОПОСФЕРНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ, НА ВАРИАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ И ИОНОСФЕРЫ

Ю.А. Курдяева, Ф.С. Бессараб, О.П. Борчевкина, М.В. Клименко

Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н. В. Пушкова Российской академии наук, Калининград, Россия,
yakurdyeva@gmail.com

STUDY OF THE INFLUENCE OF ATMOSPHERIC WAVES GENERATED BY TROPOSPHERIC SOURCES ON VARIATIONS OF THE UPPER ATMOSPHERE AND IONOSPHERIC PARAMETERS

Yu.A. Kurdyeva, F.S. Bessarab, O.P. Borchevkina, M.V. Klimenko

Kaliningrad Branch of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS,
Kaliningrad, Russia

Аннотация. В работе продемонстрированы результаты численного моделирования распространения акустических и внутренних гравитационных волн, распространяющихся из тропосферы, с применением численной региональной модели атмосферы высокого разрешения AtmoSym и Глобальной самосогласованной модели Термосферы, Ионосферы и Протоносферы (ГСМ ТИП). Показано, что важнейшим механизмом, определяющим изменение пространственной структуры возмущений ПЭС при воздействии атмосферных волн, является возмущения компонент термосферного ветра. Показано, распространение атмосферных волн влияет на изменение электрического поля и приводит к магнитосопряженному эффекту.

Ключевые слова: акустические волны, внутренние гравитационные волны, термосфера, ионосфера

Abstract. The paper demonstrates the results of numerical modeling of the propagation of acoustic and internal gravity waves propagating from the troposphere using the numerical regional high-resolution atmospheric model AtmoSym and the Global Self-Consistent Model of the Thermosphere, Ionosphere and Protonosphere (GSM TIP). It is shown that the most important mechanism determining the change in the spatial structure of TEC perturbations under the influence of atmospheric waves is perturbations of the thermospheric wind components. It is shown that the propagation of atmospheric waves affects the change of the electric field and leads to the magnetoconjugate effect.

Keywords: acoustic waves, internal gravity waves, thermosphere, ionosphere

ВВЕДЕНИЕ

Результаты исследований последних лет [Borchevkina et al., 2021; Chernigovskaya et al., 2015] показывают значительный вклад волновых процессов в нижней и средней атмосфере в изменчивость параметров ионосферы. Одним из значимых волновых процессов в атмосфере является распространение акустических (АВ) и внутренних гравитационных волн (ВГВ), генерируемых в тропосфере метеорологическими источниками.

В данной работе численно исследовано влияние АВ и ВГВ верхнюю атмосферу и ионосферу с использованием нового подхода к воспроизведению волновых эффектов в крупномасштабной модели без учета параметризации волн от тропосферных источников. Для моделирования распространения волн был выбран период 29 мая 2017 г. В этот день над территорией Московского региона (55° с.ш., 37° в.д.) наблюдалось сильное метеорологическое событие [Куличков и др., 2019], которое стало источником широкого спектра волн. Данное метеорологическое событие наблюдалось на фоне восстановительной фазы геомагнитной бури, основная фаза которой пришлась на 27–28 мая 2017 г.

ЧИСЛЕННЫЕ РАСЧЕТЫ

Для численного исследования были привлечены численная модель атмосферы высокого разрешения AtmoSym [Gavrilov, Kshevetskii, 2014] и Глобальная самосогласованная модель Термосферы,

Ионосферы и Протоносферы (ГСМ ТИП) [Namgaladze et al., 1991]. Модель AtmoSym основана на решении системы нелинейных гидродинамических уравнений и адаптирована для решения задач о распространении волн, вызванных вариациями давления на поверхности Земли [Kurdyeva et al., 2018]. Модель ГСМ ТИП основана на численном интегрировании системы квазигидродинамических уравнений непрерывности, движения и теплового баланса для нейтральных и заряженных частиц холодной околоземной плазмы совместно с уравнением для электрического потенциала в интервале высот от 80 км до геоцентрического расстояния ~15 земных радиусов с учетом несовпадения географической и геомагнитной осей.

Основные этапы реализации используемого подхода включают в себя: моделирование распространения АВ и ВГВ с применением нелинейной гидродинамической модели атмосферы высокого разрешения с источником возмущений, заданным на основе экспериментальных данных; расчет локальных спектральных характеристик наблюдаемых волн; расчет притока тепла, обусловленного распространением рассчитанных волн; включение рассчитанного притока тепла в виде дополнительного источника в крупномасштабной модели.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Далее будут рассмотрены результаты расчета без включения волнового источника тепла в

крупномасштабную модель (M1) и расчета с включением источника волнового тепла (M2). Результаты расчетов (рис. 1) показали, что распространение волн из тропосферы приводит к: локальному разогреву термосферы и уменьшению $n[O]/n[N_2]$ над областью генерации волн; формированию дипольно-подобной структуры возмущений ПЭС с положительными и отрицательными значениями в окрестности источника атмосферных волн. Механизмом формирования такой структуры является нейтральный ветер, главным образом его меридиональная компонента. Известно, что на высотах F-области ионосферы ветер, направленный к экватору, способствует росту электронной концентрации за счет подъема плазмы в область меньших скоростей химических потерь, а ветер, направленный к полюсу, приводит к опусканию плазмы и соответственно к уменьшению электронной концентрации.

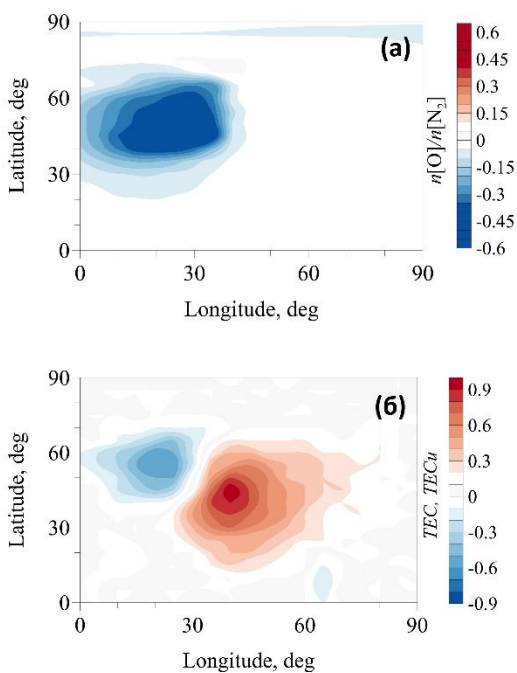


Рис. 1. Широтно-долготные распределения возмущений (M2–M1) $n[O]/n[N_2]$ (а) и ПЭС (б) на высоте 250 км (M2–M1) для момента времени 04:00 UT

С течением времени в западном направлении относительно области локализации источника появляются более мелкомасштабные возмущения ПЭС. Анализ изменения зональной скорости показал, что в европейском регионе в этот период времени происходит смена направления зонального ветра (с западного на восточный). Можно предположить, что смена направления зонального ветра приводит к эффектам, связанным с волновой фильтрацией [Kurduyeva et al., 2022; Medvedev et al., 2017] ветром. Известно, что если волны распространяются в направлении, противоположном направлению ветра, то амплитуда этих волн увеличивается, а масштабы возмущений уменьшаются. Если ветер и волны распространяются сонаправлено, то амплитуда волн уменьшается, а масштабы увеличиваются.

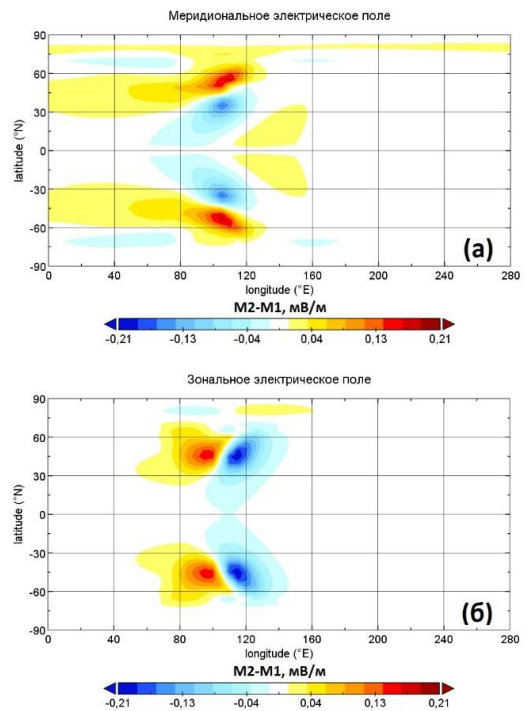


Рис. 2. Широтно-долготные распределения возмущений (мВ/м) меридионального (а) и зонального (б) электрического поля для момента времени 04:00 UT (геомагнитные координаты)

Изменения зонального и меридионального электрического поля (рис. 2) в проведенных расчетах также демонстрируют изменения преимущественно дипольного характера. При этом такие же изменения наблюдаются в магнитосопреженной точке. Изменения электрического поля, вызванные распространением волн из тропосферы, достигают 11% относительно фоновых значений в области локализации источника.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ ионосферных характеристик в проведенных расчетах показал, что распространение атмосферных волн в верхнюю атмосферу приводит к понижению $n[O]/n[N_2]$. Во время работы теплового источника в ионосфере в области локализации теплового источника наблюдается появление дипольной структуры в ПЭС: положительное возмущение ПЭС юго-восточной части источника волновой активности; отрицательное возмущение ПЭС северо-западной части источника волновой активности. Показано, что важнейшим механизмом, определяющим дипольно-подобную пространственную структуру возмущений ПЭС при воздействии атмосферных волн, является возмущение меридиональной компоненты термосферного ветра. Зональный ветер также оказывает влияние на структуру и интенсивность возмущений ПЭС. Показано, что распространение атмосферных волн влияет на изменение электрического поля.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-77-10004, <https://rscf.ru/project/23-77-10004/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Borchevkina O.P., Kurdyaeva Y.A., Karpov I.V. et al. Disturbances of the thermosphere and the ionosphere during a meteorological storm // *Atmosphere*. 2021. V. 12, N 11. P. 1384.
- Chernigovskaya M.A., Shpynev B.G., Ratovsky K.G. Meteorological effects of ionospheric disturbances from vertical radiosounding data // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2015. V. 136B. P. 235–243. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2015.07.006>.
- Куличков С.Н., Чунчузов И.П., Попов О.Е. и др. Внутренние гравитационные и инфразвуковые волны во время урагана в Москве 29 мая 2017 г. // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2019. Т. 55, № 2. С. 32–40.
- Gavrilov N.M., Kshevetskii S.P. Three-dimensional numerical simulation of nonlinear acoustic-gravity wave propagation from the troposphere to the thermosphere // *Earth Planets Space*. 2014. V. 66, N 88. <https://doi.org/10.1186/1880-5981-66-88>.
- Namgaladze A.A., Korenkov Y.N., Klimenko V.V. et al. Numerical modelling of the thermosphere-ionosphere-protonosphere system. // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 1991. V. 53. P. 1113–1124. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(91\)90060-K](https://doi.org/10.1016/0021-9169(91)90060-K).
- Kurdyaeva Y.A., Kshevetskii S.P., Gavrilov N.M., Kulichkov S.N. Correct boundary conditions for the high-resolution model of nonlinear acoustic-gravity waves forced by atmospheric pressure variations // *Pure and Applied Geophysics*. 2018. V. 175, N 10. P. 3639–3652. <https://doi.org/10.1007/s00024-018-1906-x>.
- Kurdyaeva Yu.A., Kshevetsky S.P., Borchevkina O.P., Karpov M.I. Wind effects in the thermosphere during the propagation of atmospheric waves generated by a tropospheric heat source // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2022. V. 62, N 4. P. 453–459. DOI: 10.1134/s0016793222040119
- Medvedev A.V., Ratovsky K.G., Tolstikov M.V. et al. Relation of internal gravity wave anisotropy with neutral wind characteristics in the upper atmosphere // *J. Geophys. Res.* 2017. V. 122, N 7. P. 7567.

СВЕРХТОНКИЕ ТОКОВЫЕ СЛОИ В ХВОСТЕ МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ И ДИССИПАЦИЯ ЭНЕРГИИ В НИХ НА ФАЗЕ НАКОПЛЕНИЯ СУББУРИ ПО ДАННЫМ МИССИИ MMS

М.В. Леоненко, Е.Е. Григоренко, Л.М. Зелёный

Институт космических исследований Российской академии наук, Москва, Россия,
makarleonen@gmail.com

SUPERTHIN CURRENT SHEETS IN THE EARTH'S MAGNETOTAIL AND ASSOCIATED ENERGY DISSIPATION DURING THE GROWTH PHASE OF SUBSTORM OBSERVED BY MMS SPACECRAFT

M.V. Leonenko, E.E. Grigorenko, L.M. Zelenyi

Space research institute of RAS, Moscow, Russia,
makarleonen@gmail.com

Аннотация. В данной работе исследуется профиль плотности тока в Токовом Слое геомагнитного хвоста во время распространения быстрых плазменных потоков. Показано присутствие вложенных Сверхтонких Токowych Слоев (СТС) с плотностью тока до 100 нА/м^2 . Ток в этих структурах преимущественно переносится сверхтепловой размагниченной популяцией электронов. Типичная полутолщина составляет порядка нескольких гирорадиусов тепловых электронов. СТС часто наблюдаются внутри вытянутых вдоль радиального направления хвоста магнитных островов. Показано, что эволюция таких островов происходит вследствие развития тиринг неустойчивости, что также приводит к ускорению электронных пучков. Ускоренные электронные пучки создают продольные токи в Плазменном Слое, в которых, в результате развития неустойчивостей, генерируются сильные электрические поля и происходит значительная диссипация энергии.

Ключевые слова: магнитосфера, геомагнитный хвост, токовый слой, диссипация энергии.

Abstract. This paper studies the current profile in the Current Sheet during the propagation of bursty bulk flows. The presence of superthin current sheets (STCSs) with current densities up to 100 nA/m^2 is shown. The current in such structures is predominantly carried by the suprathreshold demagnetized electron population. The typical half-thickness is of the order of a few gyroradiuses of thermal electrons. STCSs are often nested inside magnetic islands elongated along the radial magnetotail direction. It is shown that the evolution of such islands occurs due to the development of tearing instability, which also leads to the acceleration of electron beams. Accelerated electron beams generate field-aligned currents in the Plasma Sheet, in which the strong electric fields could be generated as a result of instabilities. These electric fields cause significant energy dissipation in the STCSs.

Keywords: magnetosphere, magnetotail, current sheet, energy dissipation

ВВЕДЕНИЕ

Эволюция тонких токовых слоев (ТТС) [Baunjo-hann et al., 2007] играет важную роль в процессах преобразования энергии в геомагнитном хвосте Земли [Angelopoulos et al., 2008; Lui et al., 2008]. Многоспутниковые миссии Cluster и THEMIS показали, что структура поперечного токового слоя (ТС) часто значительно отличается от простейшей модели Харриса [Harris, 1962]. Оказалось, что интенсивный и тонкий ТС вложен в более широкий ТС с меньшей плотностью тока [Petruccovich et al., 2011]. Внутренний слой имеет типичную полутолщину $L < \rho_p$, где ρ_p — гирорадиус протонов [Artemyev et al., 2013].

Считается, что ТТС может являться источником свободной энергии для развития плазменных неустойчивостей и магнитного пересоединения [Asano et al., 2004] благодаря метастабильности ТТС [Zelenyi et al., 2010]. Пространственный размер ТТС критически влияет на динамику частиц в нем и количество запасаемой свободной энергии. Это делает крайне важным определение полутолщины ТС. В работе [Zelenyi et al., 2020] была предложена новая аналитическая модель многомасштабного ТТС со сверхтонким токовым слоем (СТС), вложенным в него. Модель также предоставляет универсальную оценку толщины

вложенного СТС в зависимости от плазменных характеристик в ТТС. Современные данные миссии MMS позволяют наблюдать СТС благодаря данным магнитного поля высокого временного разрешения [Wang et al., 2018].

В данной работе представлен анализ множественных интенсивных токовых структур, которые наблюдались в плазменном слое (ПС) 6 июля 2017 г. с 15:24 по 16:05 UT. Данный интервал соответствует фазе накопления суббури. В ПС хвоста в это время наблюдалась активная X-линия, движущаяся в хвост. Вследствие этого спутники MMS наблюдали быстрые плазменные потоки (БПП), движущиеся из области магнитного пересоединения со множеством магнитных островов и вложенных интенсивных токовых структур [Leonenko et al., 2021].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Благодаря сильному флэппингу ПС, связанному с распространением БПП со скоростью до $\sim 1300 \text{ км/с}$, стало возможно наблюдение более 100 пересечений нейтральной плоскости ТС спутниками MMS. На рис. 1 представлен обзор исследуемого интервала по данным спутника MMS-1. Из поведения AL-индекса следует, что интервал соответствует фазе накопления суббури (см. рис. 1f). Начиная с 15:30 UT AL-индекс начинает падать и достигает $\sim -450 \text{ нТл}$ к 16:45 UT.

Сильный флэппинг ТС выражается в осцилляциях B_x -компоненты магнитного поля с амплитудой до 20 нТл (см. рис. 1а). Наблюдается смена направления распространения БПП с движения в хвост на движение к Земле (см. рис. 1б). Это свидетельствует о перемещении X-линии в хвост [Runov et al., 2003].

В ПС спутники MMS наблюдали 95 СТС с амплитудой тока >20 нА/м² [Leonenko et al., 2021]. Полутолщина СТС составила порядка $\sim(1-5) \rho_e$, где ρ_e — гирорадиус тепловых электронов. В каждом СТС был определен параметр адиабатичности электронов κ_e [Buchner & Zelenyi, 1989]. Обнаружено, что во многих СТС параметр $\kappa_e < 1$, что свидетельствует о наличии размагниченности тепловой и сверхтепловой популяций электронов.

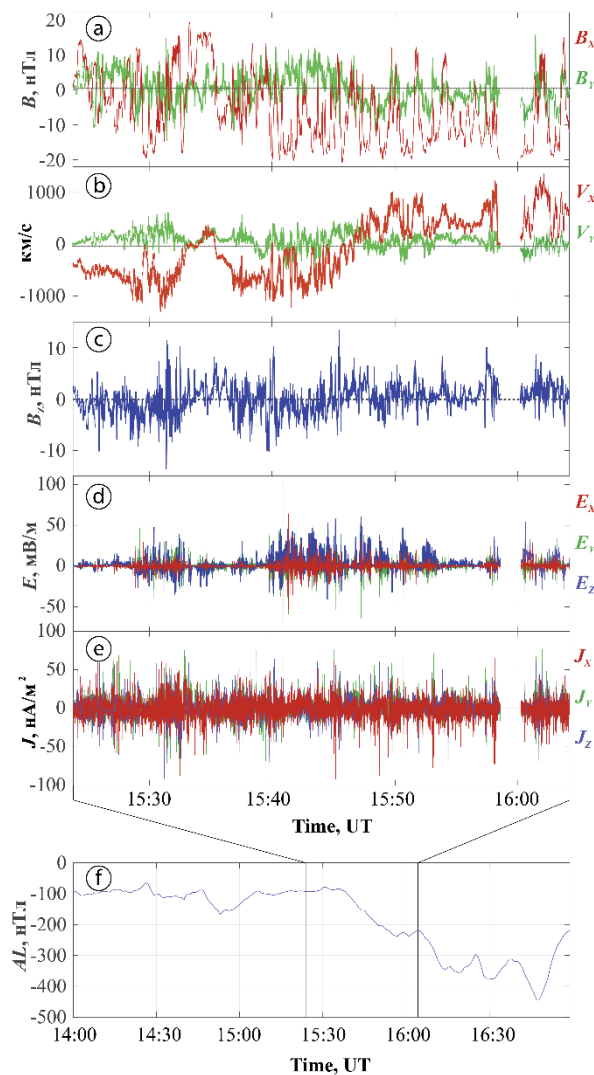


Рис. 1. Обзор данных MMS-1 во время интенсивного флэппинга ТС и распространения БПП 6 июля 2017 г. Сверху вниз: X- и Y-компоненты магнитного поля (а); X- и Y-компоненты потоковой скорости ионов (б); B_z -компонента магнитного поля (с); три компоненты электрического поля (д) и плотности электрического тока (е); AL-индекс (ф). Рисунок адаптирован из работы [Leonenko et al., 2021]

Оказалось, что именно размагниченная сверхтепловая популяция электронов часто переносит ток в СТС [Leonenko et al., 2021]. Таким образом

динамика токонесущей популяции электронов аналогична динамике ионов в ТТС. В работе [Leonenko et al., 2021] показано, что баланс натяжения силовых линий в СТС поддерживается пространственными градиентами тензора давления размагниченной токонесущей популяции электронов, аналогично моделям ТТС [Ashour-Abdalla et al., 1994].

На рис. 1с показано поведение B_z -компоненты магнитного поля: наблюдаются ее множественные биполярные вариации с амплитудой до 10 нТл. Биполярная вариация B_z свидетельствует о перемещении магнитного острова мимо спутников MMS. Такие магнитные острова могут быть результатом развития электронной тиринг неустойчивости [Tsareva et al., 2024].

В работе [Tsareva et al., 2024] показано, что в присутствии значительной размагниченной популяции электронов возможно развитие быстрой электронной тиринг моды, несмотря на присутствие стабилизирующей нормальной к слою B_z -компоненты магнитного поля. Признаки развития которой наблюдались спутниками MMS вблизи нейтральной плоскости ТС с 16:01:21 UT по 16:01:32 UT. В течение данного интервала наблюдалась биполярная вариация B_z -компоненты магнитного поля с амплитудой до ~ 5 нТл. Было обнаружено утоньшение и усиление СТС, вложенного в магнитный остров, примерно в 1.8 раз. Показано, что характерное время развития неустойчивости согласно экспериментальным наблюдениям составило ~ 4.5 с, что хорошо согласуется с теоретической оценкой — ~ 4.7 с.

Во внешнем ПС спутники MMS наблюдали продольные ускоренные электронные пучки и связанные с ними интенсивные токовые структуры [Leonenko et al., 2023]. Такие пучки могут являться результатом ускорения частиц вследствие развития электронной тиринг моды и «вторичного» магнитного пересоединения вблизи нейтральной плоскости. В токовых структурах наблюдалась интенсивная диссипация энергии до 2500 пВт/м³, что по порядку величины сопоставимо с энерговыделением в электронной диффузионной области пересоединения [Li et al., 2022]. Статистические исследования десятков интервалов распространения БПП в ПС показали, что интенсивные токовые структуры, генерируемые ускоренными продольными пучками электронов, могут наблюдаться всюду в ПС [Grigorenko et al., 2024].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наблюдения MMS показали, что на фазе начала суббури в ПС ближнего хвоста наблюдалась активная X-линия и ускоренные в ней БПП, которые, распространяясь в ПС стали источником энергии для развития турбулентности в нем [Ergun et al., 2018]. Турбулентное электромагнитное поле, в свою очередь, стало источником ускорения продольных электронных пучков. Еще одним источником ускорения продольных электронных пучков, по-видимому, являются динамические магнитные острова, в результате трансформации которых, генерируются индукционные электрические поля, способствующие

ускорению электронов пучков [Tsareva et al, 2024]. Такие электронные пучки с энергиями $\sim (2-7)$ кэВ приводят к образованию новых токовых структур, которые наблюдаются всюду в ПС [Grigorenko et al, 2024]. Их распространение в ПС приводит к развитию различных неустойчивостей, что выражается в наблюдении экстремальной мощности энерговыделения (j, E') до 2500 пВт/м³ (данная величина сопоставима с наблюдаемыми в электронной диффузионной области значениями [Li et al, 2022]). Таким образом, спутниковые наблюдения MMS позволили впервые наблюдать механизм передачи энергии от больших масштабов на электронные кинетические масштабы и диссипацию энергии на электронных масштабах в бесстолкновительной турбулентной плазме геомагнитного хвоста. Спорадическое ускорение электронных пучков, формирование СТС и последующую диссипацию энергии в них, происходящие во всему ПС можно сравнить с микровспышками (мелкомасштабными магнитными пересоединениями) в солнечной короне, которые рассматриваются как один из источников нагрева корональной плазмы [Raouafi et al, 2022].

Работа авторов выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант РФФ № 23-12-00031).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Artemyev A.V., Petrukovich A.A., Frank A.G. et al. Intense current sheets in the magnetotail: Peculiarities of electron physics // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2013. V. 118, iss. 6. P. 2789–2799.
- Asano Y., Mukai T., Hoshino M. et al. Statistical study of thin current sheet evolution around substorm onset // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2004. V. 109, iss. A5.
- Ashour-Abdalla M., Zelenyi L.M., Peroomian V., Richard R.L. Consequences of magnetotail ion dynamics // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 1994. V. 99, iss. A8. P. 14891–14916.
- Baumjohann W., Roux A., Le Contel O. et al. Dynamics of thin current sheets: Cluster observations // *Annales Geophys.* 2007. V. 25, iss. 6. P. 1365–1389.
- Büchner J., Zelenyi L.M. Regular and chaotic charged particle motion in magnetotail-like field reversals: 1. Basic theory of trapped motion // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 1989. V. 94, iss. A9. P. 11821–11842.
- Ergun R.E., Goodrich K.A., Wilder F.D. et al. Magnetic reconnection, turbulence, and particle acceleration: Observations in the Earth's magnetotail // *Geophys. Res. Lett.* 2018. V. 45, iss. 8. P. 3338–3347.
- Grigorenko E.E., Leonenko M.V., Malykhin A.Y. et al. Intense electric currents and energy conversion observed at electron scales in the plasma sheet during propagation of high-speed ion bulk flows // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2024. V. 129, iss. 6. P. e2023JA032318.
- Harris E.G. On a plasma sheath separating regions of oppositely directed magnetic field // *Il Nuovo Cimento.* 1962. V. 23. P. 115–121.
- Leonenko M.V., Grigorenko E.E., Zelenyi L.M. et al. MMS Observations of Super Thin Electron-Scale Current Sheets in the Earth's Magnetotail // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2021. V. 126, iss. 11. P. e2021JA029641.
- Leonenko M.V., Grigorenko E.E., Zelenyi L.M. Strong Nonideal Electric Fields and Energy Dissipation Observed by MMS within Field-Aligned Current Layers in the Plasma Sheet of the Earth's Magnetotail // *Atmosphere.* 2023. V. 14, iss. 4. P. 722.
- Li X., Wang R., Lu Q. et al. Three-dimensional network of filamentary currents and super-thermal electrons during magnetotail magnetic reconnection // *Nature Communications.* 2022. V. 13, iss. 1. P. 3241.
- Lui A.T.Y. Potential plasma instabilities for substorm expansion onsets // *Space Sci. Rev.* 2004. V. 113, iss. 1. P. 127–206.
- Lui A.T.Y. et al. Near-Earth substorm features from multiple satellite observations // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2008. V. 113, iss. A7.
- Petrukovich A.A., Artemyev A.V., Malova H.V. et al. Embedded current sheets in the Earth's magnetotail // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2011. V. 116, iss. A5.
- Raouafi N.E., Stenborg G., Seaton D.B. et al. Magnetic reconnection as the driver of the solar wind // *Astrophys. J.* 2023. V. 945, iss. 1. P. 28.
- Runov A., Nakamura R., Baumjohann W. et al. Current sheet structure near magnetic X-line observed by Cluster // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30, iss. 11. P. 1579.
- Tsareva O.O., Leonenko M.V., Grigorenko E.E. et al. Fast tearing mode driven by demagnetized electrons // *Geophys. Res. Lett.* 2024. V. 51, iss. 8. P. e2023GL106867.
- Wang R., Lu Q., Nakamura R. et al. An electron-scale current sheet without bursty reconnection signatures observed in the near-Earth tail // *Geophys. Res. Lett.* 2018. V. 45, iss. 10. P. 4542–4549.
- Zelenyi L.M., Petrukovich A.A., Artemyev A.V. et al. Metastability of current sheets // *Physics-Uspekhi.* 2010. V. 53, iss. 9. P. 933–941.
- Zelenyi L.M., Malova H.V., Grigorenko E.E. et al. Universal scaling of thin current sheets // *Geophys. Res. Lett.* 2020. V. 47, iss. 14. P. e2020GL088422.

ЛИДАРНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ СТРАТОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ И ОЗОНА НАД ТОМСКОМ

А.П. Макеев, А.В. Невзоров, С.И. Долгий

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук г. Томск, Россия, map@iao.ru

LIDAR OBSERVATIONS OF STRATOSPHERIC AEROSOL AND OZONE OVER TOMSK

A.P. Makeev, A.V. Nevzorov, S.I. Dolgiy

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia, map@iao.ru

Аннотация. В докладе приводятся и обобщаются результаты лидарных измерений на Сибирской лидарной станции (СЛС) вертикального распределения стратосферного аэрозольного слоя (СА) и озона. На основе длинного ряда наблюдений интегрального коэффициента обратного аэрозольного рассеяния, в Томске за 2018–2024 гг. проведен анализ изменений стратосферного аэрозольного слоя. Описан годовой ходовой ход вертикального распределения озона и зарегистрированный в марте 2023 г. довольно редкий процесс стратосферно-тропосферного переноса воздушных масс через тропопаузу.

Ключевые слова: Лазерное зондирование атмосферы, лидар, стратосферный аэрозоль, озон.

Abstract. The report presents and summarizes the results of lidar measurements of the vertical distribution of the stratospheric aerosol layer (CA) and ozone, made at the Siberian Lidar Station (SLS). Based on a long series of observations of the integral coefficient of reverse aerosol scattering, an analysis of changes in the stratospheric aerosol layer was carried out in Tomsk in 2018–2024. The annual course of the vertical distribution of ozone is described and a rather rare process of stratospheric-tropospheric transport of air masses through the tropopause was registered in March 2023.

Keywords: Laser sensing of the atmosphere, lidar, stratospheric aerosol, ozone.

ВВЕДЕНИЕ

На Сибирской лидарной станции (СЛС) Института оптики атмосферы СО РАН, расположенной в Томске (56,5° с.ш., 85° в.д.), на основе методов дистанционного оптического зондирования атмосферы с 1986 года продолжается долговременный регулярный мониторинг характеристик стратосферного аэрозольного слоя (СА) и озона. Стратосферный аэрозоль (СА) является одним из существенных климатообразующих параметров атмосферы, который в основном состоит из частиц 75 % водного раствора серной кислоты субмикронного диапазона размеров. Он рассеивает солнечное излучение, частично отражая его в обратном направлении, и в то же время пропускают тепловое излучение Земли и обеспечивают отрицательный радиационный приток в определенной степени компенсируют эффект глобального потепления.

Для исследования атмосферного озонового слоя и аэрозоля в последнее время используются методы лазерного дистанционного зондирования с использованием лидарной техники, которые позволяют оперативно получать информацию по вертикальному распределению озона (ВРО) в атмосфере. Они удачно дополняют подобную информацию, получаемую со спутников MetOp, SAGE II, TERRA и др., а также с помощью контактных методов: ракет и озонозондов.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 представлены данные измерений интегрального коэффициента обратного аэрозольного рассеяния над Томском с 2018 по 2024 гг. Здесь каждая точка является усредненным значением за 10 дней измерений (декада). Стрелками указаны взрывные извержения вулканов. Прямыми линиями

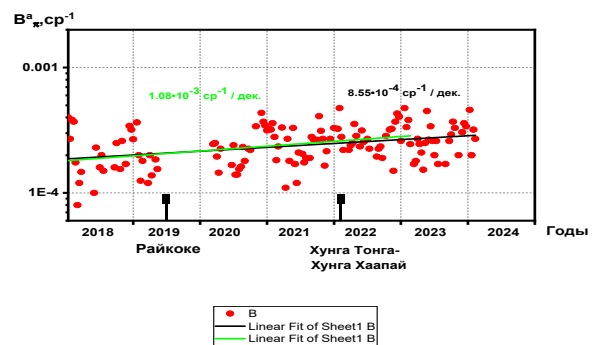


Рис. 1. Временной ход интегрального коэффициента обратного аэрозольного рассеяния на длине волны зондирования 532 нм в высотном диапазоне 15–30 км, зарегистрированный над Томском в 2018–2024 гг.

на рис. 1 обозначены тренды изменений интегрального коэффициента обратного аэрозольного рассеяния $B_{\pi}^{\alpha} B_{\pi}^{\alpha}$ на длине волны зондирования 532 нм в высотном диапазоне 15–30 км. Зеленая линия для 2018–2023 гг., черная — 2018–2024 гг.

Как показано ранее, при анализе долговременных измерений стратосферного аэрозольного слоя на СЛС ИОА СО РАН в Томске отмечен рост СА за 2018–2023 гг. со скоростью $1.08 \cdot 10^{-3} \text{sr}^{-1}$ за декаду (рис. 1, зеленая линия) [Nevzorov et al., 2023]. Этот рост был обусловлен глобальным влиянием взрывных извержений вулканов Райкоке в июне 2019 г., и подводного вулкана Хунга Тонга-Хунга Хаапай в январе 2022 г.

При анализе полученных результатов измерений интегрального коэффициента обратного аэрозольного рассеяния над Томском с 2018 по 2024 гг. была построена линейная регрессия, которая аппроксимируется прямой вида

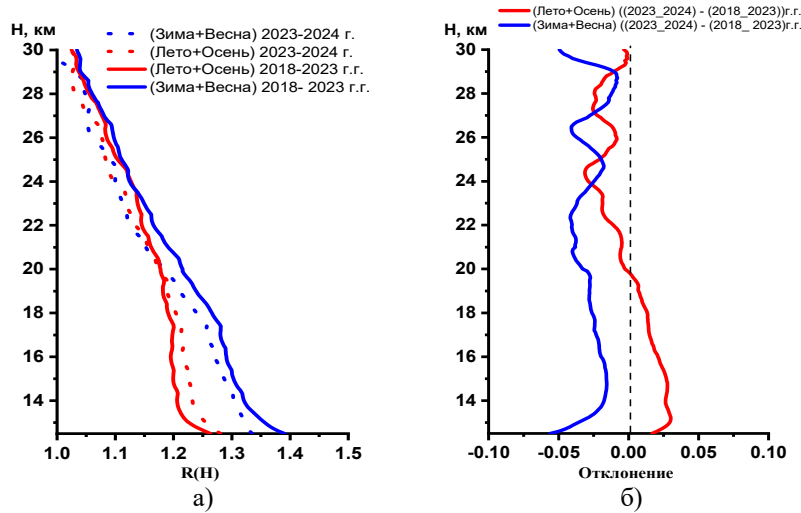


Рис. 2. а) Усредненные сезонные профили отношения рассеяния на длине волны 532 нм за 2018–2023 гг. - сплошная линия, в сравнении со средне сезонными профилями 2024 г. - пунктирная линия, полученные на СЛС. б) – Разница между профилями 2023-2024 года и профилями 2018-2023 гг.

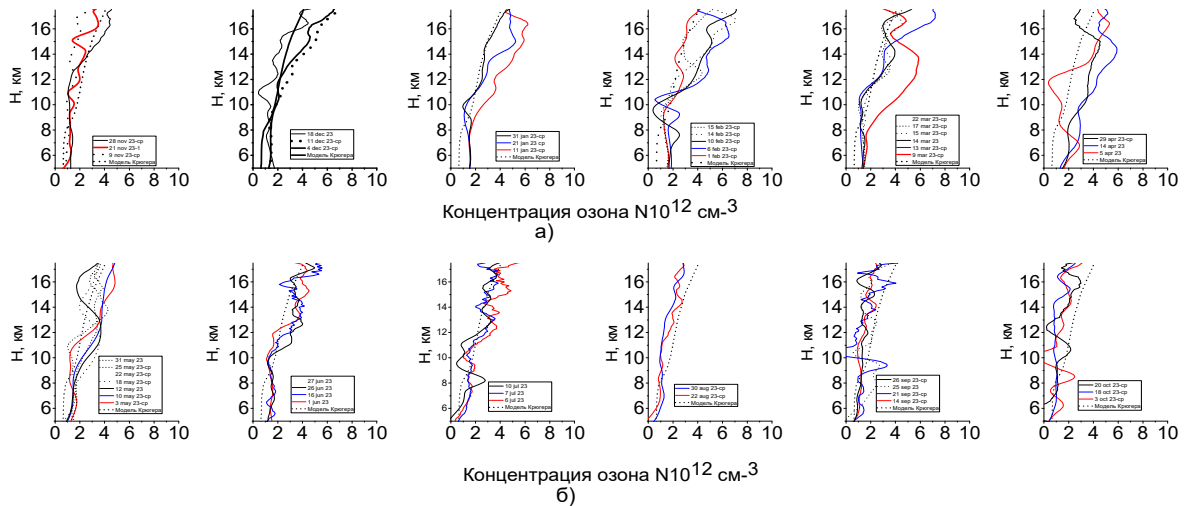


Рис. 3. Вертикальное распределение озона в 2023 году над Томском

$$B_{\pi}^a = A + B \cdot t \quad B_{\pi}^a = A + B \cdot t,$$

где A, B — константы, t — время в декадах. Построенная в 2024 г. линейная регрессия (черная кривая на рис. 1) имеет вид $B_{\pi}^a = -3.73 + 8.55 \cdot 10^{-4} \cdot t$ $B_{\pi}^a = -3.73 + 8.55 \cdot 10^{-4} \cdot t$, что говорит о скорости роста содержания $B_{\pi}^a B_{\pi}^a - 8.55 \cdot 10^{-4} 8.55 \cdot 10^{-4}$ ср⁻¹ за декаду. Из рис. 1 видно, что скорость роста СА в 2024 г. начинает замедляться и происходит стабилизация наполнения стратосферным аэрозолем с уменьшением влияния взрывных извержений вулканов.

Наиболее полно вертикальную структуру стратосферного аэрозоля отражают вертикальные профили. На рис. 2а представлены усредненные по сезонам профили вертикального распределения оптических характеристик САС с 2018 по февраль 2023 гг. (сплошные красные и синие линии) в сравнении с периодом с марта 2023 по март 2024 гг. (пунктирные красные и синие линии).

Всего было обработано 107 профилей для периода 2018–2023 гг. и 26 для периода 2023–2024 гг.

зимне–весеннего (ноябрь–апрель), а также 75 профилей 2018–2023 гг. и 18 профилей 2023–2024 гг. для летне–осеннего (май–октябрь) периодов. При этом каждый профиль получен усреднением 2–3 профилей снятых за одну ночь измерений. Из рис. 2а видно, что вертикальные профили зимне–осеннего периода 2023–2024 гг. показывают уменьшение содержания стратосферного аэрозоля по всей трассе измерений по сравнению с профилями 2018–2023 гг. В то же время, профили летне–осеннего периода 2023–2024 гг. уменьшаются с высоты 20 км и увеличиваются ниже этой высоты по сравнению с профилями 2018–2023 гг. Это хорошо видно на рис. 2б, где показана разница между сезонными профилями периодов 2023–2024 гг. и 2018–2023 гг.

На рис. 3 представлено ВРО, полученное в 2023 г. на СЛС в Томске, в сравнении с моделью Крюгера [Krieger, Minzner, 1997]. Всего получено 46 результативных профиля. Из рисунка видно повышенное содержание озона в зимний период:

ноябрь-апрель и его пониженное в летний: май — октябрь. В высотном диапазоне 5–8 км профили ВРО практически совпадают с моделью Крюгера, вариabельность, наблюдаемая на других высотах, всех полученных профилей относительно модельного распределения, является естественным для динамики ВРО в отдельные дни зондирования.

При зондировании ВРО 9 марта 2023 г. был зарегистрирован достаточно редкий процесс стратосферно-тропосферного переноса воздушных масс через тропопаузу. Из рис. 4 видно, что повышенное содержание озона 9 марта по сравнению с 13 и 14 марта вероятно обусловлено переносом воздушных масс из стратосферы в тропосферу. Что подтверждается практически вертикальным распределением температуры 9 марта по времени аэрозондирования в 0Z и 12Z сравнением 10 и 11 марта в 10Z и 11Z, когда на профилях температуры (рис. 4. б) отчетливо прослеживается тропопауза на высотах 9–11 км, и влажности 9 марта в 0Z и 12Z в сравнении с 10 в 12Z и 11Z. Данные по вертикальному распределению температуры и влажности взяты из аэрологического зондирования в г. Колпашино [<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>]

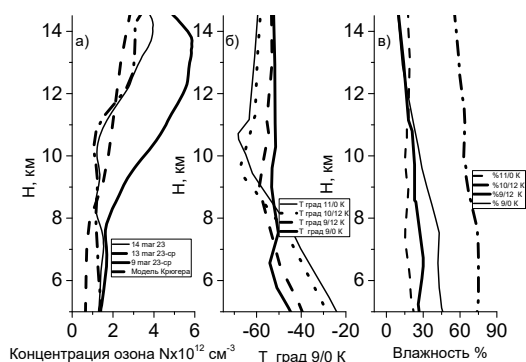


Рис. 4. Вертикальное распределение озона (а), температуры (б) и влажности (в) в атмосфере 9–14 марта

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным ряда долговременных измерений интегрального коэффициента обратного аэрозольного рассеяния B_{π}^a для стратосферы в диапазоне 15–30 км за 2018–2024 гг. была построена линейная регрессия вида $B_{\pi}^a = -3.73 + 8.55 \cdot 10^{-4} \cdot t$, что в сравнении с регрессией 2018–2023 года, говорит об уменьшении скорости наполнения стратосферным аэрозолем за счет влияния взрывных извержений вулканов Райкоке в июне 2019 г. и подводного вулкана Хунга Тонга-Хунга Хаапай в январе 2022 г.

Средние по сезонам вертикальные профили отношения рассеяния за 2023–2024 гг. показывают уменьшение значений за период зима-весна и выше 20 км летом-осенью, по сравнению с профилями 2018–2023 гг. В то время как, средние профили периода лето-осень на высотах от тропопаузы до 20 км показывают рост по сравнению с профилями 2018–2023 гг.

Зондирование ВРО на показало увеличение содержания озона в зимний период и его уменьшение в летний, что соответствует данным других авторов. Совместный анализ результатов лидарных измерений и данных аэрологического зондирования температуры и влажности показал, что в марте 2023 г. был зафиксирован довольно редкий процесс стратосферно-тропосферного переноса воздушных масс.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Krueger A.J., Minzner R.A. A mid-latitude ozone model for the 1976 U.S. standard atmosphere // *J. Geophys. Res. D.* 1997. V. 81, N 24. P. 4477–4481.
- Nevzorov A.V., Dolgii S.I., Makeev A.P. et al. Stratospheric aerosol layer for period of 2018–2023 using measurements at Siberian Lidar Station in Tomsk // *Proceedings of 29th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*, 2023. 127801V. doi: 10.1117/12.2688302.SPIE. 2023. V. 12780, <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>

ИССЛЕДОВАНИЕ ОТКЛИКА СРЕДНЕШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ НА СОЛНЕЧНЫЕ ВСПЫШКИ 25-ГО ЦИКЛА АКТИВНОСТИ ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЯ ВАРИАЦИЙ ПЭС И МОЩНОСТИ ГНСС СИГНАЛОВ

Д.С. Максимов, Д.А. Когогин, И.А. Насыров, Р.В. Загретдинов

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия,
denis-maksimov16@yandex.ru

INVESTIGATING THE RESPONSE OF THE MID-LATITUDE IONOSPHERE TO SOLAR FLARES OF THE 25TH SOLAR CYCLE, USING TEC VARIATION MEASUREMENTS AND GNSS SIGNAL STRENGTH

D.S. Maksimov, D.A. Kogogin, I.A. Nasyrov, R.V. Zagretdinov

Kazan (Volga region) Federal University, Kazan, Russia,
denis-maksimov16@yandex.ru

Аннотация. В работе приведены результаты обработки ГНСС данных во время мощных солнечных вспышек X- и M-классов над Европейской частью Российской Федерации в 25-м цикле солнечной активности 2022–2024 гг. Выявлены отклики медианных вариаций ПЭС во время вспышек, когда исследуемый регион был освещен Солнцем, а также выявлены менее интенсивные, но более длительные по времени возмущения ионосферы во время геомагнитной активности. Однозначного влияния на соотношение сигнал-шум навигационных сигналов от солнечных вспышек определить не удалось.

Ключевые слова: Солнечные вспышки, ионосфера, ГНСС, полное электронное содержание, магнитные бури

Abstract. This paper presents the results of processing GNSS data during powerful X- and M-class solar flares over the European part of the Russian Federation in the 25th solar cycle in 2022–2024. We revealed responses of median variations in TEC during the emission of solar flares when the studied region was illuminated by the Sun, as well as less intense but longer-lasting disturbances of the ionosphere during geomagnetic activity. It was impossible to determine an unambiguous effect of navigation signals from solar flares on the signal-to-noise ratio.

Keywords: Solar flares, ionosphere, GNSS, total electron content, magnetic storms

ВВЕДЕНИЕ

В сентябре 2020 г. начался 25-ый цикл солнечной активности, который предположительно продлится до 2030 г. [<https://www.weather.gov/news/201509-solar-cycle>]. По данным различных источников максимум цикла ожидается с середины 2024 г. по середину 2025 г. [Язев и др., 2023; Lozitsky, Efimenko, 2023]. В связи с этим было принято решение провести анализ влияния на ионосферу в Европейской части РФ уже произошедших солнечных вспышек в рассматриваемом цикле. А также исследовать влияние вышесказанных событий на мощностные характеристики навигационных сигналов ГНСС.

Ранее объективность подобных исследований в рассматриваемом регионе была низкой из-за малого количества ГНСС-приемников, но сейчас в нашем распоряжении имеются данные с более чем 1000 ГНСС приемников, которые позволяют строить двумерные карты распределения вариаций полного электронного содержания (ПЭС) и мощностных характеристик сигналов со спутников (CNR) с высокой плотностью и анализировать региональный уровень возмущенности ионосферы.

УСЛОВИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Общее количество зафиксированных вспышек в период январь 2022 – апрель 2024 гг. представлено в табл. 1, по данным [<https://www.spaceweatherlive.com>].

Для исследования были выделены дни со вспышками с наиболее высокими показателями пика интенсивности рентгеновского излучения, произошедшие во время освещенности Солнцем Европейской части РФ, также учитывалось расположение области пятна на

Солнце откуда возникли вспышки (табл. 2) по данным [https://xras.ru/sun_flares.html].

Таблица 1.

Солнечные вспышки 2022–2024 гг.

Год	Кол-во вспышек С-класса	M-класса	X-класса
2022	2036	178	7
2023	2752	342	13
2024 (январь–апрель)	963	170	7

Таблица 2.

Анализируемые дни

Дата	Класс вспышки	Время максимума вспышки (UTC)
17.04.2022	X1.1	03:34
20.04.2022	X2.2	03:57
30.04.2022	X1.1	13:47
10.05.2022	X1.5	13:55
29.03.2023	X1.2	02:33
14.12.2023	M5.8	07:44
09.02.2024	X3.38	13:14
16.02.2024	X2.5	06:53
22.02.2024	X1.7	06:32
	X6.3	22:34

Для анализа отклика ионосферы использовались ГНСС данные в формате RINEX 3.02 с частотой записи 30 секунд. Область исследования варьировалась для сравнения общего влияния вспышки на ионосферу в Европейской части РФ ($30^{\circ} \div 60^{\circ}$ в.д. и $40^{\circ} \div 70^{\circ}$ с.ш.) и для отдельных широтно-долготных секторов с шагом в 10° по широте (рис. 1.)

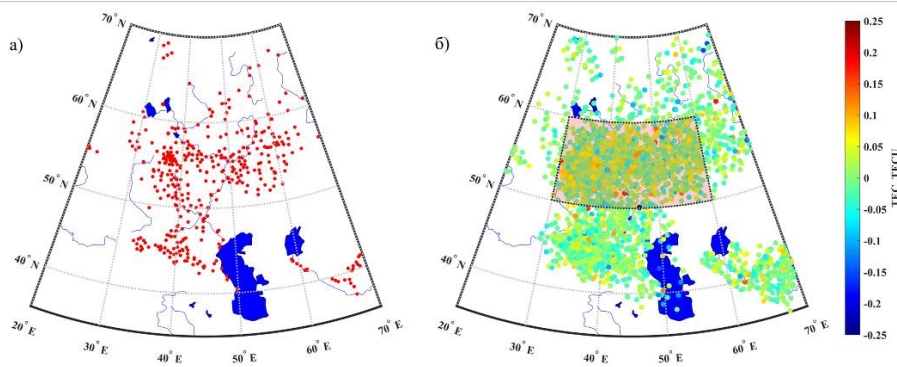


Рис. 1. а) Расположение ГНСС-станций; б) Пример двумерной пространственной карты ПЭС

Программный комплекс для обработки ГНСС данных описан в работах [Максимов и др., 2023; Когогин и др., 2020]. Финальными данными после обработки являются суточные изменения медианных вариаций ПЭС, а также медианные соотношения несущей к шуму (C/No) по рассматриваемым регионам.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Солнечные вспышки X- и M- классов вызывают изменения вариаций ПЭС относительно фоновых значений. Необходимым условием для этого является освещенность исследуемых регионов Солнцем (рис. 2). Вспышки после захода Солнца (в т.ч. X-класса) не вызывают возмущений вариаций ПЭС (рис. 4). Величина отклика ПЭС зависит от мощности и места возникновения вспышки на Солнце — чем ближе к краям видимого диска, тем отклик ниже, что согласуется с работами [Леонович, 2003; Afraimovich et al., 2001]. Для вспышки X2.2 (от 20.04.2022), произошедшей на краю диска размах вариаций ПЭС был 0,15 TECU, а для X1.5 (от 10.05.2022), направленной в сторону Земли достигал уже 0,7 TECU (рис. 2). На вспышку X3.3 (от 09.02.2024)

также были низкий отклик с размахом менее 0,1 TECU (рис. 3).

На вариации ПЭС оказывали влияние магнитные возмущения, хотя в исследуемые дни геомагнитных штормов не наблюдалось, минимальное значение индекса Dst достигало -50 нТл, что привело к возмущению порядка сотых значений TECU (рис. 2, в).

Для исследования изменения мощностных характеристик навигационных сигналов было произведено объединение по группам (S1, S2, S5, S6, S7, S8) и также вычислены медианные значения в рассматриваемом регионе. По полученным результатам воздействие солнечных вспышек на показатели сигнал-шум однозначно определить нельзя. Хотя стоит отметить, что в некоторых днях видно понижение уровня для групп сигналов S1 и S2 на 4–5 дБГц во время вспышек и восстановление к фоновым значениям в течение 1–3 ч (рис. 2).

Разделение области исследования по широтам не привело к существенным изменениям в величине или времени отклика ПЭС и C/No, пример для вспышки X1.7 от 22.02.2024 (рис. 4).

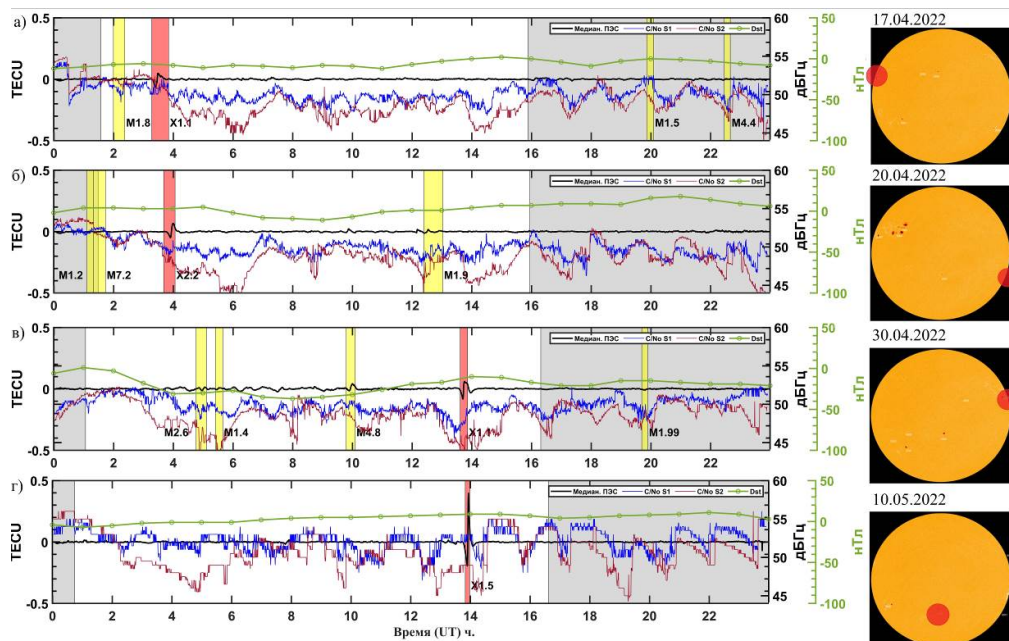


Рис. 2. Исследуемые дни в 2022 г. Красными и желтыми вертикальными линиями обозначены вспышки X- и M- классов соответственно. Черные кривые — медианные вариации ПЭС, зеленые кривые — индекс Dst, синие и красные — C/No для сигналов S1 и S2. Справа отображены области на диске Солнца, где произошли вспышки [https://www.spaceweather.com/archive.php]

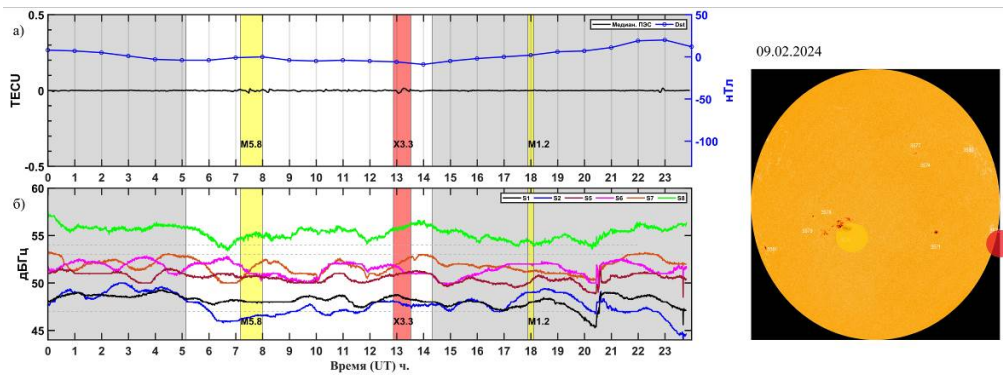


Рис. 3. Исследуемый день 09.02.2024. а) Суточные медианные вариации ПЭС (черным), Dst (синим); б) Изменения медианных значений для C/N0 S1-S8

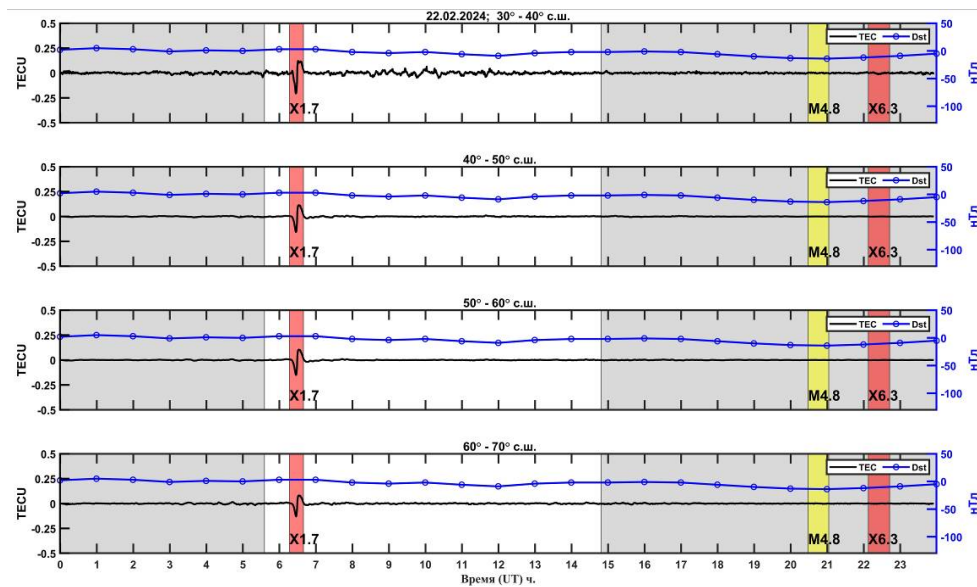


Рис. 4. Исследуемый день 22.02.2024. Разбиение анализируемых регионов по широтам с шагом в 10°. Суточные медианные вариации ПЭС (черным), Dst — (синим)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявлен отклик вариаций ПЭС на вспышки X- и M-классов во время освещенности исследуемого региона Солнцем, также зафиксировано менее интенсивное, но более длительное возмущение на повышение магнитной активности. Отмечена зависимость отклика ионосферы на мощность вспышки и на местоположение на видимом солнечном диске. Однозначного влияния вспышек и геомагнитной активности на мощностные характеристики выявить не удалось, для этого требуются дополнительные исследования.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-77-10029.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Когогин Д.А., Насыров И.А., Шиндин А.В. и др. Динамическая картина стимулированной мощным радиоизлучением области ионосферы, полученная по результатам совместного анализа снимков ночного неба в линии 630 нм и карт вариаций полного электронного содержания // Изв. вузов. Радиофизика. 2020. Т. 63, № 2. С. 89–104.

Леонович Л.А. Отклик ионосферы на солнечные вспышки и магнитные бури по данным глобальной сети GPS: Автореферат дис. ... к.ф.-м.н. Иркутск, 2003. 15 с.

Максимов Д.С., Когогин Д.А., Насыров И.А., Загрет-

динов Р.В. Влияние солнечных вспышек в 2022 г. на региональную возмущенность ионосферы земли по данным ГНСС-станций, расположенных в европейской части РФ / XXVIII Всероссийская открытая научная конференция «Распространение радиоволн», Йошкар-Ола, ПГТУ, 2023. С. 147–151.

Язев С.А., Исаева Е.С., Хос-Эрдэнэ Б. 25-й цикл солнечной активности: первые три года // Солнечно-земная физика. 2023. Т. 9, № 3. С. 5–11.

Afraimovich E.L., Altyntsev A.T., Grechnev V.V., Leonovich L.A. Ionospheric effects of the solares as deduced from global GPS network data // Adv. Space Res. 2001. V. 27. 6–7. P. 1333–1338.

Lozitsky V.G., Efimenko V.M Clarified forecast for the 25th Cycle of Solar activity // 17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, 2023. P. 1–5.

URL: <https://www.weather.gov/news/201509-solar-cycle> (дата обращения 05.05.2024)

URL: <https://www.spaceweatherlive.com> (дата обращения 05.05.2024)

URL: https://xras.ru/sun_flares.html (дата обращения 05.05.2024)

URL: <https://www.spaceweather.com/archive.php> (дата обращения 05.05.2024)

УДК: 550.385

ДИНАМИКА ВЫСОКОШИРОТНОЙ МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ В ПЕРИОД ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ 24.02.2023 - 02.03.2023

А.С. Манина^{1,2}, В.В. Калегаев^{1,2}, В.Д. Николаева², Р.Е. Сараев^{1,2}, А.Р. Иванова^{1,2}, Н.А. Власова²

¹Физический факультет Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, alinmanina73@yandex.ru

²Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

DYNAMICS OF THE EARTH'S HIGH-LATITUDE MAGNETOSPHERE DURING THE PERIOD OF GEOMAGNETIC ACTIVITY 02/24/2023 - 03/22/2023

A.S. Manina^{1,2}, V.V. Kalegaev^{1,2}, V.D. Nikolaeva², R.E. Sarajev^{1,2}, A.R. Ivanova^{1,2}, N.A. Vlasova²

¹Moscow State University Faculty of Physics, Moscow, Russia, alinmanina73@yandex.ru

²Lomonosov Moscow State University Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow, Russia

Аннотация. Магнитосфера Земли — это динамичная и непрерывно изменяющаяся система, форма которой меняется под влиянием межпланетной среды: солнечного ветра и межпланетного магнитного поля. Вариации параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля могут быть триггером для развития в магнитосфере геомагнитных бури следствием которых являются высыпания частиц в области овала и сильные вариации потоков частиц радиационных поясов Земли. Магнитосферу можно разделить на внутреннюю и внешнюю части и находящуюся между ними — авроральную магнитосферу.

Ключевые слова: магнитосфера, область открытых силовых линий, авроральный овал, радиационные пояса Земли

Abstract. The Earth's magnetosphere is a dynamic and continuously changing system, the shape of which changes under the influence of the interplanetary medium: the solar wind and the interplanetary magnetic field. Variations in the parameters of the solar wind and the interplanetary magnetic field can be a trigger for the development of geomagnetic storms in the magnetosphere, which result in particle precipitations in the oval region and strong variations in particle fluxes of the Earth's radiation belts. The magnetosphere can be divided into internal and external parts and the auroral magnetosphere located between them.

Keywords: magnetosphere, area of open lines of force, auroral oval, radiation belts of the Earth

Магнитосфера Земли подвергается воздействию межпланетной среды. Изменения параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля приводят к геомагнитным возмущениям, в результате которых изменяются структура силовых линий магнитного поля и динамика потоков заряженных частиц [Лазутин, 2012]. Наиболее яркие проявления можно наблюдать в высокоширотной магнитосфере. Инструментом для изучения топологии магнитного поля могут служить потоки заряженных частиц. Одновременное присутствие разных популяций заряженных частиц создают уникальную возможность для исследования структуры и динамики высокоширотной магнитосферы во время магнитной бури. Среди них можно выделить:

- солнечные энергичные протоны (внешняя магнитосфера);
- энергичные электроны внешнего радиационного пояса (внутренняя магнитосфера);
- выпадающие авроральные частицы (авроральная магнитосфера).

24–25.02.2023 г. на Солнце наблюдалась серия взрывных процессов, в результате которых в околоземном пространстве были зарегистрированы два солнечных протонных события. Корональный выброс массы от 24.02 пришел в околоземное пространство 26.02, предшествующая ему ударная волна была зарегистрирована на в ~18 UT. В магнитосфере произошла сильная магнитная буря с $|Dst|_{max} \sim 140$ нТл.

Представлены результаты исследования во время магнитной бури 27.02.2023 г. динамики высокоширотных границ основных магнитосферных структур: области проникновения солнечных протонов с энергиями $3 \div 10$ МэВ [Власова и др., 2021]; области высыпаний авроральных электронов и ионов с энергиями ~ 30 эВ $\div 30$ кэВ [Иванова, Калегаев, 2022; Newell et al., 1996]; положений границ захвата и максимальных потоков электронов с энергиями >100 кэВ и >300 кэВ внешнего радиационного пояса Земли. Работа выполнена на основе экспериментальных данных по потокам заряженных частиц, полученных на низкоорбитальных полярных спутниках Метеор-М2 и DMSP в вечернем и утреннем секторах по местному времени.

Получено, что во время главной фазы магнитной бури границы всех исследуемых магнитосферных структур смещаются на более низкие широты и наблюдается сильная утрене–вечерняя асимметрия всей области высокоширотной магнитосферы. В вечернем секторе магнитосферы наблюдается более сильное смещение границ по сравнению с утренними часами, что связано с развитием асимметричного кольцевого тока на главной фазе бури. На фазе восстановления магнитной бури положение максимумов потоков электронов внешнего радиационного пояса смещается на более низкие широты, а граница захвата электронов внешнего радиационных поясов – на более высокие широты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Власова Н.А., Тулупов В.И., Калегасев В.В. Некоторые особенности солнечных протонных событий 07.III.2011 и 20.II.2014 // *Космические исследования*. 2021. Т. 59, № 4. С. 296–305. DOI: 10.31857/S0023420621040063.

Лазутин Л.Л. *Мировые и полярные магнитные бури*. МГУ НИИЯФ. М. 2012. ISBN 978-5.

Иванова А.Р., Калегасев В.В. Динамика ночных границ аврорального овала во время магнитной бури 27–29.V.2017 // *Космические исследования*. 2022. Т. 60, № 5. С. 357–367. DOI: 10.31857/S0023420622050028.

Newell P.T., Feldstein Y.I., Galperin Y.I., Meng C.I. Morphology of nightside precipitation // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 1996. V. 101, iss. A5. P. 10737–10748. DOI: 10.1029/95JA03516.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ДОКАЗАТЕЛЬСТВО СУЩЕСТВОВАНИЯ ЭКВАТОРИАЛЬНОГО РЕЗОНАТОРА ДЛЯ ВОЛН ДИАПАЗОНА Pc1 В МАГНИТОСФЕРЕ

О.С. Михайлова, П.Н. Магер

Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия,
o_mikhailova@iszf.irk.ru

EXPERIMENTAL PROOF OF THE EXISTENCE OF AN EQUATORIAL RESONATOR FOR Rc1 WAVES IN THE MAGNETOSPHERE

O.S. Mikhailova, P.N. Mager

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia,
o_mikhailova@iszf.irk.ru

Аннотация. Показано существование приэкваториального резонатора для ионно-ионных гибридных мод на примере события жемчужин Pc1, наблюдавшихся зондом Ван Аллена А 14 июля 2014 г. Наблюдались пульсации Pc1 с частотами от 0,9 до 1,3 Гц. Частота пульсаций была чуть выше гирочастоты гелия. Во время этого события мы обнаружили высокие концентрации гелия и кислорода. Отношение плотности гелия к плотности протона составляло около 1, а кислорода к протону — выше 10. Из теории известно, что из-за примеси тяжелых ионов в плазме магнитосферы может образоваться резонатор в верхней части магнитной силовой линии. Мы получили, что рассчитанные собственные частоты приэкваториального резонатора соответствуют наблюдаемым частотам. Мы рассматриваем наблюдаемую структуру волн как результат суперпозиции нескольких гармоник со слегка отличающимися частотами внутри резонатора.

Ключевые слова: Пульсации Pc1, жемчужины, ионно-ионные гибридные моды, магнитосфера

Abstract. We showed the existence of a near-equatorial resonator for ion-ion hybrid modes. The Pc1 pearl event was observed by the Van Allen Probe A on July 14, 2014. Pc1 pulsations had frequencies from 0.9 to 1.3 Hz. The pulsation frequency was slightly higher than the helium gyrofrequency. During the event, we detected high concentrations of helium and oxygen. The ratio of helium number density to proton density was about 1, and oxygen number density to proton number density was above 10. Theory says that due to the admixture of heavy ions in the magnetosphere's plasma, a resonator can form at the top of the magnetic field line. We have found that the calculated eigenfrequencies of the near-equatorial resonator correspond to the observed frequencies of the Pc1 wave. We consider the observed wave structure as the result of a superposition of several eigenharmonics with slightly different frequencies inside the resonator.

Keywords: Pc1 pulsations, pearls, ion-ion hybrid modes, magnetosphere

ВВЕДЕНИЕ

В наших предыдущих статьях мы рассматривали одну из гипотез формирования жемчужной структуры пульсаций диапазона Pc1 [Klimushkin et al., 2010; Mikhailova, 2014; Mikhailova et al., 2020a; Mikhailova et al., 2020b; Михайлова и др., 2022]. Согласно гипотезе, из-за примеси тяжелых ионов (гелия или кислорода) в плазме магнитосферы может образоваться резонатор в экваториальной части магнитной силовой линии. Резонатор служит резервуаром энергии, частоты наблюдаемых Pc1 соответствуют частотам возбуждаемых в резонаторе гармоник, а наблюдаемая структура жемчужин является результатом суперпозиции собственных гармоник резонатора, частоты которых слегка отличаются. Гармоники в резонаторе называются ионно-ионными гибридными (ИИГ) модами, так как возникают в плазме в присутствии нескольких типов ионов, например, протонов и ионов кислорода. Мы выбрали событие, когда наблюдались жемчужины Pc1, для верификации модели экваториального резонатора для ИИГ-мод.

НАБЛЮДАЕМОЕ СОБЫТИЕ

В целях верификации нашей модели, было выбрано событие 14 июля 2014 г. Спутниками Van Allen Probe A и B наблюдалась волна диапазона Pc1, имеющая форму жемчужин. На рис. 1 показаны осцилляции в компонентах магнитного поля.

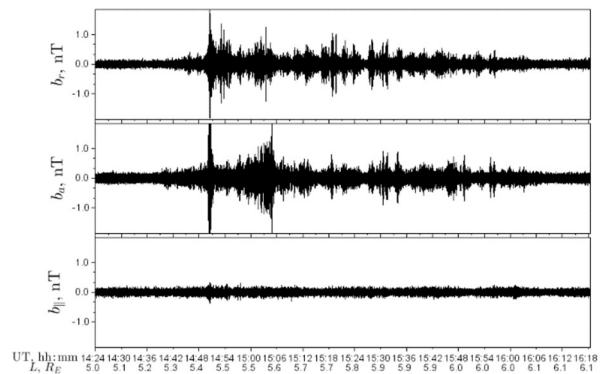


Рис. 1. Осцилляции радиальной, азимутальной и продольной компонент магнитного поля

Частота наблюдаемой волны менялась очень слабо, от 0,9 до 1,3 Гц, и менялась при этом ступенчато-образно. Это свидетельствует о резонаторной природе наблюдаемых колебаний. Кроме этого, о наличии резонатора свидетельствует значение вектора Пойнтинга, значение которого колебалось в окрестности нуля. Это говорит о том, что волна стоячая. Волна наблюдалась вблизи верхней кромки плазмопаузы. Во время этого события мы обнаружили высокие концентрации гелия и кислорода. Отношение плотности гелия к плотности протона составляло около 1, а кислорода к протону - более 10 (см. рис. 2).

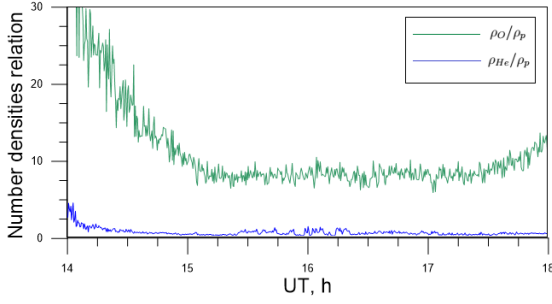


Рис. 2. Отношение плотностей тяжелых ионов к плотности протонов. Зеленая линия — кислород, синяя — гелий

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

На основе этого события была сделана попытка верифицировать модель экваториального резонатора для ИИГ-мод. Сначала в качестве тяжелых ионов были приняты ионы кислорода, поскольку мы наблюдаем очень высокое отношение плотности кислорода к плотности протона (рис. 2), но расчетная частота оказалась слишком низкой. Тогда было принято решение рассмотреть в качестве тяжелых ионов гелий, поскольку наблюдаемая частота пульсаций чуть выше гирочастоты гелия. И снова оказалось, что расчетная частота принимает слишком низкие значения. Это означает, что необходимо учитывать все три типа ионов: протоны, гелий и кислород.

Для этого необходимо рассмотреть структуру волны в плазме, состоящей из протонов, ионов гелия и ионов кислорода. Частота волны ω предполагается много меньше гирочастоты протонов $\omega \ll \Omega_p$. Решая волновое уравнение для ИИГ-моды в таких условиях, мы получили продольную структуру волны:

$$k_{\parallel}^2 = \frac{\omega^2}{A_p^2} \left[\left(1 - \frac{\omega^2}{\Omega_p^2}\right)^{-1} + \frac{\rho_{He}}{\rho_p} \left(1 - \frac{\omega^2}{\Omega_{He}^2}\right)^{-1} + \frac{\rho_O}{\rho_p} \left(1 - \frac{\omega^2}{\Omega_O^2}\right)^{-1} \right]. \quad (1)$$

Видно, что продольная структура зависит от отношения плотностей ионов гелия к протонам $\frac{\rho_{He}}{\rho_p}$, и от

отношения плотностей ионов кислорода к протонам $\frac{\rho_O}{\rho_p}$, A_p^2 — квадрат альфвеновской скорости протонов, Ω_{He} и Ω_O — гирочастоты гелия и кислорода. В экваториальной части силовой линии, как и в прежних исследованиях [Михайлова и др., 2022], формируется резонатор, ограниченный точками поворота. Точки поворота могут быть найдены из условия $k_{\parallel}^2(\Omega_{\pm}) = 0$, где Ω_{\pm} — две возможные частоты в точках поворота. В многокомпонентной плазме с тремя типами ионов могут существовать три ветви колебаний. Первая с частотой $\omega < \Omega_O$ — альфвеновская волна, и две ИИГ-моды с частотами, лежащими в диапазонах $\Omega_- < \omega < \Omega_{He}$ и $\Omega_+ < \omega < \Omega_p$, как показано на рис. 3.

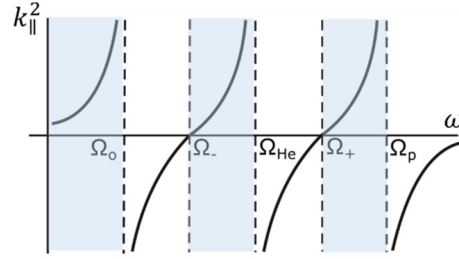


Рис. 3. Три ветви колебаний в плазме с тремя видами ионов

Найден спектр собственных частот резонатора. Полученные частоты хорошо согласуются с частотой наблюдаемой волны Pc1. На рис. 4 представлена рассчитанная частота для фундаментальной гармоники резонатора, показана белой линией. Видно, что рассчитанная частота повторяет ход наблюдаемой частоты, и близка к ней по значению. Частоты гармоник, возбуждаемых в резонаторе, близки друг к другу. В результате суперпозиции собственных гармоник резонатора, формируются биения жемчужин. Разница между частотами двух близких гармоник совпадает по порядку величины с частотой наблюдаемых биений.

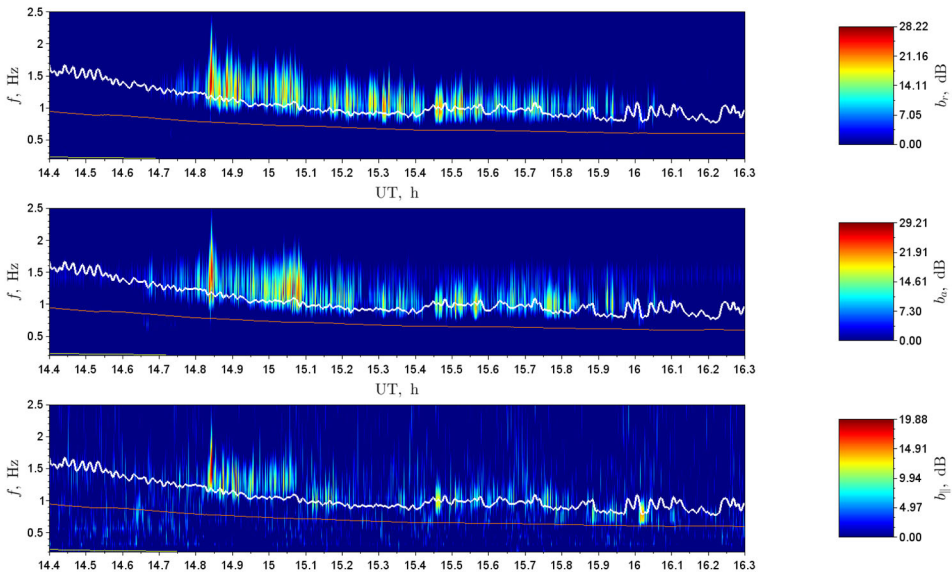


Рис. 4. Вейвлет-спектры в компонентах магнитного поля. Оранжевой линией показана гирочастота гелия, белой линией — рассчитанная частота фундаментальной ИИГ-гармоники в резонаторе

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано существование в магнитосфере приэкваториального резонатора для ИИГ-мод. На примере отдельного волнового события Pc1 показана резонаторная природа колебаний. Частота волны определяется собственными частотами резонатора, а частота биения определяется разницей двух близких частот. Показано, что нельзя исключать из рассмотрения какой-либо вид ионов, необходимо учитывать ионы гелия и кислорода. Рассчитанная модельная частота в таком случае хорошо согласуется с наблюдаемой.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Михайлова О.С., Магер П.Н., Климушкин Д.Ю. Современное состояние теории УНЧ-пульсаций диапазона

Pc1 в плазме магнитосферы с тяжелыми ионами: обзор // Солнечно-земная физика. 2022. Т. 8, № 1. С. 3–18. DOI: 10.12737/szf-81202201.

Klimushkin D.Yu., Mager P.N., Marilovtseva O.S. Parallel structure of Pc1 ULF oscillations in multi-ion magnetospheric plasma at finite ion gyrofrequency // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2010. V. 72, N 18. P. 1327–1332. DOI: 10.1016/j.jastp.2010.09.019.

Mikhailova O.S. The spatial structure of ULF-waves in the equatorial resonator localized at the plasmopause with the admixture of the heavy ions // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2014. V. 108. P. 10–16. DOI: 10.1016/j.jastp.2013.12.007.

Mikhailova O.S., Mager P.N., Klimushkin D.Yu. Two modes of ion-ion hybrid waves in magnetospheric plasma // Plasma Physics and Controlled Fusion. 2020a. V. 62, N 2. P. 025026. DOI: 10.1088/1361-6587/ab5b32.

Mikhailova O.S., Mager P.N., Klimushkin D. Yu. Transverse resonator for ion-ion hybrid waves in dipole magnetospheric plasma // Plasma Physics and Controlled Fusion. 2020b. V. 62, N 9. P. 095008. DOI: 10.1088/1361-6587/ab9be9.

ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОКОЛОЗЕМНЫХ И АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ПЛАЗМЕННЫХ СТРУЙ НА КРУПНОМАСШТАБНОМ ПЛАЗМЕННОМ СТЕНДЕ «КРОТ»

А.С. Николенко, М.Е. Гущин, С.В. Коробков, И.Ю. Зудин, А.В. Стриковский

Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова
Российской академии наук, Нижний Новгород, Россия,
nikolenko@ipfran.ru

LABORATORY MODELING OF NEAR-EARTH AND ASTROPHYSICAL PLASMA JETS ON A LARGE-SCALE PLASMA DEVICE «KROT»

A.S. Nikolenko, M.E. Gushchin, S.V. Korobkov, I.Yu. Zudin, A.V. Strikovskiy

Federal Research Center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences,
Nizhny Novgorod, Russia,
nikolenko@ipfran.ru

Аннотация. Представлены результаты лабораторных экспериментов на стенде «Крот» по инъекции плазменных струй в магнитное поле в вакууме. Параметры плазменного стенда «Крот» позволяет изучать динамику плазменных потоков с магнитным полем и фоновой средой на масштабах порядка одного метра поперек и вдоль квазиоднородного магнитного поля — фактически в «безграничном» режиме, что необходимо для моделирования активных экспериментов в околоземной плазме и для ряда астрофизических задач. В качестве источника плазмы использовалось несколько электроразрядных коаксиальных генераторов, формирующих плазменные потоки с различными скоростями (20–300 км/с) и энергиями (0.01–1 Дж), а также эквивалентный по этим параметрам источник лазерной плазмы. В ходе экспериментов изучалась динамика взаимодействия плазменных струй с магнитным полем – эволюция диамагнитных каверн, развитие структурных неустойчивостей, особенности коллимированного струйного течения вдоль и поперек направления внешнего магнитного поля.

Ключевые слова: лабораторное моделирование, активные эксперименты, диамагнитная каверна, неустойчивость.

Abstract. The results of laboratory experiments on the injection of plasma flows into a magnetic field in vacuum are presented. The parameters of the plasma device Krot allows us to study the dynamics of plasma flows with magnetic field and background medium on scales of the order of one meter across and along the quasi-uniform magnetic field — actually in the «boundless» mode, which is a necessity for modeling active experiments in near-Earth plasma and for a number of astrophysical problems. Several electric-discharge coaxial generators forming plasma with different velocities (20–300 km/s) and energies (0.01–1 J), as well as a laser plasma source with similar parameters, were used as a plasma source. During the experiments we studied the dynamics of the interaction of plasma jets with the magnetic field, that involve the evolution of diamagnetic caverns, the development of structural instabilities, and the features of collimated jet flow along and across the direction of the external magnetic field.

Keywords: laboratory modeling, active experiments, diamagnetic cavity, instability.

ВВЕДЕНИЕ

Лабораторное моделирование космической плазмы — перспективный подход, который, по современным представлениям, позволяет существенно продвинуться в понимании различных астрофизических и геофизических явлений. В сочетании с непрерывно совершенствующейся наблюдательной техникой и развитием методов и возможностей численного моделирования, эксперименты в лабораториях, специально поставленные на основании правил подобия, могут служить источником ценной научной информации, применяться для верификации моделей различного уровня сложности, использоваться для демонстрации различных физических эффектов.

В данной работе представлены результаты экспериментов по разлету плазменных струй в вакуум или в фоновую плазму во внешнем магнитном поле. Такие процессы реализуются в околоземной плазме при проведении активных экспериментов с инъекцией ионизированного вещества [Haerendel, 2019; Winske et al., 2019] в ионосфере и магнитосфере Земли, так и в дальнем космосе, включая формирование астрофизических джетов [Spruit et al., 1997],

аккреция вещества на молодых звездах [Giannini et al., 2017], динамику остатков сверхновых [McKee and Hollenbach, 1980]. Разлет плотной высокоскоростной плазмы во внешнем магнитном поле в вакууме или в менее плотной фоновой плазме представляет собой задачу, богатую физическими эффектами. Интересующими вопросами, как правило, являются: предельные размеры расширяющейся плазмы, скорость и динамика плазмы в целом; топология и механизмы генерации магнитных возмущений; возникающие неустойчивые структуры плазмы облака и их влияние на динамику плазмы; возбуждение волновых возмущений и разрывов при распространении плазменной струи через замагниченную фоновую среду, в том числе – генерация бесстолкновительных ударных волн.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

В ИПФ РАН для моделирования активных ионосферных экспериментов используется крупномасштабная установка – плазменный стенд «Крот», в состав которой входят вакуумная камера объёмом 170 м³ с источниками фоновой плазмы с

концентрацией вплоть до $n_0 \sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$ с размерами до $5 \times 1,5 \text{ м}$ и источником квазиоднородного магнитного поля с индукцией до 1000 Гс .

Плазменные потоки создаются коаксиальными генераторами, выполненными на основе отрезков коаксиальных линий с полиэтиленовой изоляцией [Коробков и др., 2019; Николенко и др., 2024], использовано три вида таких источников. Длительность инжекции плазменной струи определяется длительностью импульса тока и составляет $10\text{--}100 \text{ мкс}$ в зависимости от параметров источника питания, причем доступны режимы разовой инжекции, так и последовательности сгустков плазмы. Параметры плазменных струй определялись различными контактными и бесконтактными диагностиками, включая электрические и магнитные зонды, СВЧ-интерферометр, скоростную ICCD фотокамеру. По данным диагностик, концентрация плазмы в основном объеме составляет $n_e \approx 10^{14} \text{ см}^{-3}$, температура электронов $T_e \sim 1 \text{ эВ}$, начальная скорость разлета основного «тела» облака V_0 , определяемая по свечению лежит в диапазоне $20\text{--}50 \text{ км/с}$, передний фронт распространяется со скоростями вплоть до 100 км/с . По данным спектроскопических измерений, плазма облака в основном представлена ионами углерода невысокой зарядности (C^{1+}) и водородом (H^+) [Коробков и др., 2023]. Оценки показывают, что начальная энергия плазменного облака составляет величину порядка 0.1 Дж , либо 1 Дж в зависимости от типа коаксиального генератора [Николенко и др., 2024]. Схема экспериментов по продольной и поперечной инжекции представлена на рис. 1.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

При инжекции плазменных облаков наблюдается диамагнитный эффект, при котором внешнее магнитное поле в объеме облака ослабляется вплоть до полного вытеснения. В экспериментах с плазменными струями, создаваемыми коаксиальными генераторами низкой энергии $E_0 \sim 0.1 \text{ Дж}$ [Николенко и др., 2023], облако плазмы полностью поле вытесняет до 200 Гс , а с источниками,

создающими плазменные потоки с $E_0 \sim 1 \text{ Дж}$ – вплоть до 300 Гс . На переднем крае каверны наблюдается электромагнитная неустойчивость, проявляющаяся в виде интенсивных пульсаций магнитного поля в каверне; частоты неустойчивости соответствуют нижнегибридному диапазону. Облако плазмы при инжекции вдоль магнитного поля расширяется в форме эллипсоида вращения, размер которого вдоль V_0 определяется начальной скоростью и временем инжекции, $L \sim V_0 t$. Размер поперек внешнего поля определяется начальной энергией облака плазмы E_0 и величиной индукции B_0 , фактически совпадая с классическим радиусом торможения идеальной плазмы $R_B = \sqrt{\frac{3E_0}{B_0^2}}$, расширяющейся в магнитном поле. В эксперименте показано, что размер плазменных струй вдоль внешнего поля действительно масштабируется с E_0 и V_0 . Изменяя величину индукции B_0 , наблюдается уменьшение поперечного размера облака – эффект коллимации плазмы магнитным полем.

На стадии торможения облака на его границе развивается неустойчивость желобкового типа. На рис. 2 (а)–(г) приведены серии фотографии плазменных облаков с энергией 0.1 и 1 Дж в экспериментах, расширяющихся вдоль магнитного поля в направлении на наблюдателя. Желобки начинают формироваться на стадии торможения и распада облака, и в случае большей начальной энергии и продолжительности инжекции неустойчивость развивается быстрее и проявляется более контрастно.

При поперечной инжекции плазмы, формируется устойчивое коллимированное струйное течение – плазменный лист, плазменный поток имеет топологию слоя, лежащего в плоскости, образованной направлением инжекции V_0 и внешнего поля B_0 (рис. 2(д)–(е)); данная структура способна распространяться на расстояние до $L \sim 1 \text{ м}$ от коаксиального ускорителя поперек B_0 . Установлено, что толщина листа обратно пропорциональна индукции B_0 для разных энергий E_0 и порядка гирорадиуса легких ионов (H^+).

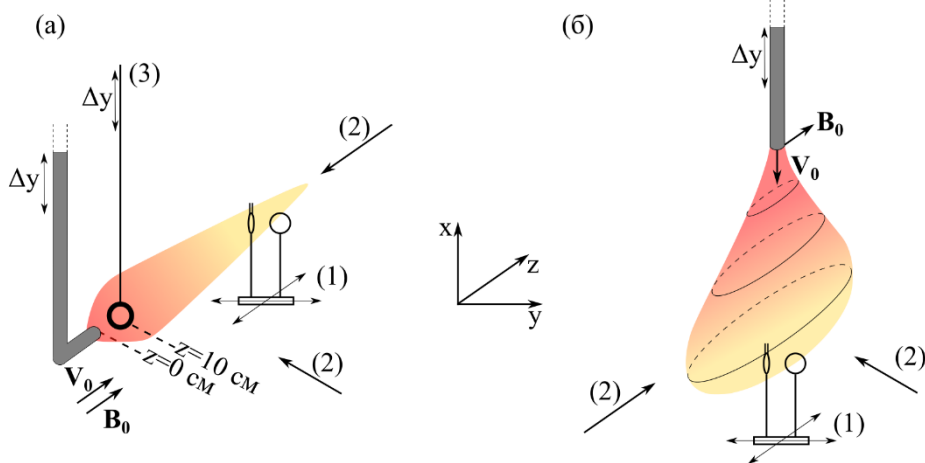


Рис. 1. Схема эксперимента по продольной (а) и поперечной (б) инжекции плазмы и расположение диагностик в типичном эксперименте: (1) — электрические и магнитные зонды, установленные на двухкоординатной платформе с электромеханическим приводом, (2) — ракурсы фотосъемки, (3) — магнитный зонд на штанге, вводимой по радиусу

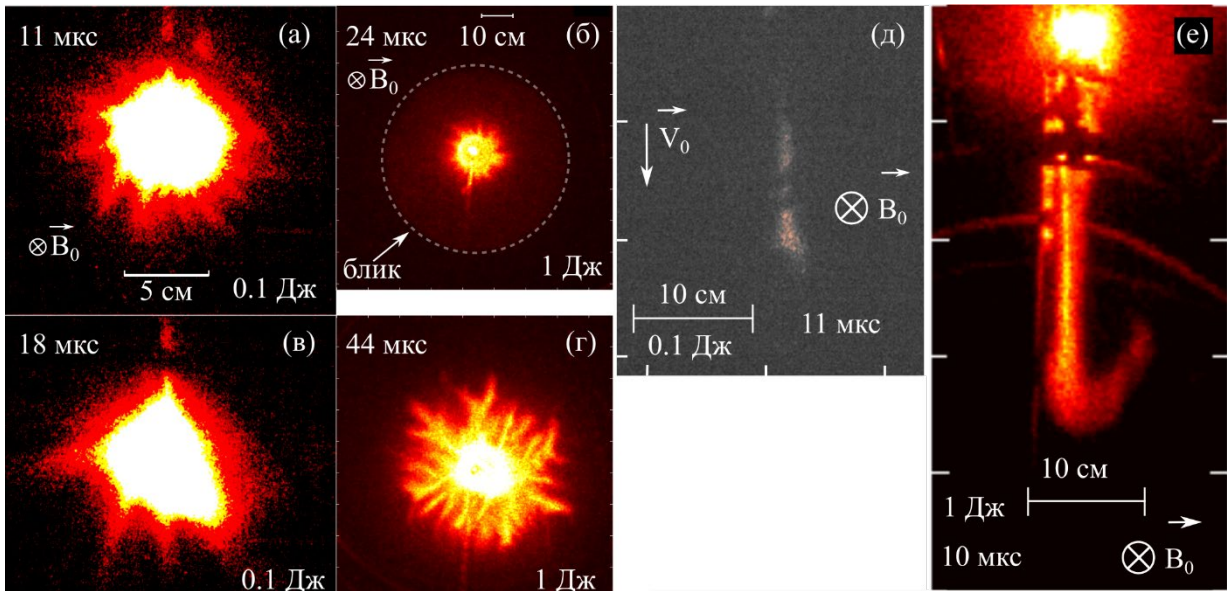


Рис. 2. Сравнение некоторых особенностей динамики плазменных струй, различающихся начальной энергией на 1 порядок при инъекции поперек и вдоль B_0 в вакууме, полученные быстрой фотосъемкой: (а)–(г) — инъекция плазменной струи вдоль магнитного поля, вид на наблюдателя; (а), (б) — струя с начальной энергией 0.1 Дж в поле 225 Гс спустя 11 и 18 мкс после начала инъекции; (в), (г) — струя с начальной энергией 1 Дж в поле 225 Гс спустя 24 и 44 мкс после начала инъекции; (д)–(е) — струя плазмы, расширяющаяся поперек внешнего поля 450 Гс, демонстрируется плазменный «лист»; (д) — струя с начальной энергией 0.1 Дж; (е) — 1 Дж

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы магнитные возмущения при инъекции плазменных струй вдоль и поперек внешнего магнитного поля в вакууме. Источник простой конструкции с относительно низкой (уровня 0,1 и 1 Дж) энергией облака позволяет детально исследовать физические эффекты, присущие активным космическим экспериментам и астрофизическим явлениям с облаками плотной плазмы, включая образование глубоких диамагнитных каверн, возбуждение электромагнитной неустойчивости, развитие желобковой неустойчивости, а также установление коллимированных струйных течений.

Работа выполнена при поддержке 10 проекта Национального центра физики и математики (НЦФМ) «Экспериментальная лабораторная астрофизика и геофизика» и при частичной поддержке Российского научного фонда, проект # 24-12-00459.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Коробков С.В., Гуцин М.Е., Гундорин В.И. и др. Простейшая эрозионная плазменная пушка из коаксиального кабеля с полиэтиленовой изоляцией // Письма в Журнал технической и физики. 2019. Т. 45, № 5. С. 45–48.

Коробков С.В., Николенко А.С., Гуцин М.Е. и др. Особенности динамики и неустойчивости плазменных струй, расширяющихся во внешнее магнитное поле, в лабораторных экспериментах с компактными коаксиальными генераторами плазмы на крупномасштабном стенде «Крот» // *Астрономический журнал*. 2023. Т. 100, № 1. С. 107–118.

Николенко А.С., Гуцин М.Е., Коробков С.В. и др. Динамика плазменного облака, формируемого компактной коаксиальной пушкой, при разлете в вакуум и фоновую плазму большого объема во внешнем магнитном поле // *Физика плазмы*. 2023. Т. 49, № 11. С. 1101–1117.

Giannini T., Antonucci S., Lorenzetti D. et al. The 2015–2016 Outburst of the Classical EXor V1118 Ori // *Astrophys. J.* 2017. V. 839. P.112.

Haerendel G. Experiments with plasmas artificially injected into near-Earth space. // *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*. 2019. V.6. A. 29.

McKee C.P., Hollenbach D. Interstellar shock waves // *J. Annual Rev. Astronomy and Astrophys.* 1980. V. 18. P. 219.

Spruit H.C., Foglizzo T., Stehle R. Collimation of magnetically driven jets from accretion discs // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 1997. V. 288. P. 333.

Winske D., Huba J. D., Niemann C. et al. Recalling and updating research on diamagnetic cavities: Experiments, theory, simulations // *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*. 2019. V. 5. A. 51.

МЕТОД РЕГИСТРАЦИИ ЛОКАЛЬНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ИОНОСФЕРЫ, ВЫЗВАННЫХ ДВИЖЕНИЕМ МКС, ПО ДАННЫМ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ

К.А. Осипов, А.Б. Ишин

Иркутский национальный исследовательский университет, Иркутск, Россия, nikkie.33302@gmail.com

A METHOD FOR RECORDING LOCAL DISTURBANCES IN THE IONOSPHERIC ELECTRON DENSITY CAUSED BY THE MOVEMENT OF THE ISS USING TOTAL ELECTRON CONTENT DATA

К.А. Osipov, A.B. Ishin

Irkutsk National Research University, Irkutsk, Russia, nikkie.33302@gmail.com

Аннотация. В работе предложен метод обнаружения локальных слабых возмущений электронной концентрации, вызванных пролетом МКС, по данным вариаций ПЭС на трансionoсферных лучах глобальных навигационных спутниковых систем. Метод заключается в пересчете близких возмущений в систему координат, связанную с МКС и статистическом накоплении возмущений для обнаружения их на фоне более амплитудных вариаций ПЭС.

Ключевые слова: электронная концентрация, вариации ПЭС, МКС.

Abstract. The paper proposes a method for detecting local weak disturbances in the electron density caused by the passage of the ISS, based on TEC variations data on transionoсpheric rays of global navigation satellite systems. The method consists of recalculating nearby disturbances into a coordinate system associated with the ISS and statistically accumulating disturbances to detect them against the background of more amplitude TEC variations.

Keywords: electron concentration, variations of the PES, ISS.

ВВЕДЕНИЕ

Обнаружение слабых электронных возмущений в ионосфере с использованием данных глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) возможно благодаря тому, что электроны в ионосфере воздействуют на сигналы, идущие от спутников. Проявляется это в изменении фазы и времени распространения сигналов ГНСС. Движение МКС с большой скоростью может вызывать возникновение ударной волны конусообразной формы. При этом взаимодействие указанной волны с веществом (пусть и очень разряженным на высотах МКС) может вызывать возмущение электронной плотности посредством локальных изменений плотности вещества. Указанное возмущение электронной плотности возможно как вследствие изменения скорости рекомбинации ионов и электронов, так и вследствие кратковременного перемещения облака электронов вместе с фронтом волны. Помимо этого, движение МКС может вызывать электродинамические эффекты, такие как: электрические токи и электромагнитные поля, которые могут воздействовать на ионы и электроны в ионосфере [Лисаков и др., 2021].

В целом, такие возмущения могут быть зарегистрированы с помощью радиолокационных и трансionoсферных методов измерений. Однако, важно отметить, что эти изменения обычно являются локальными как по времени, так и по пространству, что усложняет их регистрацию. Так для трансionoсферных методов нужно попадание ионосферной точки (а точнее луча спутник-приемник) в область возмущения. При этом ожидаемый эффект такого возмущения может маскироваться фоновыми возмущениями, которые будут влиять на всю интегральную величину полного электронного содержания (ПЭС).

ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Исходными данными для исследования являются файлы наблюдений за состоянием ионосферы, регистрируемые станциями ГНСС в формате RINEX и рассчитанные по файлам TLE значения положения и высоты МКС за определенный период времени (одни сутки). Для правильности расчета взаимного расположения МКС и ионосферных точек при фильтрации данных вариация ПЭС берется среднее значение высоты МКС за сутки (примерно 410 км), так разбег ионосферных точек будет минимален [Афраймович, Перевалова, 2006]

Все исходные данные берутся из открытой базы станций ГНСС geonet. Наблюдения проводятся для новозеландской сети в координатной сетке $-30 \times -60^\circ$ ю.ш. и $150:180^\circ$ в.д. (сетка может быть любая), так как в этой сети станции регистрируют параметры сигналов от навигационных спутников GPS, ГЛОНАСС, Galileo в постоянном режиме с частотой 1 Гц.

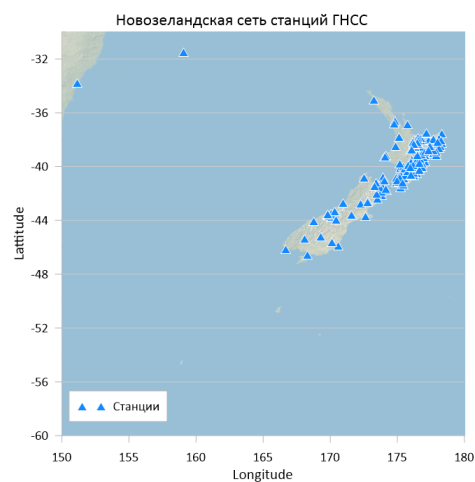


Рис. 1. Новозеландская сеть станций ГНСС

Для удобства сбора данных и наглядности отображения информации необходимо перейти в систему координат, связанную с МКС, где вектор направления движения станции будет направлен на север, а все связанные ионосферные точки будут собраны в координатной сетке ниже. Ионосферные точки, имеющие одинаковое или близкое положение, в зависимости от точности расчета, будут проанализированы одним из методов фильтрации, например скользящим средним.

По рассчитанным из TLE файлов координатам движения МКС можно рассчитать угол поворота ионосферных точек (азимут) для каждого момента времени положения МКС.

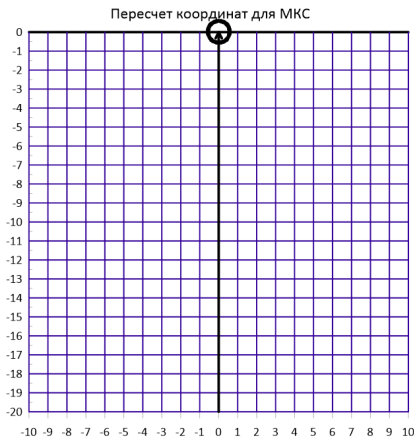


Рис. 2. Система координат МКС

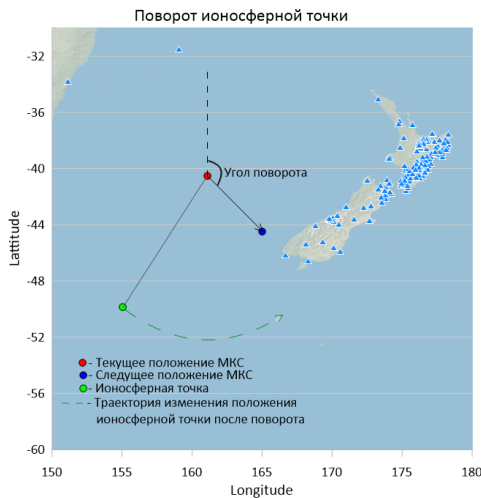


Рис. 3. Поворот ионосферной точки

Начальный азимут можно рассчитать, используя сферическую теорему косинусов. Расстояние на сфере можно рассчитать используя модифицированную формулу гаверсинусов для антиподов.

$\varphi_1, \lambda_1; \varphi_2, \lambda_2$ — широта и долгота двух точек в радианах

$\Delta\lambda$ — разница координат по долготе

$\Delta\sigma$ — угловая разница

Формула гаверсинусов для антиподов:

$$\Delta\sigma = \arctan \arctan \left(\frac{\sqrt{(\cos \cos(\varphi_1) \sin \sin(\Delta\lambda))^2 + (\cos \cos(\varphi_1) \sin \sin(\varphi_2) - \cos \cos(\varphi_1) \sin \sin(\varphi_2) \cos \cos(\Delta\lambda))^2}}{\sin \sin(\varphi_1) \sin \sin(\varphi_1) + \cos \cos(\varphi_1) \cos \cos(\varphi_2) \cos \cos(\Delta\lambda)} \right)$$

Для перевода углового расстояния в метрическое, нужно угловую разницу умножить на радиус Земли, для вычислений используется сфера радиусом 6372795 м, что может привести к ошибке вычисления расстояний порядка 0.5 %.

Формула для расчета начального азимута:

$$Z = \arctan \arctan \left(\frac{\sin \sin(\lambda_2 - \lambda_1) * \cos(\varphi_2)}{X \cos \cos(\varphi_1) \sin \sin(\varphi_2) - \sin(\varphi_1) \cos(\varphi_2) \cos(\lambda_2 - \lambda_1)} \right),$$

для с. ш.

$$Z = \arctan \arctan \left(\frac{\sin \sin(\lambda_2 - \lambda_1) * \cos(\varphi_2)}{\cos \cos(\varphi_1) \sin \sin(\varphi_2) - \sin(\varphi_1) \cos(\varphi_2) \cos(\lambda_2 - \lambda_1)} \right) + 180, \text{ для ю. ш.}$$

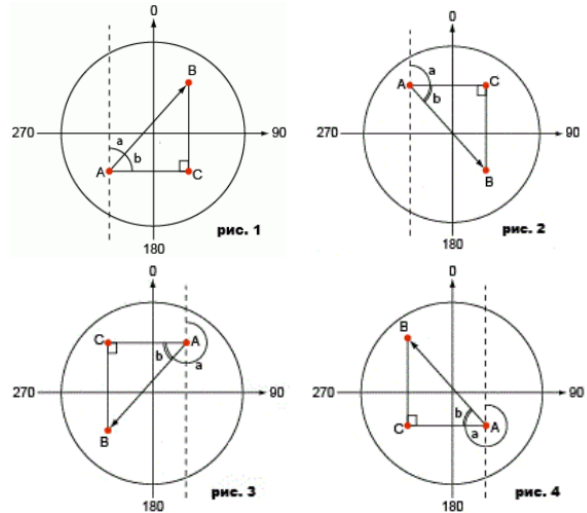


Рис. 4. Расчет углов на сфере

Так как входными данными по ионосферным точкам являются отфильтрованные данные вариаций ПЭС, необходимо соотнести по времени точки МКС и ионосферные точки, попавшие в выбранный квадрат.

Остается осуществить поворот ионосферных точек относительно угла поворота направления движения МКС в соответствующий момент времени

Для поворота точки на координатной плоскости Земли используется следующий алгоритм:

Перевод географических координат в плоскую систему;

Поворот на определенный градус;

Перевод из плоской системы в географическую;

В качестве плоской системы координат можно использовать Меркаторскую систему координат. Равноугольность Меркаторской проекции позволяет просчитать поворот точки без потери по углу, но с потерей по расстоянию.

Рассмотрим простой случай расчета проекции Меркатора для эллипсоида. Для расчета возьмем параметры по ГСК-2011 из ГОСТ 32453—2017.

Долгота — Long (в радианах). Широта — Lat (в радианах)

$$\text{Эксцентриситет} — e = \sqrt{2 * \alpha + \alpha^2}$$

Уравнения перехода из Широты/Долготы в Меркаторскую проекцию:

$$X = a * Long$$

$$Y = a * \ln \ln \left(\tan \tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{Lat}{2} \right) * \left(\frac{1 - e * \sin \sin (Lat)}{1 + e * \sin \sin (Lat)} \right)^{e/2} \right)$$

Уравнения перехода из Меркаторской проекции в Широту/Долготу.

$$Long = X/a$$

Широта вычисляется итерационным методом:

$$\varphi_n = \frac{\pi}{2} - 2 * \arctan \arctan \left(\exp \exp \left(-\frac{Y}{a} \right) \right)$$

$$d\varphi = \frac{\pi}{2} - 2 * \arctan \arctan \left(\exp \exp \left(-\frac{Y}{a} \right) * \left(\frac{1 - e * \sin \sin \left(\frac{\pi}{2} \right)}{1 + e * \sin \sin \left(\frac{\pi}{2} \right)} \right) \right) - \varphi_n$$

$$\varphi_{n+1} = \varphi_n + d\varphi$$

Потеря по расстоянию компенсируется путем предварительного расчёта расстояния от

ионосферной точки до станции МКС по формуле гаверсинусов. После поворота точки на плоской системе координат проводится коррекция расстояния.

Следующими этапом проводится фильтрация данных, попавших в определенный квадрат сетки по параметру TECU.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена идея обнаружения ионосферных эффектов от пролета МКС. Реализация этой идеи позволит обнаружить ионосферные эффекты даже в том случае, если их амплитуда будет кратно меньше фоновых значений вариаций ПЭС. Реализация данного метода и накопление соответствующей статистики планируется в ближайшее время.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Лисаков Ю.В., Лапшинова О.В., Пушкин Н.М. Измерения токов натекания и квазистационарного электрического поля в приповерхностной зоне РС МКС в ионосфере Земли // Космическая техника и технологии. 2021. №. 4. С. 5–21. DOI: 10.33950/spacetech2308-7625-2021-4-5-21

Афраймович Э.Л., Первалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли / Иркутск: Изд-во ИЦ ВСНЦ СО РАН, 2006. 480 с.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ РЕГИОНАЛЬНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ТЕС ПО ДАННЫМ GNSS С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ NeQuick2 И УНИВЕРСАЛЬНОГО КРИГИНГА

И.А. Павлов^{1,2,3}, А.М. Падохин^{1,2,3}

¹МГУ им. М. В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия,
theevent1115@gmail.com

²ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия

³ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия

RECONSTRUCTION OF REGIONAL TEC DISTRIBUTIONS FROM GNSS DATA, USING NeQuick2 MODEL AND UNIVERSAL KRIGING

I.A. Pavlov^{1,2,3}, A.M. Padokhin^{1,2,3}

¹Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow, Russia,
theevent1115@gmail.com

²IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

³ISTP SB RAS, Irkutsk, Russia

Аннотация. Надёжная оценка параметров ионосферы важна для многих практических задач, включая спутниковую навигацию, локацию, КВ радиосвязь. Одним из широко используемых для описания состояния ионосферы параметров является ТЕС (полное электронное содержание), которое может быть оценено с использованием данных глобальных навигационных спутниковых систем ГНСС. Вместе с тем для практических задач большой интерес представляет не интегральная характеристика — ТЕС, а непосредственно пространственно-временное распределение электронной концентрации в ионосфере. В настоящем докладе предлагается оригинальный метод региональной ассимиляции данных ТЕС в модель NeQuick2, основанный на одностанционных оценках абсолютного вертикального ТЕС исключительно по двухчастотным фазовым данным ГНСС и интерполяции поля эффективного управляющего параметра модели $F10.7$ с использованием универсального кригинга с учётом пространственной корреляции параметров ионосферы. В докладе приводятся данные сравнения скорректированной модели с результатами вертикального зондирования ионосферы, свидетельствующие об эффективности предложенного в работе подхода.

Ключевые слова: ионосфера, моделирование, ассимиляция данных, прогноз.

Abstract. Reliable estimation of ionospheric parameters is important for many practical problems, including satellite navigation, location, and HF radio communications. One of the parameters widely used to describe the state of the ionosphere is TEC (total electron content), which can be estimated using data from global navigation satellite systems GNSS. At the same time, for practical problems, it is not the integral characteristic — TEC — that is of greater interest, but the spatiotemporal distribution of electron concentration in the ionosphere itself. This paper proposes an original method for regional assimilation of TEC data into the NeQuick2 model, based on single-station estimates of absolute vertical TEC exclusively from dual-frequency GNSS phase data and interpolation of the effective control parameter field of the $F10.7$ model using universal kriging, taking into account the spatial correlation of ionospheric parameters. The report provides data comparing the adjusted model with the results of vertical sounding of the ionosphere, indicating the effectiveness of the approach proposed in the work.

Keywords: ionosphere, modeling, data assimilation, forecast.

ВВЕДЕНИЕ

Коррекция ионосферных моделей является актуальной задачей в контексте прогноза космической погоды и распространения радиоволн. Алгоритмы адаптации позволяют наилучшим образом объединить текущую информацию о среде и её модельные оценки. Существует множество работ по ассимиляции различных типов данных в модель, из которых наиболее распространённый вариант — использование данных ГНСС станций полного электронного содержания для коррекции медианных моделей. Такой выбор обусловлен прежде всего наличием большого числа приёмных станций для различных навигационных систем, а также их доступностью для широкого набора времен. Для задач радиораспространения, в частности задач наклонного зондирования, особо важно иметь надёжные оценки трёхмерных параметров ионосферы — распределение электронной концентрации, и, следовательно, критической частоты максимума $F2$ -слоя. Для выбранной модели NeQuick2 [Nava et al, 2008] плотность электронов зависит от географических координат,

месяца, времени и задаётся единственным управляющим параметром $F10.7$ — потоком солнечного излучения на длине волны 10.7 сантиметров. Параметр является глобальным и предоставляется обсерваториями одним значением для каждого дня. Таким образом, целью данной работы является региональная коррекция модели NeQuick2 по управляющему параметру $F10.7$ по данным вертикального ТЕС в Европе двумя методами: первый — подбор одного эффективного $F10.7$ для всего региона, второй — расчёт поля эффективного $F10.7$ с использованием универсального кригинга. Для оценки эффективности данного метода было предложено произвести валидацию по критической частоте f_oF2 , полученной по данным ионозондов, тем самым проверялась возможность использования данных способов коррекции для задач радиозондирования.

КОРРЕКЦИЯ ПО ЭФФЕКТИВНОМУ СРЕДНЕМУ $F10.7$

В работе приведены результаты для одного дня 2019-08-03, с Kp не превышающем 3. Спутниковые

данные сети станций IGS, переводились в формат вертикального полного электронного содержания с интервалом 15 мин [Yasyukevich et al., 2015].

Один из наиболее простых методов коррекции — это минимизация квадрата нормы отклонения наблюдаемого вертикального TEC и модельного в каждый момент времени методом наименьших квадратов по управляющему параметру $F10.7$. Такая процедура производилась для каждой станции в Европейском регионе, в результате был получен массив данных с географическим положением станции и эффективным $F10.7$ для каждого момента времени. Усреднив полученные значения эффективных параметров было вычислено региональное значение $F10.7_{\text{eff}}$, которое используется при построении регионального поля вертикального TEC, представленного на рис. 1 для 2UT и 12UT. Видно, что в ночное время значения TEC при коррекции превышают полученные по измеряемому $F10.7$, обратное верно для дневных рисунков, что свидетельствует об адаптации модели к данным в регионе.

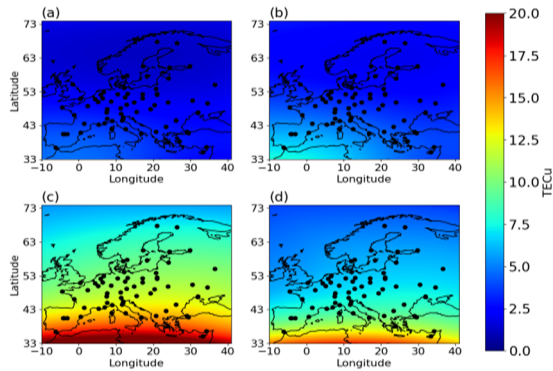


Рис. 1. Распределение полного электронного содержания по модели NeQuick2 для ночного периода (2 UT, панели (a) и (b)) и дневного (12 UT, панели (c) и (d)). Левые рисунки построены для измеряемого значения $F10.7 = 72$, правые для эффективного значения $F10.7$

КОРРЕКЦИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КРИГИНГА

Кригинг — метод пространственной интерполяции, минимизирующий дисперсию отклонения модели от данных [Демьянов, Савельева, 2010]. Для учета пространственного градиента исходных данных в работе использовался универсальный

кригинг с линейным трендом по широте и долготе. Также для корректной работы алгоритма необходимо разумно осуществлять выбор вариограммы, описывающей вариацию разницы значений переменной в двух точках как функцию от расстояния между ними и направления (h). В работе была использована модель стабильной вариограммы, описываемой формулой 1:

$$\gamma(h) = c_0 + c \left[1 - \exp\left(\frac{-h^\alpha}{a}\right) \right], \quad (1)$$

где c_0 — «nugget» — параметр, учитывающий неопределенность в интерполируемых данных, c — «still» — параметр, описывающий высоту подъема вариограммы, a — «range» — расстояние, на котором данные влияют друг на друга.

Оценка параметров производилась с помощью аппроксимации эмпирической вариограммы в каждый момент времени, а в качестве исходных данных использовался массив данных $F10.7$, полученный на предыдущем этапе коррекции. Необходимо отметить, что при радиусе корреляции больше, чем размер региона, интерполированный $F10.7$ ведет себя как глобальный параметр, в ином случае становится возможным выделить локальные особенности в полном электронном содержании, показанные на рис. 2. На рис. 3 показан суточный ход TEC для станции BRUX, который подтверждает эффективность методов адаптации модели, приближая модельную кривую к реальным данным.

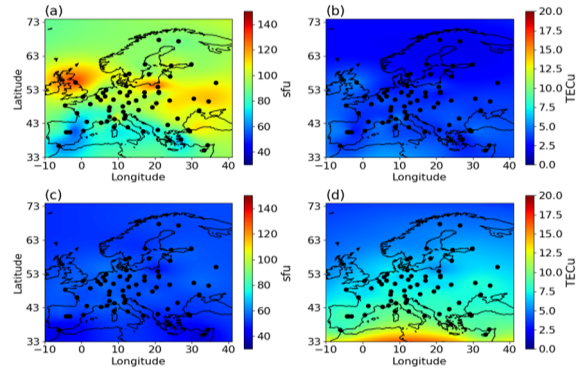


Рис. 2. Поле интерполированного эффективного $F10.7$ для ночного периода (2 UT, панели (a)) и дневного (12 UT, панель (c)). На рисунках (c) и (d) изображено распределение вертикального TEC для соответствующих полей $F10.7$

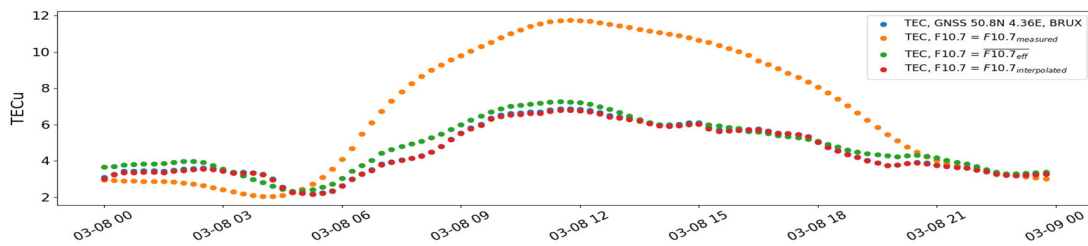


Рис. 3. Значения измеренного полного электронного содержания (синяя кривая) и восстановленного по модели при использовании различных значений $F10.7$: измеряемого (оранжевая кривая), среднего для региона (зеленая), интерполированного (красная)

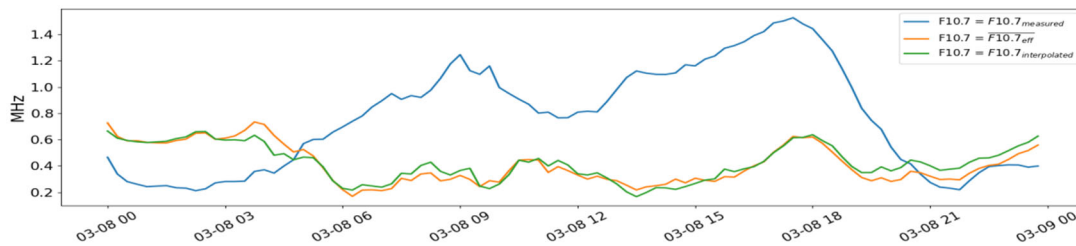


Рис. 4. Значения средней абсолютной ошибки $foF2$ для отклонения модели и данных при различных значениях $F10.7$. Для измеряемого (синяя кривая), среднего для региона (оранжвая), интерполированного (зеленая)

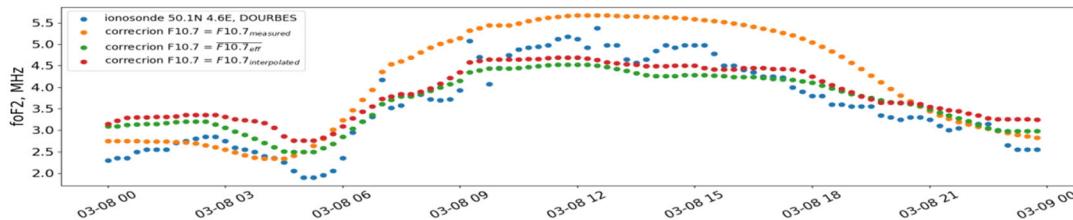


Рис. 5. Значения измеренной критической частоты $foF2$ (синяя кривая) и восстановленной по модели при использовании различных значений $F10.7$: измеряемого (оранжевая кривая), среднего для региона (зеленая), интерполированного (красная)

Для верификации результатов коррекции было произведено сравнение восстановленных по адаптированной модели критических частот $foF2$ с наблюдаемыми на ионозондах сети GYRO. В качестве метрики была выбрана средняя абсолютная ошибка, изображенная на рис. 4. Наилучшим образом $foF2$ восстанавливается в случае использования среднего эффективного и интерполированного $F10.7$, причем два способа коррекции улучшают результаты моделирования критической частоты и их соответствие данным наблюдений днем и ухудшают ночью. В дневные часы отклонение от наблюдаемой $foF2$ по всему региону не превышает 0.65 МГц, для измеряемого значения отклонение не превышает 1.55 МГц. В ночные часы при коррекции наблюдается увеличение значений $foF2$ по сравнению с использованием модели с глобальным значением $F10.7$. Для иллюстрации на рис. 4 приведены результаты для ионозонда DOORBES, расположенного вблизи с ГНСС приемником BRUX.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные в работе два способа коррекции модели по сети станций ГНСС в Европе показали свою эффективность при восстановлении

распределений полного электронного содержания. Во-первых, коррекция заданием поля эффективного параметра $F10.7$ в регионе позволяет оценить среднемасштабные структуры в ТЕС. Во-вторых, днем наблюдается лучшее согласие модельных и экспериментальных данных $foF2$ при использовании обоих методов коррекции, вместе с тем ночью лучший результат достигается при нескорректированном, наблюдаемом значении $F10.7$. Это свидетельствует о возможной некорректной параметризации профиля электронной концентрации на высотах выше максимума $F2$ -слоя в ночные часы в модели NeQuick2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Nava B., Coisson P., Radicella S.M. A new version of the NeQuick ionosphere electron density model // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Phys. 2008. V. 70, N 15. P. 1856–1862.
- Yasyukevich Y.V. et al. Influence of GPS/GLONASS differential code biases on the determination accuracy of the absolute total electron content in the ionosphere // Geomagnetism and Aeronomy. 2015. V. 55. P. 763–769.
- Демьянов В.В., Савельева Е.А. Геоэстатистика: теория и практика. 2010.

УДК 551.511.31

АНАЛИЗ ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ИНТЕНСИВНОСТИ 557.7НМ, РЕГИСТРИРУЕМЫХ С ПОМОЩЬЮ КАМЕР ВСЕГО НЕБА НГК ИСЗФ СО РАН

А.А. Перебоева¹, Т.Е. Сыренова², В.Р. Черткова¹, Р.В. Васильев²

¹ЧОУ “Точка будущего”, Иркутск, Россия,
pereboeva07@bk.ru

²Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

ANALYSIS OF WAVE DISTURBANCES IN 557.7NM INTENSITY RECORDED USING ALL-SKY CAMERAS OF THE NHC ISTP SB RAS

A.A. Pereboeva¹, T.E. Syrenova², V.R. Chertkova¹, R.V. Vasilyev²

¹EC “Point of future”, Irkutsk, Russia,
pereboeva07@bk.ru

²Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia

Аннотация: Волновые возмущения играют значительную роль в динамике атмосферы Земли. Исследуя волновые возмущения в верхней атмосфере, можно оценить количество энергии, переносимой из нижней атмосферы в верхнюю и впоследствии оценить, например, степень влияния процессов в нижней атмосфере на динамику искусственных спутников земли. Для юга Восточной Сибири проведен статистический анализ волновых возмущений в интенсивности 557.7 нм — линии высвечивания атомарного кислорода (высота ~85–115 км.) с использованием оптических инструментов Национального Гелиогеофизического комплекса.

Ключевые слова: внутренние гравитационные волны, свечение атмосферы, камера всего неба, эмиссия 557.7 нм

Abstract: Wave disturbances play a significant role in the dynamics of the Earth's atmosphere. By studying wave disturbances in the upper atmosphere, it is possible to estimate the amount of energy transferred from the lower atmosphere to the upper atmosphere and subsequently evaluate, for example, the influence of processes in the lower atmosphere on the dynamics of artificial Earth satellites. For the south of Eastern Siberia, a statistical analysis of wave disturbances at 557.7 nm intensity - the atomic oxygen emission line (altitude ~85–115 km) was carried out using optical instruments of the National Heliogeophysical Complex.

Keywords: internal gravitational waves, airglow, all-sky camera, 557.7 nm emission

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важнейших компонентов, вносящих вклад в собственное свечение верхней атмосферы, является атомарный кислород. Самой яркой дискретной эмиссией в видимой области спектра в ночном свечении среднширотной верхней атмосферы является зеленая эмиссия атомарного кислорода [O1] 557.7 нм, соответствующая запрещенному переходу ('S - *D):



В средних широтах зеленая эмиссия возбуждается в диапазоне высот 85–15 км с максимумом интенсивности на -97 км [Bates, 1978] и подвергается регулярным и нерегулярным вариациям различных временных масштабов [Шефов и др., 2006].

Вариации интенсивности излучения 557.7 нм во многом объясняется влиянием солнечной активности, а также процессов, происходящих в нижележащей атмосфере и литосфере. Эти процессы генерируют внутренние гравитационные волны (ВГВ), распространяющиеся в верхние слои атмосферы.

До настоящего времени вариации интенсивности 557.7 нм для юга Восточной Сибири тщательно исследовались в работах [Михалев и др., 2008; Медведева, 2008; Михалев, 2011] с помощью зенитного фотометра со сменными фильтрами. Отмечалась значительная вариабельность эмиссии 557.7 нм на различных временных масштабах. Причинами возмущений интенсивности зеленой линии наиболее часто являются ВГВ, метеорологические процессы, орографический эффект.

С созданием Национального Гелиогеофизического комплекса (НГК) с высокочувствительной аппаратурой появилась возможность исследовать не только наличие ВГВ, но и с помощью широкоугольных систем регистрировать направления и скорости распространения.

Внутренние гравитационные волны — распространение колебаний воздушных масс, имеющих в отличие от обычных звуковых (акустических) волн, помимо продольной, ещё и поперечную, сдвиговую составляющую [Исаева и др., 2016]. Механизм этих волновых колебаний основан на изменении плавучести частиц воздуха при адиабатических перемещениях по вертикали. Причинами возникновения ВГВ, как правило, являются: особенности рельефа местности (граница «океан-суша»), цунами, тайфуны, торнадо, извержения вулканов, метеоры, геомагнитная активность, солнечный терминатор, землетрясения, запуски космических аппаратов, военные и атомные взрывы и многие другие.

Способы регистрации волновых возмущений в верхней атмосфере могут быть самыми разными. Помимо оптического метода регистрации возмущений параметров атмосферы проходящими ВГВ (фотоаппараты, интерферометры, спектрометры, фотометры и камеры всего неба) можно использовать радиофизический (ионозонды, спутники ГЛОНАСС, радары), потому как вариации плотности и температуры нейтральной компоненты воздуха верхней атмосферы могут в значительной степени влиять на концентрацию холодной плазмы, которая составляет ионосферу Земли.

Поскольку источники ВГВ располагаются, как

правило, в литосфере либо в нижней атмосфере, волны распространяются вверх по мере уменьшения плотности атмосферы с высотой. Интерес при изучении динамики верхней атмосферы представляет способность волн переносить энергию и импульс с высот высвечивания 557.7 нм (около 90 км) до высот высвечивания 630 нм (около 250 км).

В работе проведено статистическое исследование волновых возмущений интенсивности линии 557.7 нм и сравнение данных возмущений на высотах 97 км и 250 км. Основной задачей является поиск и выявление сходств и различий регистрируемых параметров.

ОПТИЧЕСКИЕ ИНСТРУМЕНТЫ НАЦИОНАЛЬНОГО ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

НГК расположен в Геофизической обсерватории (ГФО) ИСЗФ СО РАН, вблизи п. Торы, в 150 км от г. Иркутск (51°48 с.ш., 103°04 в.д., высота 670 м). В состав комплекса входят: фотометры, спектрометры, интерферометры Фабри-перо, камеры всего неба.

Камера всего неба представляет собой цифровой аппарат с объективом типа «рыбий глаз» и с барабаном сменных фильтров. Основное предназначение широкоугольных камер — построение пространственной картины интенсивности различных эмиссий.

Для анализа и дальнейшего сравнения волновых возмущений в двух линиях интенсивности были отобраны ночи эмиссии 557.7 нм, когда регистрировались волновые структуры в 630 нм. Данные были получены

в ходе ручной обработки оператором исходных файлов камеры всего неба в безлунные, безоблачные дни. В результате была получена таблица с датой и временем наблюдения, расположением на кадре и направлением распространения волновых структур.

Снимки интенсивности 557.7 нм для дат из таблицы были скачаны с внутреннего ресурса ИСЗФ СО РАН (<http://10.0.6.49/>), где они представлены после первичной обработки для дальнейшего анализа (рис. 1). На сайте можно выбрать камеру, дату и время съемки и скачать выбранные снимки.

Обработка кадров в дни, когда были зарегистрированы волновые возмущения в интенсивности 630 нм. Скачанные данные кадров 557.7 нм, полученных с помощью камеры всего неба из архивов НГК, подвергаются ручной обработке. В случае, если волновые структуры повторяются на трех и более последовательных кадрах, они записываются в таблицу. Также вносится информация о дате, времени, местоположении и направлении распространения зарегистрированных структур.

Кроме того, одним из важных факторов является распознавание и разделение на кадрах облаков от ВГВ. Критерием к различию является то, что сквозь волны просвечиваются звезды, тогда как облачность перекрывает видимые звезды. Примеры кадров, на которых присутствуют и облачность, и волновые возмущения в обеих линиях интенсивности, приведены на рис. 2. Красным цветом отмечены волны, зеленым — облачность.

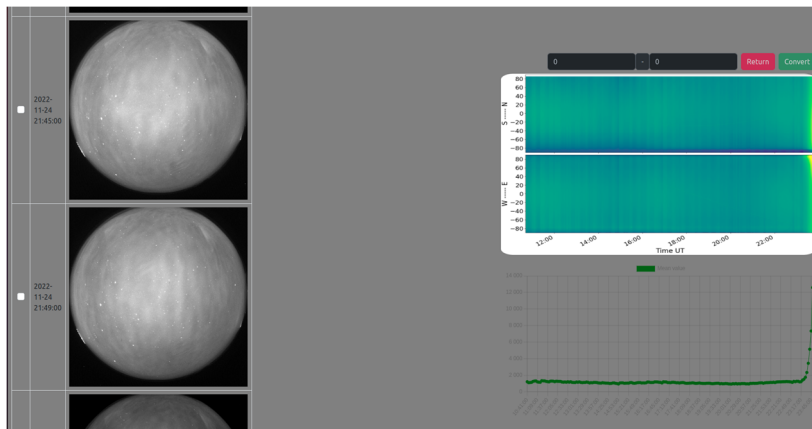


Рис. 1. Страница просмотра кадров после первичной обработки. На кадрах можно отчетливо наблюдать ВГВ, распространяющиеся вдоль направления восток–запад

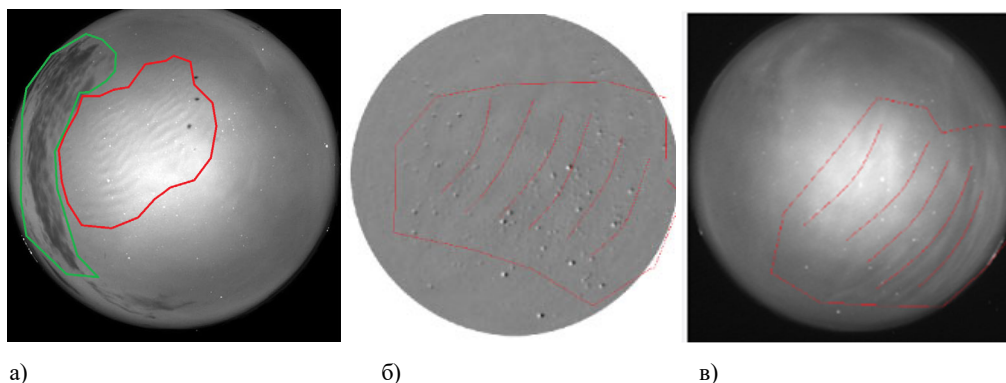


Рис. 2. а) пример кадра с волновыми возмущениями на фоне облачности (557.7 нм); б) кадр с волновыми структурами в линии 630 нм 2022-01-02 17:44:01; в) кадр с волновыми структурами в линии 557.7 нм 2022-01-02 16:43:00

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате обработки массива данных с июня 2021 г. по октябрь 2023 г. проанализировано 4422 снимка камеры всего неба в линии интенсивности 557.7 нм. На кадрах было обнаружено 200 случаев ВГВ. Основные направления распространения волновых возмущений — на юг и на восток: 73 и 72 случаев, соответственно. На запад и на север несколько меньше — 57 и 44 соответственно.

Отмечается сезонная зависимость: наибольшее количество ВГВ зимой — 49 % от общего количества наблюдения волн, 30.5 % — волн замечены осенью, 13 % — весной и 7.5 % волн замечены лето. Это согласуется с данными сезонного хода, полученными в работе [Михалев, 2011], где также отмечены наиболее частые вариации интенсивности в зимнее время.

Сравнение появления волн в интенсивностях 5577 и 6300. Было обнаружено 4 случая наблюдения волн на двух высотах с интервалом между ними 1 ч. В таком случае вертикальная скорость распространения волн составляет около 40 м/с, что вполне согласуется с теорией ветровой фильтрации в верхней атмосфере [Pogoreltsev, Pertsev, 1996].

Статистический анализ показал, что в интенсивности 557.7 нм волны наблюдаются примерно в 4–5 раз чаще, чем в линии 630 нм. При этом на одном кадре 557.7 нм может наблюдаться несколько фронтов волновых возмущений.

Регистрация волновых возмущений как на высотах высвечивания линии 557.7 нм (97 км), так и на высотах свечения линии 630 нм (250 км) является одним из важных свидетельств вертикальной связи в динамике верхней атмосферы. Обнаружение волновых возмущений на указанных высотах может позволить оценить возможные источники в более нижних слоях атмосферы или в литосфере. Ранее выполненные исследования вариаций интенсивности линии 557.7 нм производились с помощью зенитного фотометра. Полученные в настоящей работе статистические результаты с использованием широкоугольной камеры дают лучшее

пространственное разрешение. Кроме того, дальнейшее изучение и пополнение набора статистических параметров ВГВ могут послужить отличной базой при создании моделей среднеширотной верхней атмосферы и разработки методов искусственного интеллекта.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (субсидия № 075-ГЗ/ЦЗ569/278).

Экспериментальные данные получены с использованием оборудования ЦКП «Ангара» (ИСЗФ СО РАН) <http://ckp-angara.iszf.irk.ru/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Исаева А.Д., Матин Д.С., Синичкин А.Н., Фролов А.С. Внутренние гравитационные волны в атмосфере // Проблемы науки. 2016. №5 (6).

Медведева И.В. Излучение среднеширотной верхней атмосферы Земли в линии атомарного кислорода 557.7 нм по данным наблюдений в регионе Восточной Сибири: дис. к.ф.-м.н. Иркутск: ИСЗФ СО РАН, 2008.

Михалев А.В. Вариабельность атмосферной эмиссии 557.7 нм // Солнечно-земная физика. 2011. Вып. 17. С. 184–188.

Михалев А.В., Медведева И.В., Костылева Н.В., Стоева П.В. Проявление солнечной активности в вариациях атмосферных эмиссий 557.7 и 630 нм в 23-м солнечном цикле // Оптика атмосферы и океана. 2008. Т. 21, № 5. С. 425–431.

Шефов Н.Н., Семенов А.И., Хомич В.Ю. Излучение верхней атмосферы – индикатор ее структуры и динамики. М.: ГЕОС, 2006. 741 с.

Bates D.R. Forbidden oxygen and oxygen lines in the nightglow // Planet. Space Sci. 1978. V. 26, N10. P. 897–912.

Pogoreltsev A.I., Pertsev N.N. The influence of background wind on the formation of the acoustic-gravity wave structure in the thermosphere // Izv. Atmos. Ocean. Phys. 1996. V. 132. P. 723–728.

Shiokawa K., Ihara C., Otsuka Y., Ogawa T. Statistical study of nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbances using midlatitude airglow images // J. Geophys. Res. 2003. 108(a1). 1052.

Syrenova T.E., Beletsky A.B., Ratovsky K.G. et al. Morphology of traveling wave disturbances recorded in Eastern Siberia in 630 nm atomic oxygen emission // Atmosphere. 2022. 13(2). 198.

БАЛЛОННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ И УСЛОВИЯ ДЛЯ ЕЁ РАЗВИТИЯ В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

А.В. Петрашчук, Д.Ю. Климушкин, П.Н. Магер

Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия,
petrashchuk@iszf.irk.ru

BALLOONING INSTABILITY AND CONDITIONS FOR ITS DEVELOPMENT IN THE EARTH'S MAGNETOSPHERE

A.V. Petrashchuk, D.Yu. Klimushkin, P.N. Mager

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia,
petrashshuk@iszf.irk.ru

Аннотация. В этом докладе рассматриваются условия развития баллонной неустойчивости в двумерно неоднородной плазме. Основным фактором для её развития на замкнутых силовых линиях магнитосферы является резкое падение давления плазмы по мере удаления от Земли. Показано, что неустойчивость лежит на той же ветви дисперсии, что и медленный магнитозвуковой резонанс.

Ключевые слова: Баллонная неустойчивость, медленный магнитный звук, альфвеновский резонанс.

Abstract. This paper discusses conditions for the development of ballooning instability in two-dimensionally inhomogeneous plasma. The main factor for its development on closed lines of force of the magnetosphere is a sharp decrease in plasma pressure as it moves away from the Earth. It is shown that the instability lies on the same dispersion branch as the slow magnetosonic resonance.

Keywords: Ballooning instability, slow magnetosonic wave, Alfvén resonance.

ВВЕДЕНИЕ

Баллонная неустойчивостью называется вид гидродинамической плазменной неустойчивости относительно возмущений, у которых азимутальная длина волны λ_a много меньше радиальной длины волны λ_r , и обе они много меньше продольной длины волны [Леонович и др., 2015]. Теория баллонной неустойчивости в магнитосфере Земли была развита в работах [Hameiri et al., 1991; Cheremnykh et al., 2004; Sorathia et al., 2020]. В плазме конечного давления кривизна силовых линий приводит к сцеплению альфвеновских волн с медленным магнитным звуком (ММЗ). Существует ряд работ, где предполагается, что при определенных условиях альфвеновские волны могут переходить в режим баллонной неустойчивости [Oberhagemann et al., 2020]. При этом другие авторы утверждают, что неустойчивость может развиваться только на ММЗ колебаниях [Мазур и др., 2013]. Они также установили, что при резком падении давления плазмы с расстоянием от Земли квадрат собственной частоты медленного магнитного звука становится отрицательным, то есть достигает, некоторого нижнего порога баллонной неустойчивости, при этом её инкремент растет с увеличением азимутального волнового числа k_a . Однако связь между неустойчивостью и ММЗ модами в работах [Мазур и др. 2013] не совсем ясна, поскольку инкремент неустойчивости в зависимости от поперечной длины МГД волн должен достигать некоторого конечного значения, только тогда, когда радиальная составляющая волнового вектора k_r стремится к нулю [Petrashchuk et al., 2024]. Причем радиальная длина ММЗ волн в этих условиях остается конечной даже при нулевой частоте волны.

ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ

Целью данного доклада является теоретическое исследование пространственной структуры неустойчивостей, развивающихся на сцепленных МГД модах в двумерно неоднородной модели магнитосферы Земли. Для этого были поставлены следующие две задачи:

1. Изучить продольную структуру собственных функций сцепленных альфвеновских и ММЗ мод в устойчивом и неустойчивом режиме.
2. Определить условия развития баллонной неустойчивости в зависимости от плазменного давления и его градиента для первых двух гармоник.

ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

В докладе рассматривается дипольная модель магнитного поля Земли, которая обладает симметрией по азимуту, поэтому для описания сцепленных альфвеновских и ММЗ мод с частотой ω используется следующая система уравнений [Klimushkin, 1994]:

$$\frac{k_r^2 g_1}{k_a^2 g_2} \hat{L}_T(\omega) \Phi + \hat{L}_P(\omega) \Phi - \sqrt{\frac{g_1}{g_2}} \frac{8\pi}{B^2 R} \frac{\partial P}{\partial L} \Phi = \sqrt{g_1} \frac{2\omega}{R} \frac{V_S}{V_A} \Theta, \quad (1)$$

$$\hat{L}_S(\omega) \Theta = \sqrt{g_1} \frac{2\omega}{R} \frac{V_S}{V_A} \Phi. \quad (2)$$

Здесь k_r и k_a — радиальная и азимутальная составляющая волнового вектора, B и P — равновесное магнитное поле и давление плазмы, L — координата магнитной оболочки, R — локальная кривизна силовой линии, $g_{1,2}$ — компоненты метрического тензора, Φ и Θ — электрический потенциал альфвеновской волны и величина пропорциональная дивергенции смещения (т.е. $\Theta \propto \nabla \cdot \xi$), соответственно, а $\hat{L}_T(\omega)$, $\hat{L}_P(\omega)$ и $\hat{L}_S(\omega)$ дифференциальные операторы:

$$\hat{L}_T(\omega) = \frac{\partial}{\partial l_{\parallel}} \sqrt{\frac{g_2}{g_1}} \frac{\partial}{\partial l_{\parallel}} + \sqrt{\frac{g_2}{g_1}} \frac{\omega^2}{V_A^2},$$

$$\hat{L}_P(\omega) = \frac{\partial}{\partial l_{\parallel}} \sqrt{\frac{g_1}{g_2}} \frac{\partial}{\partial l_{\parallel}} + \sqrt{\frac{g_1}{g_2}} \frac{\omega^2}{V_A^2},$$

$$\hat{L}_S(\omega) = \frac{\partial}{\partial l_{\parallel}} V_S^2 \sqrt{g_1 g_2} \frac{\partial}{\partial l_{\parallel}} + \sqrt{g_1 g_2} \frac{V_S^2}{V_C^2} \omega^2.$$

V_A , V_S , и V_C альфвеновская, звуковая, и магнито-звуковая скорости.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Систему уравнений (1) и (2) следует рассматривать как задачу на собственные значения относительно отношения радиальных и азимутальных компонент волнового вектора k_r^2/k_a^2 при заданных ω и L .

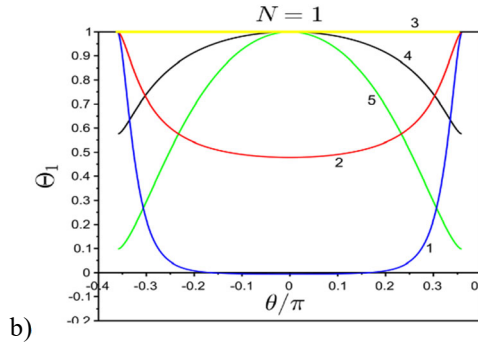
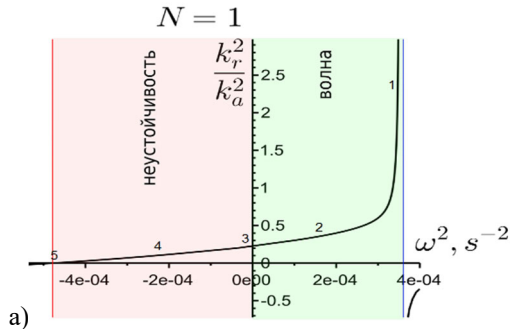


Рис. 1. а) отношение k_r^2/k_a^2 для основной гармоники в зависимости от квадрата частоты ω^2 ; б) изменения структуры Θ от магнитной широты θ . Гармоники (1) и (2) соответствуют ММЗ модам ($\omega^2 > 0$). Гармоника (3) соответствует случаю $\omega^2 = 0$ (граница неустойчивости) т.е., $\Theta = \text{const}$, а $\Phi = 0$. Гармоники (4) и (5) соответствуют минимальному и максимальному инкременту неустойчивости (т.е. когда $k_r^2 = 0$)

Численные расчеты проводились для геостационарной орбиты ($L=6.6$). Давление плазмы $P = (B_{eq}^2/8\pi)\beta_{eq}$ вдоль силовых линий считается постоянным, а его радиальный градиент $\partial P/\partial L$ отрицательным, поскольку этот критерий является ключевым условием для развития неустойчивости. Таким образом, мы можем найти собственные векторы

Φ и Θ , для системы (1) и (2), а также собственные значения k_r^2/k_a^2 рис. 1.

Порог неустойчивости, т.е. связь между обратным радиальным градиентом давления плазмы $H = P(\partial P/\partial L)^{-1}$ и параметром β_{eq} на экваторе, соответствует пределу $k_r^2 = 0$. На рис. 2 показано, что неустойчивость развивается либо при малом β_{eq} , но большом H , либо, наоборот, при очень большом β_{eq} , но малом H .

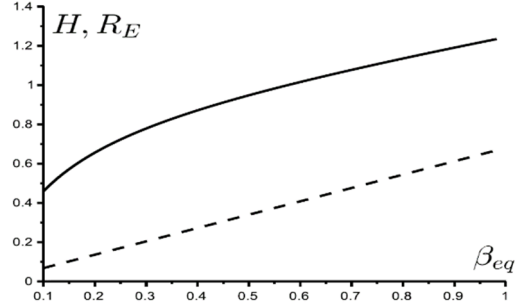


Рис. 2. Порог неустойчивости фундаментальной (сплошной) и второй (пунктирной) гармоник: масштаб радиальной неоднородности давления плазмы H в зависимости от β_{eq} на экваторе. Область неустойчивости лежит ниже соответствующих кривых [Petrashchuk et al., 2024]

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Леонович А.С., Козлов Д.А. О баллонной неустойчивости в токовых слоях // Солнечно-земная физика. 2015. Т. 1, № 2. С. 49–69.

Мазур Н.Г., Федоров Е.Н., Пилипенко В.А. Дисперсионное соотношение для баллонных мод и условия их устойчивости в околоземной плазме // Геомагнетизм и аэронаука. 2012. Т. 52, № 5. С. 639–648.

Hameiri E., Laurence P., Mond M. The ballooning instability in Space Plasma // J. Geophys. Res. 1991. V. 96, N A2. P. 1513–1526.

Cheremnykh O.K., Parnowski A.S., Burdo O.S. Ballooning modes in the inner magnetosphere of the Earth // Planetary and Space Science. 2004. V. 52, iss. 13. P. 1217–1229.

Sorathia K.A., Merkin V.G., Panov E.V. et al. Ballooning-interchange instability in the near-Earth plasma sheet and auroral beads: Global magnetospheric modeling at the limit of the MHD approximation // Geophys. Res. Lett. 2020. V. 47. P. e2020GL088227.

Oberhagemann L.R., Mann I.R. A New substorm onset mechanism: Increasingly parallel pressure anisotropic ballooning // Geophys. Res. Lett. 2020. V. 47. P. e2019GL085271.

Klimushkin D.Yu. Method of description of the Alfvén and magnetosonic branches of inhomogeneous plasma oscillations // Plasma Phys. Rep. 1994. V. 20. P. 280–286.

Petrashchuk A.V., Mager P.N., Klimushkin D.Yu. Ballooning instability in the dipole magnetosphere: The finite transverse wavelength influence // Phys. Plasmas. 2024. V. 31, N. 2. P. 022903.

ФОТОМЕТРИЯ НОЧНОЙ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ НА ОСНОВЕ ЦВЕТНОГО ПЗС ПРИЕМНИКА

С.В. Подлесный, А.В. Михалев

Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия, step8907@mail.ru

PHOTOMETRY OF THE EARTH NIGHT ATMOSPHERE BASED ON COLOR CCD RECEIVER

S.V. Podlesnyi, A.V. Mikhalev

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, step8907@mail.ru

Аннотация: В работе рассматривается методика регистрации излучения ночной атмосферы Земли фотометрическим методом с применением приемника на основе цветной ПЗС матрицы, имеющего широкополосные фильтры. Приводятся результаты обработки и анализа данных излучения атмосферы за период с 2010 по 2022 гг., полученных в ГФО ИСЗФ СО РАН, расположенной в пос. Торы республики Бурятия. Получен сезонный ход интенсивности излучения в разных цветовых каналах, выполнена оценка средней светимости ночного неба в спектральных диапазонах R-, G-, B-каналов цветной камеры для региона Восточной Сибири. В качестве приемников использовалась камера «Видеоскан 11002/О/П/2001» на основе ПЗС матрицы KODAK KAI-11002.

Ключевые слова: свечение атмосферы, фотометрия, цветная ПЗС матрица

Abstract: The paper discusses the method for recording the radiation of the Earth night atmosphere by the photometric method using a receiver based on a color CCD array with wideband filters. We present the results of the processing and atmospheric radiation data analysis obtained in the GPO ISTP SB RAS, located in the Tory village of the Buryatia Republic, in 2010-2022. As a result, a seasonal variation in the emission intensity in different color channels was obtained, the average luminosity of the night sky was estimated in the R-, G-, B-channels spectral ranges of color camera for Eastern Siberia. As the receivers, the camera «Video scan 11002/O/ P/2001» was used, based on a KODAK CCD KAI-11002.

Keywords: airglow, photometry, color CCD

ВВЕДЕНИЕ

В основном для оптических исследований физических процессов на высотах мезосферы – нижней термосферы используются отдельные спектральные составляющие излучения верхней атмосферы Земли. Регистрация же в интегральном излучении дает возможность оценить общую динамику излучения, включающую в себя все яркие линии и полосы эмиссий атмосферных составляющих, а также континуум собственного излучения атмосферы.

Целью данной работы является выявление сезонного хода свечения ночной атмосферы (СНА) посредством фотометрического исследования интенсивности интегрального излучения ночной атмосферы Земли с применением приемника на основе ПЗС-матрицы.

В ходе работы были проведены обработка и анализ оптических данных за период с 2010 по 2022 гг. интегрального излучения верхних слоев атмосферы, полученных при помощи широкоапертурной цифровой камеры для регистрации излучения ночной атмосферы ФИЛИН-1Ц. Камера установлена в Геофизической обсерватории (ГФО ИСЗФ СО РАН), расположенной в пос. Торы республики Бурятия (51° с.ш., 103° в.д., высота 673 м над уровнем моря).

АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Широкоугольная высокочувствительная фотокамера ФИЛИН-1Ц предназначена для регистрации и исследования собственного излучения (люминесценции) атмосферы ночного неба, его пространственно-временных вариаций, естественных и искусственных космических объектов (метеоров, космических аппаратов), контроля прозрачности атмосферы и решения

некоторых других задач. В качестве входного объектива используется объектив Мир-20 (фокусное расстояние 20 мм, относительное отверстие 1:3.5).

В качестве регистрирующего устройства в аппарате используется ПЗС-камера «Видеоскан 11002/О/П/2001» на основе ПЗС-матрицы KODAK KAI-11002. Основные параметры ПЗС-камеры: разрешение снимка — 4008×2672 пикселей, размер пикселя – 9×9 мкм. Пиксели делятся на три вида: R, G и B. Спектральная чувствительность по уровню 0.5 от максимального значения для R-пикселей расположена от 600 нм до 750 нм, для G-пикселей чувствительность расположена в диапазоне от 510 нм до 590 нм и для B — от 410 нм до 510 нм. Время экспозиции камеры составляет 5 мин.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В процессе исследования сезонного хода СНА выбирались снимки ночного неба, полученные преимущественно в ясные, безлунные ночи за период с 2010 по 2022 гг. Для автоматизации процесса отбора необходимых кадров был разработан алгоритм определения прозрачности атмосферы. Идея алгоритма скрипта основана на том, что звезды имеют строгие границы и их яркость значительно выше значений яркости ночного неба, а при появлении облачности яркость звезд падает. Это, в свою очередь, дает возможность подсчитать видимые на изображении звезды, выделив их как области изображения с повышенной интенсивностью по отношению к окружающему фону, и оценить плотность облачного покрова исходя из количества выделенных звезд. В качестве верификации результаты работы скрипта сравнивались сведения об облачном покрове, полученные при помощи спутниковых и

модельно-интерполяционных методов. Для этой цели было проведено сопоставление временной динамики локального облачного покрова, полученной по данным проекта ECMWF ERA5 и по данным спутников NOAA, с прозрачностью ночной атмосферы, полученной при помощи камеры. Результаты сравнительного анализа показали, в целом, хорошее согласие данных архива ECMWF ERA5 и облачности, наблюдаемой при помощи камеры. Недостатками являются отсутствие в архиве информации о быстрых вариациях облачности, а также положительные и отрицательные задержки в динамике облачных полей длительностью около двух часов. Вследствие нерегулярности спутниковых данных, больших временных интервалов между пролетами и сложностью определения облачности в темное время суток, уверенных выводов по результатам сравнения со спутниковыми данными сделать не удалось [Подлесный и др., 2022].

Излучение, регистрируемое в цветовых R-, G- и B-каналах цветной ПЗС камеры в спокойных геомагнитных условиях, в большей степени обусловлено континуумом собственного свечения верхней атмосферы, так как при больших спектральных интервалах регистрации (~100–150 нм) континуум становится основным компонентом в свечении ночной атмосферы. На рис. 1 показаны схематичный средний спектр ночного излучения верхней атмосферы (верхняя панель) и спектральная чувствительность матрицы KODAK KAI-11002 (нижняя панель). Следует отметить, что основной компонентой излучения верхней атмосферы по интенсивности является континуум.

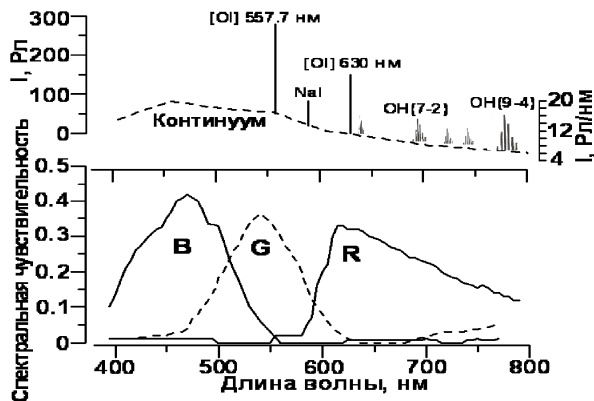


Рис. 1. Схематичный средний спектр ночного излучения верхней атмосферы (вверху) и спектральная чувствительность матрицы KODAK KAI-11002 (внизу)

Определены сезонные хода светимостей ночного неба в каналах цветной камеры, обладающих снижением светимостей в весенние месяцы, увеличением в осенние месяцы и наличием летнего максимума (рис. 2). Летний максимум интерпретируется нами рассеянным солнечным светом в условиях незначительного погружения Солнца за горизонт в летние месяцы (эффект «белых» ночей). В осенний, зимний и весенний периоды сезонный ход СНА совпадает с сезонным ходом сплошного спектра СНА (рис. 3), полученного в работе [Фишкова, 1983]. Это может быть объяснено тем, что определяющий вклад в общую светимость ночной атмосферы вносит континуум.

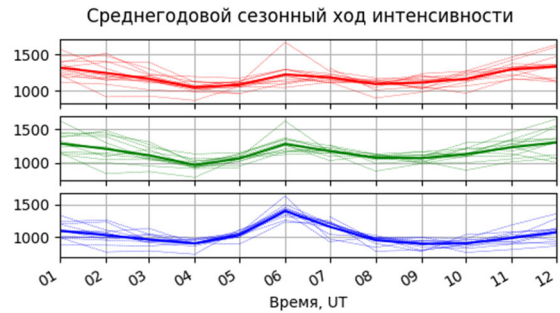


Рис. 2. Среднегодовой сезонный ход свечения ночной атмосферы за 2010–2022 гг.

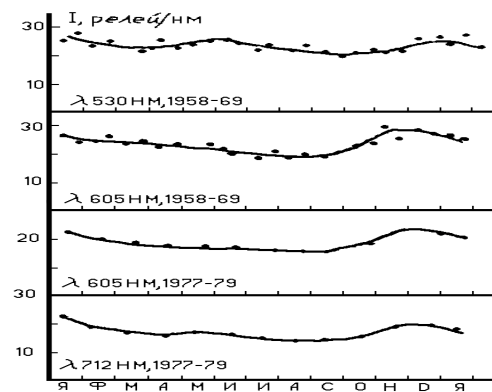


Рис. 3. Сезонный ход интенсивности сплошного спектра в участках спектра 530 нм 630 нм 712 нм для разных лет [Фишкова, 1983]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определены сезонные хода светимостей ночного неба в R, G, B каналах цветной камеры, обладающих снижением интенсивности в весенние месяцы, увеличением в осенние месяцы и наличием летнего максимума. Летний максимум в сезонном ходе интерпретируется рассеянным солнечным светом.

Сравнительный анализ с аналогичными данными наблюдений свечения верхней атмосферы, полученных другими авторами в прошлые десятилетия, показал сходство сезонного хода для сибирского и кавказского регионов, за исключением максимума интенсивности в летние месяцы, обусловленного различием географического местоположения точек наблюдений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (субсидия № 075-ГЗ/Ц3569/278). Результаты получены на базе наблюдений, проводимых с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» [<http://ckprf.ru/ckp/3056>].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Подлесный С.В., Девятова Е.В., Саункин А.В., Васильев Р.В. Сопоставление методов определения облачного покрова над Байкальской природной территорией в декабре 2020 г. // Солнечно-земная физика. 2022. Т. 8, № 4. С. 102–109. DOI 10.12737/szf-84202210.
 Фишкова Л.М. Ночное излучение среднениротной верхней атмосферы Земли. Тбилиси: МЕЦНИЕРЕБА, 1983. 271 с.

ПРОЯВЛЕНИЕ ИОНОСФЕРНОГО АЛЬВЕНОВСКОГО РЕЗОНАТОРА В НАЗЕМНЫХ И СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЯХ

Д.Д. Позднякова

Институт физики Земли Российской академии наук, Москва, Россия,
d_pozdnyakova@live.ru

MANIFESTATION OF THE IONOSPHERIC ALFVÉN RESONATOR IN GROUND-BASED AND SATELLITE OBSERVATIONS

D.D. Pozdnyakova

Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Аннотация. Многополосные спектры ночных электромагнитных шумов в диапазоне первых Гц принято ассоциировать с откликом ионосферного альвеновского резонатора (ИАР) на излучения от молниевых разрядов. Можно, однако, показать, что для получения такой резонансной спектральной структуры (РСС) не нужен набор резонансных мод, а достаточно отражающей границы. При отражении альвеновского импульса от верхней ионосферы наземная станция регистрирует два последовательных импульса, разделенных на время прохождения через ионосферу до точки отражения и обратно. При спектральном анализе наличие пар связанных импульсов проявится как возникновение спектральных гармоник, разнесенных на обратное время пробега. Эта концепция подтвердилась при анализе как тестовых сигналов, так и данных индукционных магнитометров. Хотя на наземных станциях РСС наблюдается почти каждую ночь, сообщений о регистрации таких структур на низкоорбитальных спутниках практически нет. Сформулированы качественные представления, как импульсная структура отклика на грозовой разряд должна быть видна в данных спутника. Моделирование распространения импульсов в кусочно-слоистой ионосфере показало, что спектральные характеристики ИАР должны быть заметны только на земле, а внутри ИАР возникает более сложная спектральная картина. Апробация этих представлений ведется по данным спутника CSES.

Ключевые слова: молния, пульсации Pc1, ионосфера, альвеновский резонатор, резонансная спектральная структура.

Abstract. The spectra of electromagnetic noise observed at night in the range of the first Hz with a characteristic periodic spectral structure are usually associated with the response of the ionospheric Alfvén resonator (IAR) to radiation from lightning discharges. However, it can be shown that to obtain such a resonant spectral structure, a set of resonant modes is not needed, while a reflecting boundary is sufficient. When an Alfvén pulse is reflected from the upper ionosphere, the ground station registers two consecutive pulses divided by the time that the pulse passes through the ionosphere to the reflection point and back. In spectral analysis, the presence of pairs of coupled pulses will manifest itself as the occurrence of spectral harmonics spaced by the reverse travel time. To test this concept, we analyzed both test signals and data from ground-based induction magnetometers. Surprisingly, although the RSS is observed at ground stations for many hours every night, there are practically no reports of signs of IAR from space missions. Qualitative representations of how such a structure should be visible in the data of a low-orbit satellite are formulated. Modeling of the propagation of Alfvén pulses in a piecewise layered ionosphere showed that the spectral characteristics of the IAR should be noticeable only on Earth, and inside the IAR, the superposition of pulses propagating up and down creates a more complex spectral picture. The proposed concept makes it possible to understand why IAR structures should be less noticeable in the ionosphere than on Earth.

Keywords: lightning, Pc1 pulsations, ionosphere, Alfvén resonator, resonant spectral structure.

ВВЕДЕНИЕ: РЕЗОНАНСНЫЕ СТРУКТУРЫ В ОКОЛОЗЕМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Природные резонаторы для естественных э/м волн играют важную роль в космической геофизике — магнитосферный альвеновский резонатор, Шумановский резонанс (ШР), ионосферный альвеновский резонатор (ИАР). Они приводят к формированию квазипериодических излучений, способствуют накоплению волновой энергии в некоторых областях пространства, а формируемые ими гармонические излучения используются для дистанционной диагностики параметров магнитосферы и ионосферы. Особенностью вариаций геомагнитного поля в диапазоне ниже основного тона ШР (~8 Гц) является возникновение резонансной спектральной структуры (РСС), которую принято связывать с ИАР. Нижняя границей ИАР является E-слой ионосферы, тогда как верхняя граница образуется на высоте нескольких тысяч км из-за частичного отражения альвеновских волн от резкого градиента

вертикального профиля альвеновской скорости. Механизм возбуждения ИАР связывается с грозowymi разрядами.

Обычно неявно предполагается, что РСС обусловлена тем, что ИАР заполнен запертыми стоячими колебаниями между точками отражения. Однако кажется удивительным, что короткий импульс грозового разряда способен раскачать ионосферную резонансную систему. Возможно механизм формирования РСС не связан с возбуждением набора колебаний в ИАР, а обусловлен импульсной структурой э/м возмущений во время грозовой активности. Для проверки этой концепции мы провели анализ как тестовых сигналов, так и данных регистрации э/м шумов на станциях сети PWING.

ФОРМИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОЙ СТРУКТУРЫ

Возможная схема возбуждения ИАР грозовым разрядом следующая (рис. 1). Разряд молнии возбуждает начальный импульс, который

распространяется в атмосфере и практически мгновенно достигает места наблюдения. При этом первоначальный импульс частично проникает в ионосферу, распространяется вверх как альвеновский импульс, отражается от верхней границы ИАР, и возвращается обратно на землю в виде эхо-импульса. Задержка между эхом и первичным импульсом равна времени его распространения вверх и вниз в ионосфере, т.е. основному периоду ИАР.

Для апробации описанных представлений использованы данные индукционного магнитометра сети RWING с частотой дискретизации 64 Гц. Чтобы выделить парные импульсы во временном ряду, алгоритм метода наложенных эпох (МНЭ) отбирает на часовом интервале сильные импульсы, момент которых принимается за реперную точку, и усредняет все участки магнитограммы вблизи реперной точки. МНЭ анализ показывает усредненную форму импульсного фона: за основным импульсом следует вторичный импульс другой полярности. Последовательность спектров мощности и МНЭ-кривых (рис. 2) показывает, что за основным импульсом следует вторичный задержкой ≈ 1 с. Серия парных импульсов приводит к многополосной структуре со спектральными пиками при $f \sim 1.5, 2.5, \dots$ Гц. Сдвиг частоты между спектральными линиями ≈ 1 Гц соответствует обратной задержке между импульсами $\approx 1/\approx 1$.

МОДЕЛЬНЫЕ СИГНАЛЫ

Для тестирования возможных механизмов образования РСС рассмотрены 2 импульса, разнесенные по времени на $\approx t$. Набор получаемых спектральных максимумов можно использовать для диагностики граничных условий мод резонатора. Решение задачи о колебаниях однородной струны длиной L с закрепленным и свободным концами при $z=0$ и $z=L$ показывает, что в случае симметричных граничных условий $E(z=0)=E(z=L)=0$ для закрепленной струны, получается набор частот $\omega_n = \omega_A n$ ($n = 1, 2, 3, \dots$), где $\omega_A = V_A/L$ - собственная частота ИАР. Отношение частот гармоник и основной моды будет $\omega_n/\omega_1 = 2, 3, 4, \dots$. При асимметричных граничных условиях: $E(z=0) = 0$ и $\partial_z E(z=L) = 0$ (колебания струны с закрепленным и свободным концами) получается $\omega_n = \omega_A(n + 1/2)$ ($n = 0, 1, 2, \dots$). В этом случае отношение частот гармоник и основной моды составит $\omega_n/\omega_1 = 3, 5, 7, \dots$. Для однополярных импульсов спектральные максимумы должны наблюдаться на частотах $\omega_n = n\omega_A$ целых гармоник, а для разнополярных импульсов - на полуволновых (четверть-волновых) гармониках $\omega_n = (n + 1/2)\omega_A$. В обоих случаях частотный сдвиг между гармониками $\Delta\omega = \omega_{n+1} - \omega_n = \omega_A$. Анализ наблюдаемых отношений спектральных гармоник РСС показал преобладание значений 3, 5, 7.

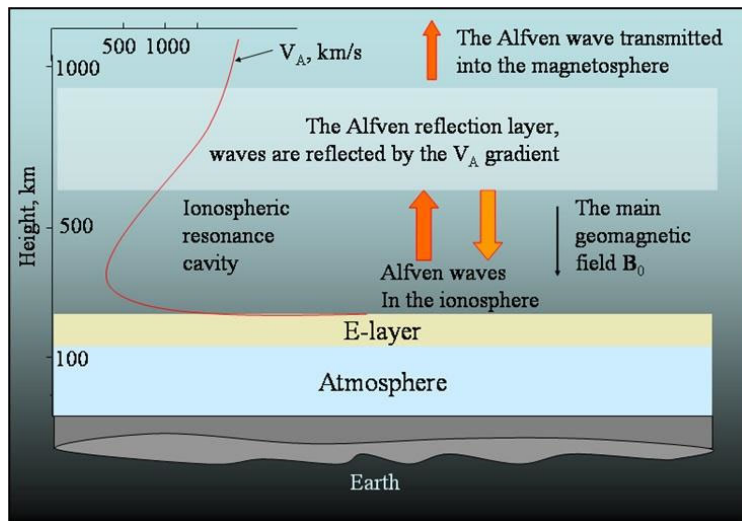


Рис. 1. Возможная схема возбуждения ИАР грозвым разрядом

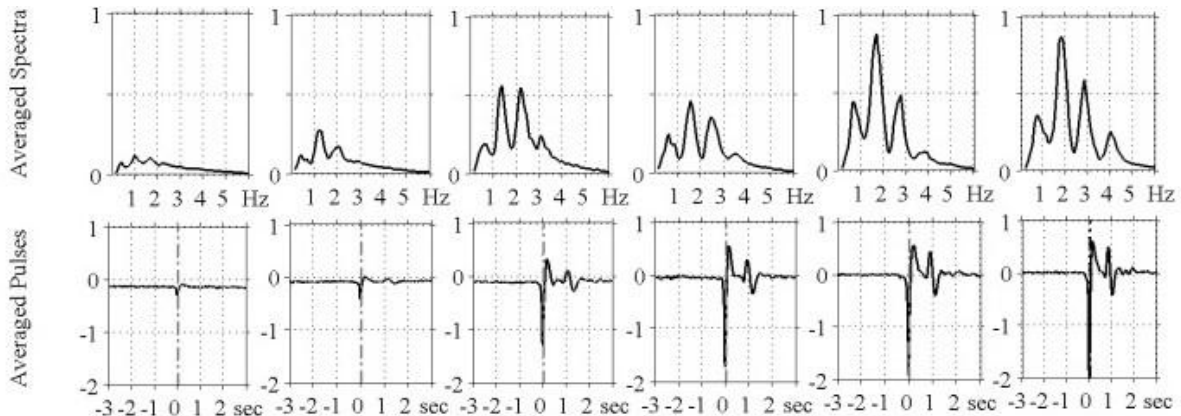


Рис. 2. Последовательность спектров мощности и МНЭ-кривых

ИАР В ИОНОСФЕРЕ: МОДЕЛИРОВАНИЕ И НАБЛЮДЕНИЯ НА СПУТНИКЕ

Удивительно, что при обширных наземных наблюдениях РСС, практически не проводилось поиска этой структуры по спутниковым данным. Датчик электрического поля микроспутника «Чибис-М» (450 км) выявил лишь несколько событий с признаками ИАР (рис. 3а).

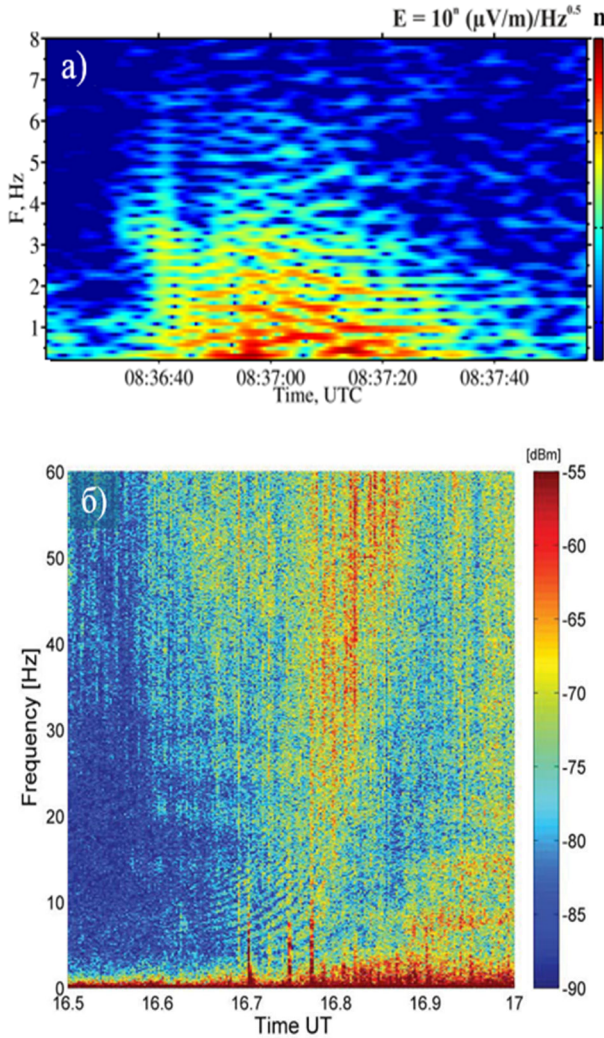


Рис. 3. События с признаками ИАР, зарегистрированные датчиком микроспутника «Чибис-М» (а) и антеннами спутника C/NOFS (б)

Высокочувствительные измерения электрического поля с помощью 12-метровых антенн спутника C/NOFS (400-850 км) выявили редкие кратковременные структуры, напоминающие отпечаток пальца (рис. 3б). Однако частоты этих структур оказались в несколько раз больше, чем предсказания модели ИАР, что потребовало бы предположения о необычно низкой плотности плазмы в верхней ионосфере. Ни C/NOFS, ни Chibis-M, не обнаружили никаких свидетельств непрерывной волновой активности в диапазоне ИАР.

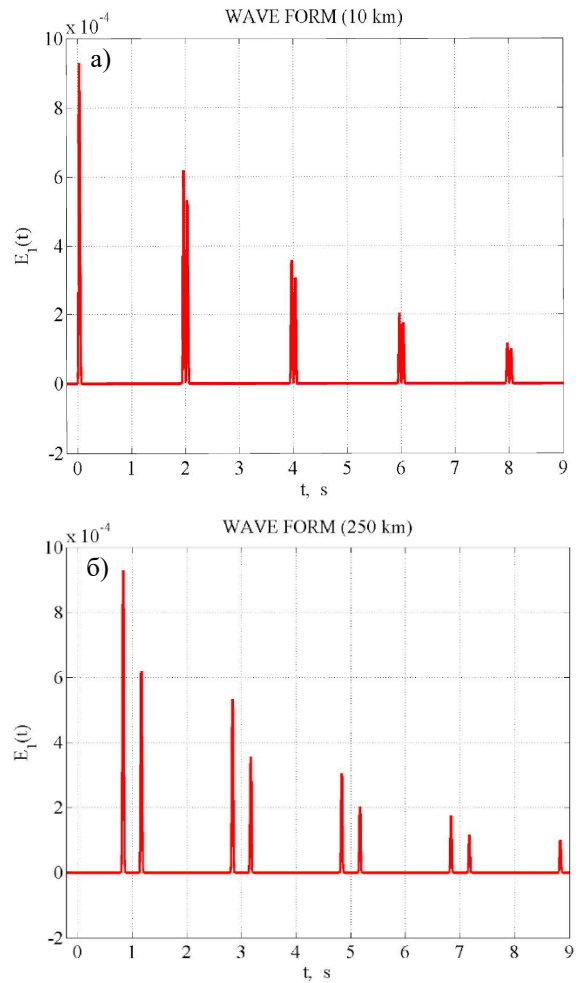


Рис. 4. Возбужденный и отраженный импульсы, смоделированные для высот космического аппарата 10 км (а) и 250 км (б)

Мы смоделировали ожидаемые формы сигналов и спектров на разных высотах на основе концепции импульсного возбуждения ИАР. Импульс, возбужденный на нижней границе, распространяется вверх и в момент $t = |_{\Lambda}$ достигает полупрозрачной верхней границы на высоте $z = h_{\Lambda}$, частично просачивается в магнитосферу и частично отражается назад как от изолятора (рис. 4). Космический аппарат, находящийся внутри ИАР на высоте h_S , сначала обнаружит распространяющийся вверх импульс, а нисходящий импульс — через время $|_{S} \sim 2(h_{\Lambda} - h_S)/V_{\Lambda}$. Затем импульс отражается от E-слоя (при этом он частично поглощается), снова распространяется вверх, отражается от верхней границы ИАР и т.д. Интервал между последовательно обнаруженными импульсами внутри ИАР меньше времени прохождения альвеновского импульса вверх и вниз по всей ионосфере τ_{Λ} , т.е. $|_{S} < \tau_{\Lambda}$. Спектры отклика ИАР при импульсном возбуждении оказываются разными на высотах выше и ниже верхней границы. Мы ищем эти спектральные особенности в данных электрического поля с низкоорбитального спутника CSES.

ДОЛГОПЕРИОДНЫЕ ВАРИАЦИИ ИНДЕКСОВ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

К.Р. Распов¹, И.К. Едемский^{1,2}

¹Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия, rkrwete@yandex.ru

²Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

LONG-PERIOD VARIATIONS OF SPACE WEATHER INDICES

K.R. Raspopov¹, I.K. Edemsky^{1,2}

¹Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia, rkrwete@yandex.ru

²Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia

Аннотация. В данной работе сделана попытка выделения долгопериодных закономерностей в значениях нескольких ключевых индексов космической погоды по данным базы OMNI. Мы также оцениваем связь частоты пропусков значений индексов с уровнем солнечной активности и предлагаем подход по заполнению таких пропусков.

Ключевые слова: космическая погода, солнечный цикл, геомагнитные индексы, ММП, F10.7, Dst.

Abstract. This paper makes an attempt to identify long-term patterns in the values of several key space weather indices based on data from the OMNI database. We also evaluate the relationship between the frequency of missing index values and the level of solar activity and propose an approach to filling such gaps.

Keywords: space weather, solar cycle, geomagnetic indices, IMF, F10.7, Dst.

Концепция космической погоды охватывает множество явлений, происходящих в околоземном пространстве (ОКП) и оказывающих влияние на нашу планету. Одним из ключевых индикаторов солнечной активности можно считать индекс радиочастотного излучения F10.7, измеряющий поток солнечного излучения на частоте 2800 МГц. По уровню F10.7 вполне однозначно выделяются максимумы и минимумы солнечной активности, сменяющиеся циклически. Активное Солнце чаще и интенсивнее возмущает магнитосферу земли во время вспышек и корональных выбросов массы. Развитие этих процессов отслеживают по таким параметрам солнечного ветра как скорость V_{sw} , плотность D_{sw} и температура T_{sw} . Кроме того, направление вектора межпланетного магнитного поля (ММП) B , особенно его компонент B_y и B_z , является определяющим в вопросе возникновения и развития магнитных бурь. Процессы в магнитосфере и ионосфере во время магнитных бурь в достаточной мере характеризуются значениями индексов аврального электроджета (AE, AL, AU), кольцевого тока Dst, планетарных индексов возмущения геомагнитного поля Kp и Ap.

Величины индексов космической погоды удобно получать из базы данных OMNI (Operational and Modernized National Institute), содержащей разноплановые данные, полученные как с наземных станций, так и со спутников, таких как: Advanced Composition Explorer (измеряет свойства солнечного ветра и состав космических частиц), Deep Space Climate Observatory (предоставляет данные о солнечном ветре и магнитном поле), Solar and Heliospheric Observatory (изучает Солнце и солнечный ветер) [King J.H., Papitashvili]. База содержит данные с 1 января 1970 г., позволяя таким образом

исследовать динамику индексов ОКП за период с 20-го по текущий 25-ый солнечный циклы. В настоящей работе мы пользовались библиотекой PySpaceweather [URL: <https://github.com/st-bender/pyspaceweather>] для языка Python, облегчающей получение данных из OMNI.

Вся космическая погода подчинена активности Солнца, уровень которой имеет известную цикличность. Наиболее значительными следует считать 11-летний (22-летний) и 27-дневный циклы, связанные с процессами на Солнце, и годовой, и полугодовой, определяемые положением Земли [Adriane Marques de Souza Franco et al., 2021]. Существуют и более длинные периоды активности Солнца, вызвавшие, например, минимум Маундера, однако в настоящей работе мы опирались на базу OMNI и рассматривали данные только за период 1970–2024 гг.

27-дневный цикл обусловлен ротацией Солнца и повторяющимися структурами на его поверхности, такими как активные области. Этот цикл особенно заметен в индикаторах солнечного ветра и компонент межпланетного магнитного поля, которые показывают периодические изменения каждые 27 дней.

Каждые полгода наблюдаются вариации в геомагнитной активности, которые могут быть связаны с эффектами, такими как внеэкваториальное перемещение магнитного экватора Земли. Полугодовой цикл влияет на индексы, связанные с полярным сиянием и радиационными поясами.

Годовой цикл обусловлен влиянием геометрии Земной орбиты на уровни солнечной активности и показатели космической погоды, такие как Kp и Dst индексы. Годовой цикл может отражать сезонные изменения в геомагнитной активности из-за вариаций в ориентации магнитного поля Земли и интенсивности солнечного излучения.

11-летний цикл (цикл Швабе-Вольфа) — это период солнечной активности, характеризуемый увеличением и уменьшением числа солнечных пятен. 11-летний цикл является наиболее известным и исследованным циклом, который оказывает значительное влияние на многие параметры космической погоды, включая индекс F10.7, солнечный ветер и геомагнитную активность.

22-летний цикл (магнитный цикл Хейла) состоит из двух 11-летних циклов, во время которых магнитное поле Солнца меняет свою полярность. Этот цикл особенно важен для понимания изменений в межпланетном магнитном поле и солнечном ветре.

В ходе этой работы мы оцениваем, насколько эти циклы сказываются на значениях различных индексов, и пробуем определить циклические закономерности изменения индексов. Исходя из того, что пропуски значений индексов вызваны аппаратными проблемами, которые также могут быть связаны с активностью Солнца, мы анализируем наличие закономерностей в пропусках данных. Так наиболее часто оказываются недоступными значения компонент ММП: Tsw.

Число пропущенных значений для различных индексов распределилось по циклам активности следующим образом в таблице 1.

Таблица 1.

Количество пропущенных значений для индексов.

Период\ Индекс	F107	Vsw	Dsw	Tsw	Bz
1976.1.1 – 1986.1.1	1	28495	29550	42368	30456
1986.1.1 – 1996.1.1	1	46916	46916	46916	46043
1996.1.1 – 2009.1.1	7	456	4367	4458	270
2009.1.1 – 2020.1.1	3	15	759	279	33

В работе мы также предлагаем метод восстановления пропущенных значений компонент ММП по известным данным Vsw, Dsw, Tsw, F107 и Dst.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

King J.H., Papitashvili N.E. Solar wind spatial scales in and comparisons of hourly Wind and ACE plasma and magnetic field data // J. Geophys. Res. 2005. V. 110, N A2. A02209.

Adriane Marques de Souza Franco, Rajkumar Hajra, Ezequiel Echer, and Mauricio José Alves Bolzan Seasonal features of geomagnetic activity: a study on the solar activity dependence // European Geosciences, 2021. URL: <https://angeo.copernicus.org/articles/39/929/2021/> (дата обращения: 31.05.24)

СВОДНЫЕ ИТОГИ ПО ПРОГРАММЕ СУРА-SWARM, ПРОВЕДЁННОЙ В 2016–2022 ГОДАХ

А.О. Рябов

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия,
RyabovAIOI@yandex.ru

SUMMARY RESULTS OF THE SURA-SWARM PROGRAM CONDUCTED IN 2016–2022

A.O. Ryabov

N.I. Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia,
RyabovAIOI@yandex.ru

Аннотация. В 2016–2022 гг. было проведено около 150 сеансов по программе СУРА-SWARM. Данные исследования касались изучения возбуждения турбулентности ионосферы при воздействии на неё мощным коротковолновым радиоизлучением стенда СУРА и позволили определить характерные значения данных возмущений и условия их возникновения.

Ключевые слова: ионосфера, искусственные ионосферные неоднородности.

Abstract. In 2016–2022, about 150 sessions were conducted under the SURA-SWARM program. These studies concerned the study of the turbulence excitation in the ionosphere when exposed to powerful short-wave radio emission from the SURA stand and made it possible to determine the characteristic values of these disturbances and the conditions for their occurrence.

Keywords: ionosphere, artificial ionospheric irregularities.

ВВЕДЕНИЕ

Натурные эксперименты являются одним из актуальных способов изучения плазменных явлений в ионосфере [Фролов, 2017; Рябов, 2018]. Существует много способов исследования верхней ионосферы Земли: метод вертикального зондирования сигналами ионосферных станций, метод пробных волн, ракурсное рассеяние радиоволн короткого и ультракороткого диапазонов, зондирование возмущённой области (ВО) ионосферы сигналами искусственных спутников Земли (ИСЗ) и другие. Ещё одним эффективным методом исследования является использование ИСЗ, предназначенных для научных целей [Рябов, 2017; Рябов, 2019]. Наиболее интересны эксперименты, в рамках которых проводится стимуляция ионосферы радиокомплексами, расположенными на Земле. Главными инструментами для исследования данных явлений представляются значения плотности N_c и температуры электронов T_e . Наиболее продуктивным случаем использования бортовой аппаратуры для изучения особенностей верхней ионосферы является серия кампаний СУРА-DEMETER, проведённых в 2005–2010 гг. [Фролов и др., 2019; Фролов и др., 2020].

УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Группировка спутников серии SWARM, состоящая из трёх идентичных аппаратов, была выведена на орбиту 22 ноября 2013 года. Спутники имеют низкие круговые орбиты, лежащие в меридиональной плоскости. При этом два спутника (А и С) летают на высоте около 450 км параллельно друг другу на расстоянии до 500 км. Третий спутник (В) летает в другой меридиональной плоскости на высоте 500 км. Используемый в наших экспериментах по модификации ионосферы мощными короткими радиоволнами нагревный стенд «Сура» расположен вблизи р/п Васильсурск в 120 км к востоку от

г. Нижнего Новгорода (координаты стенда: $56,15^\circ$ с. ш., $46,1^\circ$ в. д.). Эффективная мощность излучения стенда в режиме синхронного излучения всех трёх его модулей с максимальной мощностью составляет $P_{\text{eff}} \approx 80$ МВт на частоте излучения $f_0 \approx 4,3$ МГц, увеличиваясь с ростом f_0 до $P_{\text{eff}} \approx 180$ МВт для $f_0 \approx 6,5$ МГц. В рассматриваемых ниже экспериментах стенд излучал мощные радиоволны с диаграммой направленности излучения волны накачки на 14° на юг, чтобы усилить генерацию искусственной ионосферной турбулентности за счёт эффекта «магнитного зенита». В выполняемых на стенде «Сура» экспериментах излучение волны накачки начиналось, как правило, за 16 мин до пролёта спутника через возмущённую магнитную силовую трубку. Кроме того, важно отметить, что также проводились сеансы по обнаружению возмущения ионосферы в магнитосопрежённой области (МСО): для таких экспериментов нагрев должен был длиться примерно 40–45 мин.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЁННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

За годы кампаний было проведено около 150 сеансов по программе СУРА-SWARM. Большое количество проведённых сеансов позволило получить необходимый опыт по оптимизации проводимых экспериментов с целью достижения наилучших результатов. Таким образом, было определено, что плазма верхней ионосферы под воздействием коротковолнового возмущения становится заметно турбулизованной при выполнении следующих условий [Фролов и др., 2016].

1. Эксперименты должны проводиться в вечерние и ночные часы.

Причины, почему днём практически не наблюдается возбуждение неоднородностей плазмы в следующем: D - и E -слои ионосферы днём значительно больше, из-за чего меньше мощности доходит до высоты отражения; на высоте области F_1 -слоя

возможно возникновение дефокусирующей линзы, что опять же приводит к уменьшению мощности; днём высота отражения волны накачки от F_2 -слоя ниже — что приводит к увеличению доли нейтральных частиц, которые негативно влияют на вероятность возбуждения турбулентности.

2. Высота отражения волны накачки h должна быть выше 200 км.

Это условие объясняется, как уже было отмечено выше, негативной ролью нейтральных частиц. Напомним, что примерно каждые 8 километров вниз число нейтралов увеличивается в e раз.

3. Волна накачки должна быть O -поляризации.

Это связано с тем, что волны X -поляризации не участвуют в резонансном взаимодействии радиоволны с плазмой (в нашем случае волны накачки с плазмой), поскольку они отражаются от ионосферы ниже уровня плазменных резонансов. Их воздействие на ионосферу ограничивается омикеским нагревом плазмы, развитием самофокусирующей неустойчивости и генерацией искусственных периодических неоднородностей (ИПН) в поле стоячей волны, образованной падающей на ионосферу и отражённой от нее волнами.

4. Частота волны накачки $f_{ВН}$ должна быть меньше критической частоты F_2 -слоя f_{0F2} .

Несмотря на очевидность этого пункта, стоит отметить, что были (хоть и редкие) случаи исключения. Это объясняется тем, что при некоторых условиях частота верхнегибридного резонанса $f_{ВГР}$ остаётся меньше f_{0F2} , и при этом, хотя и на меньшем уровне, продолжается развитие тепловой

параметрической неустойчивости, особенно в условиях уже сильно развитой искусственной ионосферной турбулентности (ИИТ).

5. Эффективная мощность волны накачки $P_{эф} \geq 50$ МВт.

Особенно заметно важность этого условия проявилось в годы не самой эффективной работы стенда (2019–2020 гг. — до ремонта).

Ещё одним важным условием был относительно близкий пролёт спутника от центра возмущённой области (не далее 50 км). Но это условие правильно назвать лишь условием обнаружения искусственных ионосферных неоднородностей (ИИН), а не условием турбулизации ионосферы.

Здесь важно отметить, что условия турбулизации были идентичными и для северного, и для южного полушария. Единственной разницей стала большая требовательность по мощности для сеансов пролёта спутников над МСО.

Кроме того, необходимо уточнить, что под турбулизацией верхней ионосферы в этих экспериментах подразумевается наличие крупномасштабных ИИН, которые выражаются в заметном изменении концентрации и температуры электронов в возмущённой области и в увеличении вариаций этих характеристик. На первом рисунке ниже приведён характерный пример сеанса пролёта ИСЗ над стендом «Сура», на втором – сеанс пролёта над МСО.

Проведённые сеансы позволили сформулировать выводы, которые будут изложены ниже в заключении.

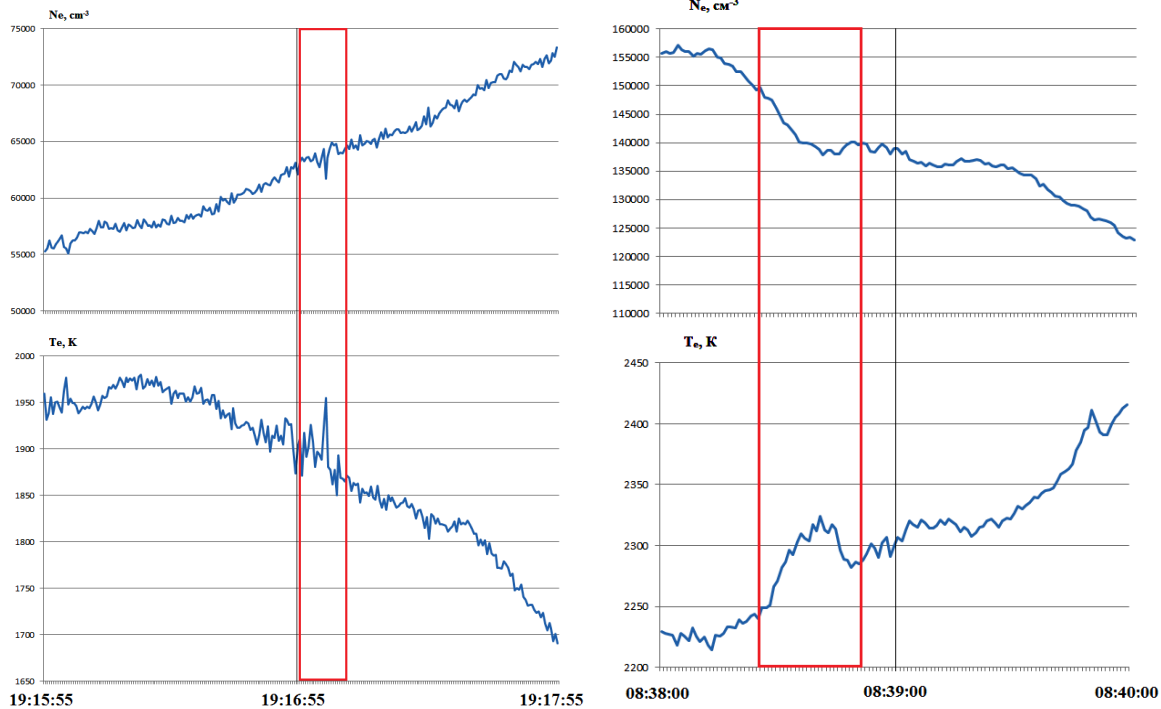


Рис. 1. Характерные сеансы возмущения верхней ионосферы под воздействием коротковолнового излучения стенда «Сура». Слева представлен сеанс пролёта в северном полушарии 25 апреля 2016 г., справа — пролёт спутника SWARM в южном полушарии 17 сентября 2018 г. Красным прямоугольником обозначены области, в которых наблюдаются ИИН. Вертикальными линиями обозначаются центры возмущённых областей

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На высотах ~ 500 км вариации плотности и температуры плазмы обнаруживаются на расстояниях до 200 км вдоль орбиты ИСЗ, что в 2–3 раза превышает как горизонтальные размеры центральной части ВО ионосферы на уровне отражения ВН, где наблюдается развитие наиболее интенсивной ИИТ и наиболее сильный разогрев плазмы, так и размеры дактов, генерируемых на высотах ~ 660 км. Отмечается, что, как и в случае развития ИИТ, на генерацию искусственных плазменных возмущений, регистрируемых на высотах ~ 500 км, сильное влияние производит эффект «магнитного зенита».

В области высот 450–500 км наблюдается средний рост температуры электронов на величину 3–10 % и сильные флуктуации её значений (2–8 %). Сравнивая результаты измерений, полученных с помощью SWARM и DEMETER, можно заключить, что величина вариаций T_e с ростом высоты уменьшается.

На высотах 450–500 км с точностью до 1 % не было обнаружено характерного для дактов увеличения плотности плазмы с размерами ~ 100 км поперёк линий геомагнитного поля, характерных для дактов, которые регистрировались на высотах ~ 660 км в экспериментах с ИСЗ DEMETER. При этом было установлено, что должны выполняться одни и те же условия для появления плазменных возмущений на высотах ~ 500 км и формирования дактов плотности плазмы на высотах ~ 660 км.

Работа выполнена по проекту № FSWR-2023-0038 в рамках базовой части Государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Фролов В.Л. Искусственная турбулентность среднеширотной ионосферы / Монография. Нижний Новгород: Издательство ННГУ. 2017. 468 с.

Рябов А.О. Определение ионного состава внешней ионосферы на основе характеристик КНЧ-СНЧ-волн, регистрируемых во время работы стенда «СУРА» // Физика плазмы. 2018. Т. 44, № 11. С. 916–921.

Рябов А.О. Поляризационные характеристики КНЧ/СНЧ-волн, наблюдаемых во внешней ионосфере при воздействии мощным наземным КВ-радиоизлучением / Тезисы докладов XV Международной Байкальской молодежной научной школы по фундаментальной физике, 2017. С. 92.

Рябов А.О., Фролов В.Л. Связь между потенциалом искусственного спутника Земли и температурой электронов в верхней ионосфере // Изв. вузов. Радиофизика. 2019. Т. 62, № 10. С. 736–746.

Фролов В.Л., Акчурин А.Д., Болотин И.А. и др. Высыпания энергичных электронов из радиационного пояса Земли, стимулированные модификацией среднеширотной ионосферы мощными короткими радиоволнами // Изв. вузов. Радиофизика. 2019. Т. 62, № 9. С. 641–663.

Фролов В.Л., Рябов А.О., Акчурин А.Д. Искусственные высыпания энергичных электронов в магнитосопреженной относительно стенда «Сура» области ионосферы // Изв. вузов. Радиофизика. 2020. Т. 63, № 4. С. 285–296.

Фролов В.Л. и др. Характеристики электромагнитных и плазменных возмущений, индуцируемых на высотах внешней ионосферы Земли при модификации F2-области мощным КВ радиоизлучением стенда СУРА // Изв. вузов. Радиофизика. 2016. Т. 59, № 3. С. 198–222.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВНЕЗАПНЫХ СТРАТОСФЕРНЫХ ПОТЕПЛЕНИЙ НА ВАРИАЦИИ ЭМИССИОННОГО СЛОЯ 557.7 НМ НАД ОБСЕРВАТОРИЯМИ МАЙМАГА И ТОРЫ

А.В. Саункин¹, О.С. Зоркальцева¹, Р.В. Васильев¹, Г.А. Гаврильева²

¹Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия, saunkin@iszf.irk.ru

²Институт космофизических исследований и аэронавтики Сибирского отделения Российской академии наук, Якутск, Россия

STUDY OF THE INFLUENCE OF SUDDEN STRATOSPHERIC WARMINGS ON VARIATIONS OF THE 557.7 NM EMISSION LAYER OVER THE MAIMAGA AND TORY OBSERVATORIES

A.V. Saunkin¹, O.S. Zorkaltseva¹, R.V. Vasilyev¹, G.A. Gavriilyeva²

¹Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, saunkin@iszf.irk.ru

²Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia

Аннотация. В данной работе представлены результаты исследования влияния эффектов внезапных стратосферных потеплений (ВСП) на интенсивность атмосферной эмиссии 557.7 нм (I557.7) и температуру в области мезосферы и нижней термосферы по наземным и спутниковым данным. В качестве наземных инструментов используются данные, полученные инфракрасным спектрографом на оптической станции Маймага (63° с.ш., 129.5° в.д.) с 2003 по 2021 гг. и интерферометром Фабри-Перо, расположенным в геофизической обсерватории п. Торы (52° с.ш., 103° в.д.) с 2017 по 2023 гг. В качестве спутниковых данных использовались наблюдения радиометром SABER на платформе TIMED. По наземным данным были построены композитные графики вариаций температуры, усредненные относительно реперной даты в момент максимума ВСП в диапазоне +/-15 дней. Однако эффект ВСП на данных графиках оказался незначительным. Далее по данным SABER аналогичным способом были исследованы вариации I557.7 и температуры над выбранными обсерваториями в диапазоне высот от 40 до 110 км. Развертка по высоте позволила выявить значимый эффект влияния ВСП на среднюю и верхнюю атмосферу над станциями Маймага и Торы. В работе обсуждаются эффекты ВСП и возможные механизмы вертикальных связей в атмосфере.

Ключевые слова: SABER, I557.7, ВСП, температура атмосферы.

Abstract. This paper presents the results of a study of the influence of sudden stratospheric warming (SSW) effects on the intensity of the atmospheric 557.7 nm (I557.7) emission and temperature in the mesosphere and lower thermosphere according to ground-based and satellite data. Data obtained by an infrared spectrograph at the Maimaga optical station (63°N, 129.5°E) from 2003 to 2021 are used as ground-based instruments and the Fabry-Pérot interferometer located at the Geophysical observatory of Tory (52° N, 103° E) from 2017 to 2023. Observations by the SABER radiometer on the TIMED platform were used as satellite data. Based on ground-based data, composite graphs of temperature variations were constructed, averaged relative to the reference date at the time of the SSW maximum in the range of +/-15 days. However, the effect of SSW on these graphs turned out to be insignificant. Next, using SABER data, variations in I557.7 and temperature over selected observatories in the altitude range from 40 to 110 km were studied in a similar way. The vertical sweep made it possible to identify a significant effect of the influence of SSW on the middle and upper atmosphere above the station Maimaga and Tory. The work discusses the effects of SSWs and possible mechanisms of vertical connections in the atmosphere.

Keywords: SABER, I557.7, SSW, atmospheric temperature.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время накоплено немало свидетельств тому, что динамические процессы в различных слоях атмосферы связаны друг с другом. Основным механизмом связи является вертикальное распространение атмосферных волн различных временных и пространственных масштабов. Основная роль атмосферных волн — перенос энергии и импульса от нижних слоев атмосферы к вышележащим слоям. Во время диссипации в средней и верхней атмосфере волны передают свою энергию и импульс, тем самым влияя на тепловой баланс и циркуляцию средней и верхней атмосферы. Следовательно, распространение и диссипация атмосферных волн является одним из основных механизмов, ответственных за энергетическое и динамическое взаимодействие между нижней, средней и верхней атмосферой [Andrews et al., 1987]. Мезосфера-нижняя термосфера (МНТ)

определяется как область атмосферы на высоте от 60 до 110 км. МНТ составляет верхнюю часть того, что часто называют средней атмосферой (от 10 до 110 км) [Yigit, Medvedev, 2015]. Наблюдения показывают, что наиболее тесная взаимосвязь между нижними и верхними слоями атмосферы существует зимой и ранней весной [Vincent, 2015]. Вертикальное взаимодействие между слоями атмосферы особенно очевидно во время внезапных стратосферных потеплений (ВСП) [Dowdy et al., 2007] [Jacobi et al., 2009]. Основным признаком всех зимних нарушений циркуляции МНТ, связанных с динамикой стратосферы, является значительное ослабление, а часто и инверсия зонального ветра на несколько дней. Эта особенность особенно хорошо наблюдается на обсерваториях средних широт [Limpasuvan et al., 2016]. В полярных широтах зональная циркуляция менее устойчива, поэтому в отдельные годы отклик на ВСП в

динамике МНТ может выражаться по-разному. Чаще всего зональный ветер меняет направление на восточное, а во время ВСП приливы в МНТ усиливаются [Bhattacharya et al., 2004] [Zorkaltseva, Vasilyev, 2021]. Несмотря на то, что ВСП наблюдаются в полярной стратосфере, реакция фоновых ветров МНТ регистрируется в экваториальных и тропических обсерваториях [Sridharan, 2012]. В [Laskar, Pallamraju, 2014] авторы предлагают убедительную идею о существовании ячейки меридиональной циркуляции в ветрах МНТ во время событий ВСП, которая обеспечивает перенос атомарного кислорода из высоких широт в низкие.

В последнее время в связи с развитием методов исследования верхней атмосферы со спутников, появилась возможность сравнить наземные измерения основных параметров МНТ со спутниковыми измерениями [Lednyts'kyu, 2015] [Saunkin et al., 2022]. В работе [Panka et al., 2018] было показано, что сравнение данных наземных средств измерений в разных точках Земного Шара с данными одного прибора, расположенного на спутнике, может способствовать взаимной калибровке всей мировой сети приборов. С января 2002 г. успешно эксплуатируется спутник с полярной орбитой TIMED, оснащенный комплексом приборов для исследования состояния атмосферы, одним из которых является радиометр SABER. SABER ведет глобальные измерения параметров атмосферы с помощью 10-канального широкополосного инфракрасного радиометра методом сканирования лимба Земли, охватывающего спектральный диапазон от 1.27 до 17 мкм. Эти измерения используются для получения вертикальных профилей кинетической температуры, давления, геопотенциальной высоты, плотности объемных соотношений и интенсивности собственного свечения атмосферы. На примере нескольких лет нами было проведено сравнение данных, полученных по радиометру SABER и данных измерений наземного инструмента — интерферометра Фабри-Перо [Vasilyev et al., 2023]. В работе [Vasilyev et al., 2023] мы показали, что годовой ход интенсивности эмиссии и температуры по спутниковым и наземным данным хорошо согласован, а быстрые (не сезонные) вариации температуры, полученные двумя инструментами, ведут себя в противофазе. Скорее всего, это обусловлено изменением высоты эмиссионного слоя.

В данном исследовании мы фокусируемся на исследовании эффектов ВСП в области МНТ по данным наземных и спутниковых наблюдений.

ДАнные И МЕТОды

В качестве наземных инструментов были использованы данные, полученные инфракрасным спектрографом (ИС) на оптической станции Маймага (63° с.ш., 129.5° в.д.) с 2003 по 2021 гг. и

интерферометром Фабри-Перо (ИФП), расположенным в геофизической обсерватории п. Торы (52° с.ш., 103° в.д.) с 2017 по 2023 гг. В качестве спутниковых данных использовались наблюдения радиометром SABER на платформе TIMED. По наземным данным были построены композитные графики вариаций температуры, усредненные относительно реперной даты в момент максимума ВСП в диапазоне +/-15 дней (т.н. метод наложенных эпох). Случаи ВСП были выбраны на основе таблицы, представленной в работе [Зоркальцева и др., 2023]. По данным SABER аналогичным способом были исследованы вариации I557.7 и температуры над выбранными обсерваториями в диапазоне высот от 40 до 110 км. Спутниковые данные выбирались для ночного времени и в области с радиусом 700 км с центром над местоположением наземных инструментов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рисунках представлены температуры, полученные по данным ИФП и спектрографа во время ВСП. По оси абсцисс отложены дни до и после ВСП, нулевому дню соответствует день максимума ВСП. Цветные тонкие кривые показывают вариации температуры за отдельные годы. Штриховая кривая представляет собой усредненную температуру по всем событиям ВСП.

Из рис. 1 можно заметить, что усредненные эффекты ВСП по данным наземных инструментов незначительны. Над станцией Маймага наблюдается высокая межгодовая дисперсия. Повышенные вариации средней температуры по ИФП обусловлены малой статистикой (с 2017 по 2023 гг., 5 ВСП). Предыдущие исследования эффектов для отдельных событий ВСП над п. Торы показали, что во время мажорных ВСП происходит уменьшение I557.7 по данным ИФП. На рис. 2 построен график аналогичный графикам на рис.1 и содержит усредненную I557.7 по данным ИФП.

Поскольку оптические инструменты позволяют оценивать интегральные параметры эмиссионного слоя, то от вариаций высоты слоя будет существенно зависеть получаемые интегральные температуры, поскольку вертикальные градиенты температуры в области МНТ высокие. Поэтому для корректной оценки вариаций параметров МНТ над обсерваториями необходимо оценивать не только интегральные значения, но и вариации параметров в зависимости от высоты. Для этого были использованы спутниковые данные лимбовых наблюдений, позволяющие оценивать параметры атмосферы, в т.ч. эмиссионного слоя, по высотам. На рис. 3 представлены аномалии температуры над станцией Маймага и ГФО Торы за 2002–2023 гг. во время ВСП по данным SABER/TIMED.

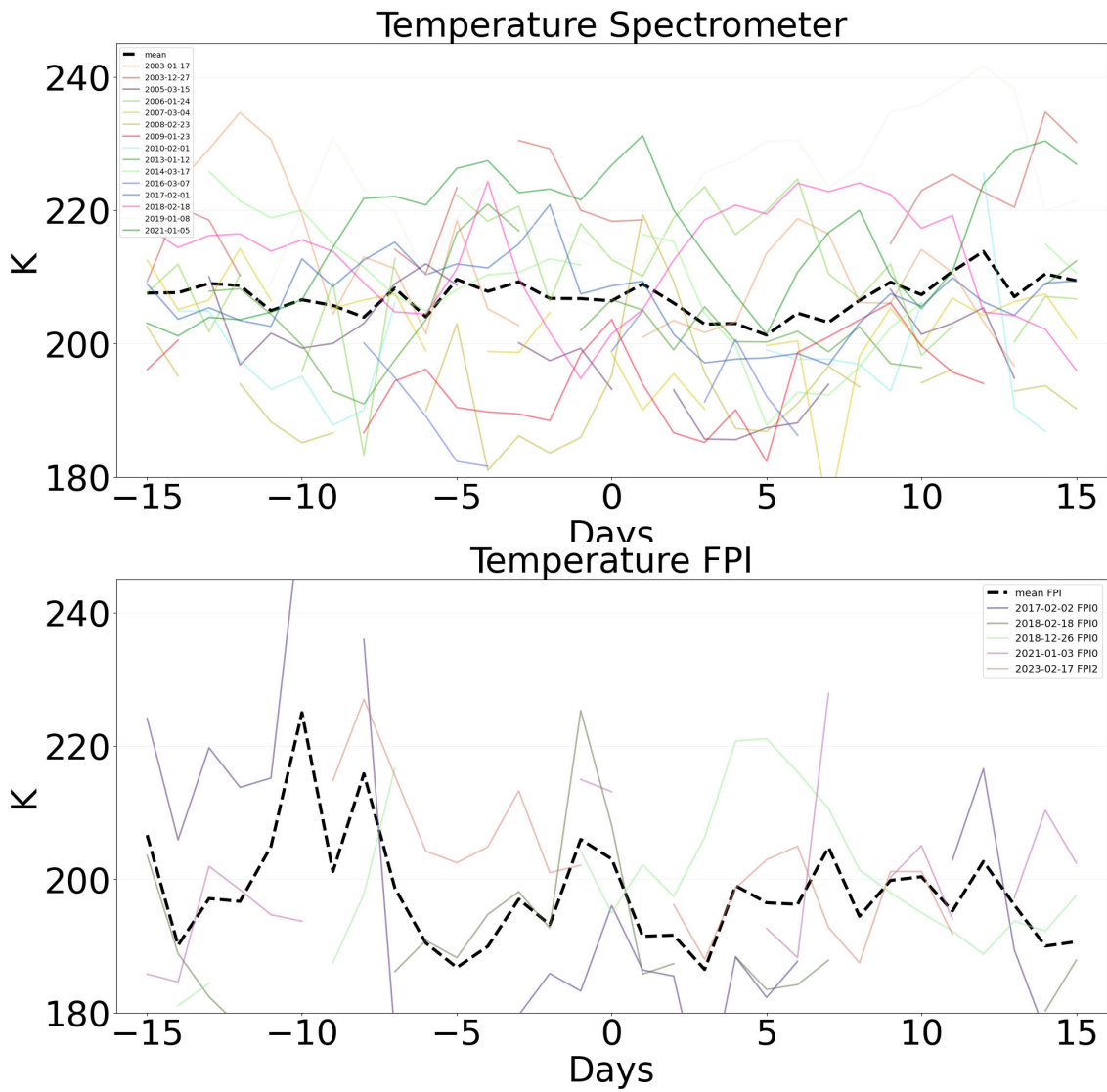


Рис. 1. Графики температуры, полученной по ИС (сверху) с 2003 по 2021 гг. и ИФП (снизу) с 2017 по 2023 гг. Штриховая черная кривая — усредненная температура по годам

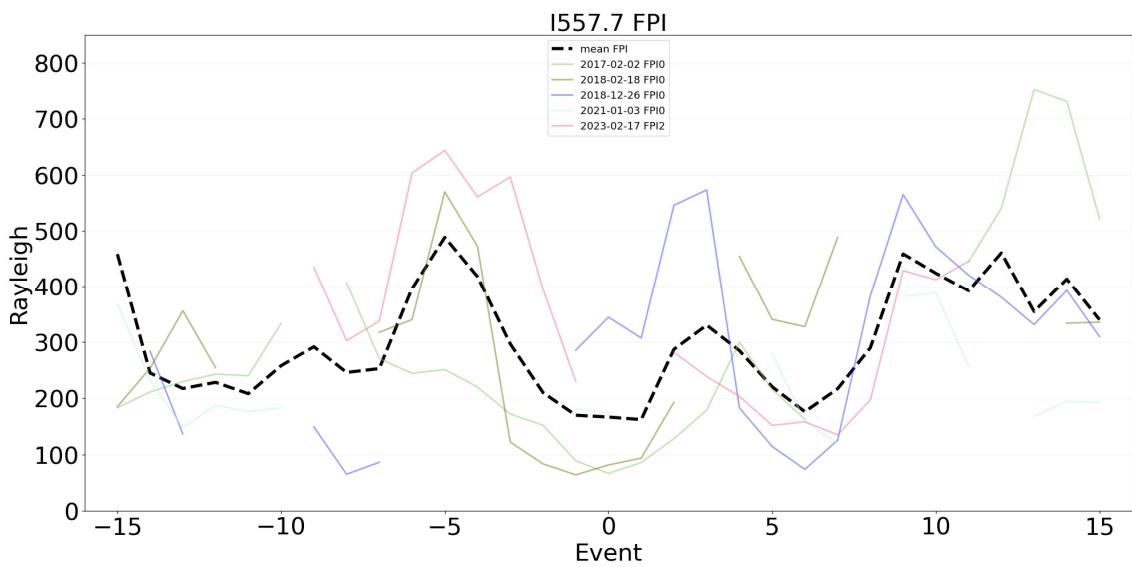


Рис. 2. График I557.7 по данным ИФП с 2017 по 2023 гг. Штриховая черная кривая — усредненная интенсивность по годам

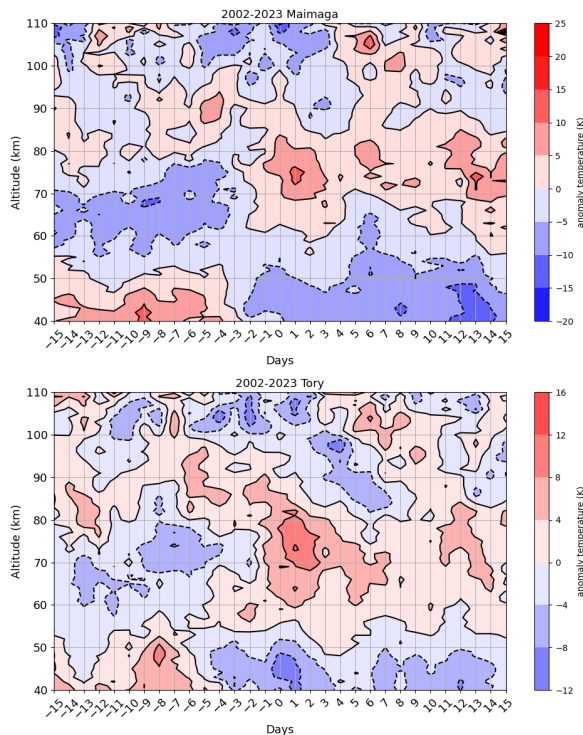


Рис. 3. Средние аномалии температуры над станцией Маймага (сверху), и над ГФО Торы (снизу) за 2002–2023 гг. по данным SABER

На рис. 3 наблюдается схожее поведение аномалий температур над двумя станциями. Видно, что до ВСП на высотах ~40–50 наблюдается повышение температуры, а от ~60–70 км происходит снижение и далее после ВСП на высотах ~40–60 заметно понижается температура (~40–50 над Торы) в то время как на высотах ~60–80 она повышается. Как было отмечено ранее [8], стратосферные потепления часто начинаются над Сибирью, а затем смещаются в северо-восточном направлении к полюсу и вызывают деформацию полярного вихря, которая и фиксируется как ВСП. На рис. 3 видна положительная аномалия температуры в стратосфере над обсерваториями от -15 до -3 дня до мажорного ВСП, при этом в области мезосферы наблюдаются отрицательные аномалии температуры. За 3–5 дней до момента максимального развития ВСП над сибирскими обсерваториями на стратосферных высотах знак температурной аномалии изменяется, что связано с перемещением стратосферного антициклона в более высокие широты. При этом на мезосферных уровнях наблюдаются максимальные температуры. Высоты эмиссионного слоя I557.7 (85–100 км) попадают на границу мезосферы и термосферы, для которых аномалии температуры противоположны по знаку, поэтому наземные наблюдения интегральной температуры слоя I557.7 (рис. 1–2) показывают незначительные эффекты от ВСП. Однако рис. 4 показывает значительные вариации высоты слоя I557.7. Отчетливо видно, что до начала ВСП более высокие значения эмиссии наблюдаются на высотах от 85 до 95 км. За 1–2 дня до максимума ВСП происходит существенное снижение I557.7 на этих высотах, а положительные аномалии

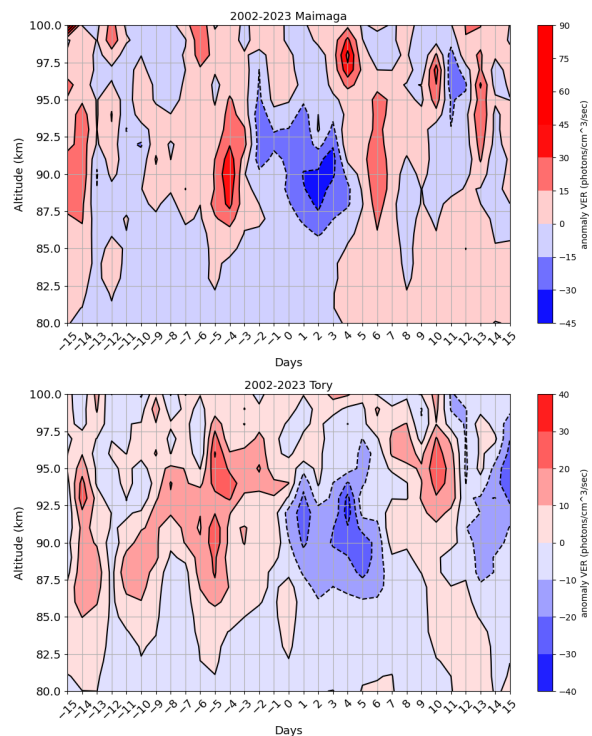


Рис. 4. Аномалия I557.7 над ст. Маймага (сверху), и над ГФО Торы (снизу) за 2002–2023 гг. по данным SABER

наблюдаются выше 95 км. Восстановление эмиссионного слоя происходит примерно в течение недели после ВСП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном исследовании методом наложенных эпох были оценены эффекты внезапных стратосферных потеплений в вариациях интенсивности свечения атомарного кислорода линии 557.7 нм и температуры эмиссионного слоя по данным наземных и спутниковых инструментов над ст. Маймага (63° с.ш., 129.5° в.д.) и п. Торы (52° с.ш., 103° в.д.). Вариации интегральной температуры эмиссионного слоя 557.7 нм по данным наземных инструментов демонстрируют малозаметный эффект от ВСП. Вертикальная развертка от 40 до 110 км температуры и I557.7, полученная по спутниковым данным, позволила более подробно диагностировать эффекты ВСП. Оказалось, что вариации температуры и I557.7 до/во время/после ВСП над двумя пунктами схожи. Тепло в стратосфере над обсерваториями наблюдается до максимума ВСП. В максимум ВСП над выбранными пунктами наибольший нагрев происходит в мезосфере, что сопровождается уменьшением интенсивности эмиссии I557.7. Оценивая временной масштаб аномалий (примерно 10 дней) можно предположить, что данные вариации связаны с влиянием планетарных волн, распространяющихся с нижележащих уровней. Вероятно, температурные вариации в мезосфере-термосфере обусловлены адиабатическим охлаждением/нагревом в зависимости от стратосферной динамики.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ №22-77-10008 «Исследования крупномасштабных явлений в нижней и средней атмосфере и оценка их локального проявления на высотах мезосферы-нижней термосферы».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Зоркальцева О.С., Антохина О.Ю., Антохин П.Н. Долговременная изменчивость параметров внезапных стратосферных потеплений по данным реанализа ERA5 // Оптика атмосферы и океана. 2023. Т. 36, № 3. С. 200–208. DOI: 10.15372/AOO20230306.
- Andrews D.G., Holton J.R., Leovy C.B. Middle atmosphere dynamics // Academic Press, San Diego. 1987. 489 p.
- Barth C.A. The 5577 Angstrom airglow // Science. 1961. V. 134. ISS. 1426.
- Bhattacharya Y., Shepherd G.G., Brown S. Variability of atmospheric winds and waves in the Arctic polar mesosphere during stratospheric sudden warming // Geophys. Res. Lett. 2004. 31(L23101). doi:10.1029/2004GL020389.
- Dowdy A.J., Vincent R.A., Tsutsumi M. et al. Polar mesosphere and lower thermosphere dynamics: 2. Response to sudden stratospheric warmings // J. Geophys. Res. 2007. V. 112(D17105). doi:10.1029/2006JD008127.
- Jacobi Ch., Hoffmann P., Liu R.Q. et al. Midlatitude mesopause region winds and waves and comparison with stratospheric variability // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2009. V. 71. P. 1540–1546. Doi 10.1016/j.jastp.2009.05.004.
- Laskar F.I., Pallamraju D. Does sudden stratospheric warming induce meridional circulation in thermosphere system? // J. Geophys. Res. Space Phys. 2014. V. 10, iss. 143. doi:10.1002/2014JA020086/
- Lednyts'kyi O., von Savigny C., Eichmann K.-U., Mlynczak M.G. Atomic oxygen retrievals in the MLT region from SCIAM-ACHY nightglow limb measurements // Atmos. Meas. Tech. 2015. V. 8. P. 1021–1041. doi: 10.5194 / amt-8-1021-2015
- Limpasuvan V., Orsolini Y.J., Chandran, A. et al. On the composite response of the MLT to major sudden stratospheric warming events with elevated stratopause // J. Geophys. Res. Atmos. 2016. V. 121. P. 4518–4537. doi:10.1002/2015JD024401.
- Panka P.A., Kutepov A.A., Rezac L. et al. Atomic Oxygen Retrieved From the SABER 2.0- and 1.6- μ m Radiances Using New First-Principles Nighttime OH (v) Model // Geophys. Res. Lett. 2018. V. 45, iss.11. P. 5798–5803. doi: 10.1029 / 2018gl077677.
- Saunkin A., Vasilyev R., Zorkaltseva O. Study of Atomic Oxygen Airglow Intensities and Air Temperature near Mesopause Obtained by Ground-Based and Satellite Instruments above Baikal Natural Territory // Remote Sens. 2022. V. 14, iss. 112. <https://doi.org/10.3390/rs14010112>
- Sridharan S., Sathishkumar S., Gurubaran S. Variabilities of mesospheric tides during sudden stratospheric warming events of 2006 and 2009 and their relationship with ozone and water vapour // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2012. V. 78. P. 108–115.
- Vasilyev R., Saunkin A., Zorkaltseva O. et al. Climatology of 557.7 nm Emission Layer Parameters over South-East Siberia, Observations and Model Data // Appl. Sci. 2023. V. 13. P. 5157. <https://doi.org/10.3390/app13085157>
- Vincent R.A. The dynamics of the mesosphere and lower thermosphere: a brief review // Progress in Earth and Planetary Science. 2015. V. 2(4). P. 1–13. doi:10.1186/s40645-015-0035-8
- Yigit E., Medvedev A.S. Internal wave coupling processes in Earth's atmosphere // Adv. Space Res. 2015. V. 55. P. 983–1003. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2014.11.020>
- Zorkaltseva O.S., Vasilyev R.V. Stratospheric influence on MLT over mid-latitudes in winter by Fabry-Perot interferometer data // Ann. Geophys. 2012. V. 39. P. 267–276. <https://doi.org/10.5194/angeo-39-267-2021>

ПРИМЕНЕНИЕ НОВОЙ ПРОГРАММЫ-ОБРАБОТЧИКА ИОНОГРАММ «IONOVIEW» ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ

С.А. Серебrenникова¹, В.А. Иванова¹, А.В. Подлесный¹, М.В. Цедрик¹, А.И. Поддельский²

¹Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия,
sova@mail.iszf.irk.ru

²Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН

APPLICATION OF THE NEW IONOGRAM PROCESSOR “IONOVIEW” FOR STUDYING HELIOGEOPHYSICAL EVENTS

S.A. Serebrennikova¹, V.A. Ivanova¹, A.V. Podlesnyi¹, M.V. Cedrik¹, A.I. Poddelsky²

¹Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, sova@mail.iszf.irk.ru

²Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS

Аннотация. В данном исследовании рассмотрены возможности новой программы «IonoView» для интерактивной обработки данных ионозонда на примере четырех событий: слабой магнитной бури 19 ноября 2023 г., умеренной магнитной бури 20–21 ноября 2023 г. и двух рентгеновских солнечных вспышек 6 и 12 февраля 2024 г. Для анализа событий были выбраны трассы наклонного зондирования: Норильск – Торы, Магадан – Торы и Новосибирск – Торы. Во время главной фазы и фазы восстановления магнитной бури было зарегистрировано отрицательное ионосферное возмущение продолжительностью более 12 часов, которое вызвало падение максимальной наблюдаемой частоты (МНЧ) ионосферного радиоканала до 5 МГц. Солнечные вспышки класса М были зарегистрированы 6 февраля и 12 февраля 2024 г., которые повлияли на вариации наименьшей наблюдаемой частоты (ННЧ) до 3–4 МГц принимаемого сигнала.

Ключевые слова: ионограмма, ионозонд, магнитная буря, рентгеновская солнечная вспышка, программа «IonoView».

Abstract. This study examines the possibilities of the new IonoView program for interactive processing of ionosonde data using the example of four events: a weak magnetic storm on November 19, 2023, a moderate magnetic storm on November 20-21, 2023, and two X-ray solar flares on February 6 and 12, 2024. For the analysis of events, oblique incidence sounding paths were selected: Norilsk - Tora, Magadan - Tora and Novosibirsk - Tora. During the main phase and the recovery phase of the magnetic storm, a negative ionospheric disturbance lasting more than 12 hours was recorded, which caused a drop in the maximum observed frequency (MOF) of the ionospheric radio channel to 5 MHz. Class M solar flares were recorded on February 6 and February 12, 2024, which affected variations in the lowest observed frequency (LOF) up to 3-4 MHz of the received signal.

Keywords: ionogram, ionosonde, magnetic storm, X-ray solar flare, «IonoView» program.

ВВЕДЕНИЕ

Зондирование ионосферы Земли с помощью ионозонда является важной задачей для более углубленного понимания природы возмущений и получения статистических данных для построения и улучшения моделей прогноза параметров ионосферы. Так как ионосфера Земли является средой передачи сигналов для различных спутниковых, телевизионных, военных и прочих систем, возникает вопрос о количественных измерениях ионосферных возмущений для устранения ошибок и шума в передаче сигналов. Помимо этого, необходимы прогнозы сильных магнитных бурь для обеспечения безопасности средств связи, поэтому изучение вариаций ионосферы является актуальной задачей. Благодаря новой интерактивной программе «IonoView» предоставляется возможность более удобной интерактивной обработки параметров распространения КВ-сигналов с расширенным функционалом инструментов по сравнению с аналогичной программой Cool Ionogram Viewer, разработанной в ИСЗФ СО РАН в начале 2000-х гг.

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧА РАБОТЫ

Целью данной работы является исследование воздействия на околоземное космическое пространство возмущений, вызванных магнитными

бурями и солнечными вспышками посредством разработанной программы «IonoView».

Задачей работы стала разработка и написание программы «IonoView», обработка с ее помощью данных с ионозонда по трем трассам Норильск – Торы, Магадан – Торы и Новосибирск-Торы по возмущенным и спокойным дням во время магнитной бури и возмущений, вызванных солнечными вспышками.

ОПИСАНИЕ ПРОГРАММЫ

Программа «IonoView», снимок экрана которой представлен на рис.1, отображает ионограммы, полученные установкой «Ионозонд-МС» в пос. Торы (ГФО ИСЗФ СО РАН). Программа «IonoView» написана на языке C++.

Массив данных представляется в рабочем окне в виде двумерной цветовой карты. По оси «Frequency» отложена частота зондирования, по оси «Distance» отложены групповой путь или действующая высота в зависимости от типа ионограммы. Шкала «Amplitude» отвечает за цветное представление амплитуды принятого сигнала, с возможностью перехода на градиентную шкалу. Отображаемый график для публикаций можно сохранить в виде скриншота в формате .jpg, .png и .pdf.

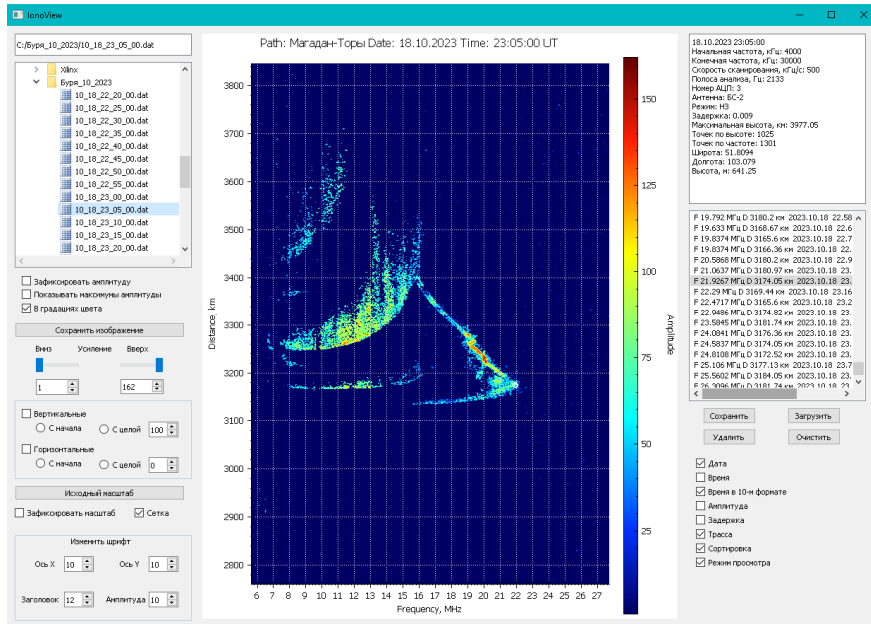


Рис. 1. Скриншот работающей программы «IonoView» в режиме градации цвета во время снятия параметров ионограммы

На панели справа от графика отображается окно информации с основными параметрами открытой ионограммы и характеристиками приемника. На панели слева представлен набор функций для настройки параметров визуализации графика. Также в программе есть возможность установить метку на графике с параметрами. Список полученных меток для дальнейшего использования можно сохранить в формате .txt.

Таким образом, для интерактивной работы с данными «Ионозонда-МС» была разработана программа с широким функционалом возможностей, в том числе имеющая ряд преимуществ относительно схожих программных продуктов: возможность добавления/изменения/просмотра меток — параметров ионограмм в любое время, удобный интерфейс, временное разрешение ионограмм 15 сек.

ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ ДАННЫХ

В программе «IonoView» были обработаны ионограммы во время магнитных бурь, зарегистрированных с 18 по 22 октября 2023 г. на трассах наклонного зондирования (НЗ): Магадан – Торы и Норильск – Торы для второго скачка сигнала.

19 октября проходила слабая магнитная буря [Gonzalez, 1994], индекс DST (рис. 2) понизился до значения -38нТ в 10 UT, при этом отрицательную фазу ионосферного возмущения можно наблюдать только на трассе Норильск – Торы. Это возмущение привело к отклонению значений максимальной наблюдаемой частоты до 2 МГц от реперного значения спокойного дня 17 октября, который выделен на рис. 2. оранжевым цветом.

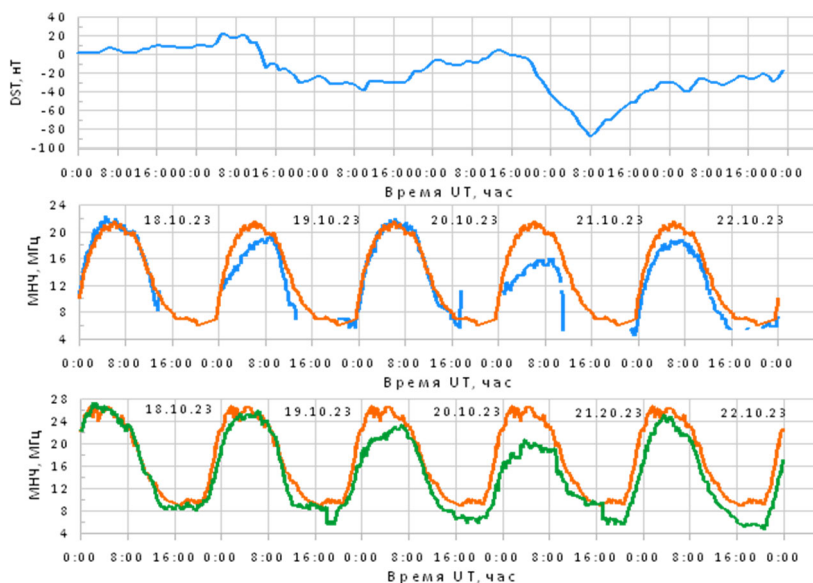


Рис. 2. Вариации индекса DST и максимальной наблюдаемой частоты на двух трассах радиозондирования с 18 по 22 октября 2023 г. Норильск – Торы выделена синим цветом, Магадан – Торы – зеленым. Спокойный день 17 октября нанесен оранжевым цветом, как реперное значение

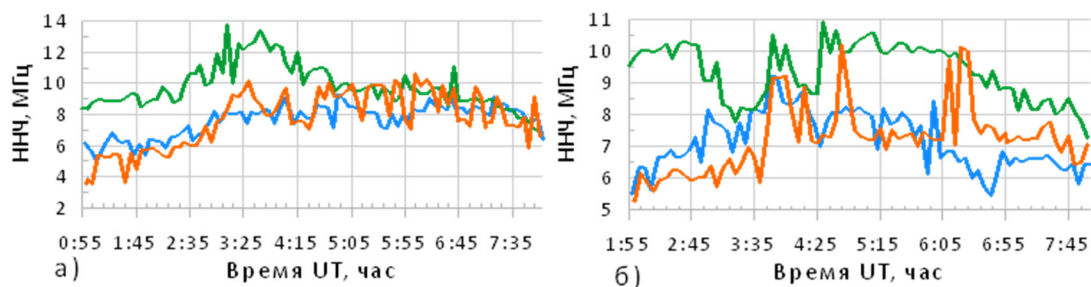


Рис. 3. Вариации наименьшей наблюдаемой частоты на трех трассах радиозондирования во время солнечной вспышки: а) 6 февраля 2024 года и б) 12 февраля 2024 г. Синим цветом выделена трасса — Норильск–Торы, зеленым — Магадан–Торы и оранжевым — Новосибирск–Торы

Во время главной фазы умеренной магнитной бури 21–22 октября индекс DST понизился до отметки -88 нТ в 8 UT 21 октября. Также отрицательная фаза возмущения вызвала отрицательные отклонения величин максимальной наблюдаемой частоты до 5 МГц от реперных значений спокойного дня.

Рентгеновские солнечные вспышки 6 и 12 февраля имели М класс активности (xgas.ru). Эти возмущения, повышая электронную концентрацию в слое D [Митра, 1977], привели к вариациям-наименьшей наблюдаемой частоты. Возмущение, вызванное рентгеновской солнечной вспышкой 6 февраля 2024 г. класса М4.2, приходилось на 3 UT, что соответствует 11 ч в Иркутском регионе, где находится приемник и отклик в данных приходится на дневное время суток, данные НЗ показывают повышение наименьшей наблюдаемой частоты до 4 МГц, относительно спокойного часа до вспышки. Эти колебания ННЧ отчетливо видны на рис. 3а, во время начала 02:37 UT и максимума рентгеновской солнечной вспышки в 03:12 UT и из-за длительного характера излучения вплоть до 03:37 UT.

Возмущение, вызванное вспышкой 12 февраля 2024 г. класса М6.5, приходилось на 3–4 UT, что соответствует 11–12 ч в Иркутском регионе, где находится приемник и отклик на данных приходится на дневное время суток, при этом наблюдается увеличение наименьшей наблюдаемой частоты до 3 МГц, относительно спокойного часа до вспышки. Эти

колебания ННЧ отчетливо видны на рис. 3б, во время начала 03:23 UT и максимума рентгеновской солнечной вспышки в 03:48 UT. Характер вспышки носил локальный характер, что обусловлено восстановлением среды уже в 03:58 UT.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На рассмотренных гелиогеофизических событиях с помощью разработанной программы «IonoView» отчетливо видны отклики на возмущение в виде изменения ННЧ и МНЧ. Эти вариации относительно реперного спокойного дня были количественно измерены: в случае слабой магнитной бури до 2 МГц и умеренной магнитной бури до 5 МГц, и в случае рентгеновских солнечных вспышек до 5 МГц.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (субсидия N075-ГЗ/Ц3569/278). Результаты получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» (<http://ckp-rf.ru/ckp/3056>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Митра А. Воздействие солнечных вспышек на ионосферу Земли: учеб. Для вузов. М.: Мир, 1977. С. 1–22.
 Gonzalez W.D., Joselyn J.A., Kamide Y. et al. What is geomagnetic storm? // J. Geophys. Res. 1994. V. 99, N 3. P. 5771–5792.

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ИССЛЕДОВАНИЮ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ДЖЕТА

А.А. Синевич^{1,2}, А.А. Чернышов¹, Д.В. Чугунин¹, М.В. Клименко³, В.А. Панченко²,
Г.А. Якимова³, М.М. Могилевский¹

¹Институт Космических Исследований Российской Академии Наук, Москва, Россия,
sinevich.aa@gmail.com

²Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова
Российской академии наук (ИЗМИРАН), Троицк, Москва, Россия

³Западное Отделение ИЗМИРАН, Калининград, Россия

A COMPLEX APPROACH TO THE STUDY OF THE POLARIZATION JET

A.A. Sinevich^{1,2}, A.A. Chernyshov¹, D.V. Chugunin¹, M.V. Klimenko³, V.A. Panchenko²,
G.A. Yakimova³, M.M. Mogilevsky¹

¹Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation,
Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

³West Department of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation,
Kaliningrad, Russia

Аннотация. Поляризационный джет (ПД или SAID — SubAuroral Ion Drift) — явление субавроральной ионосферы, представляющее собой узкую полосу быстрого (до нескольких км/с) западного дрейфа ионов на высотах F-слоя, размер плазменных неоднородностей внутри которой может достигать десятков-сотен метров. Несмотря на то, что такие сильные дрейфы ионов и такая высокая структурированность ионосферной плазмы могут вызывать сбои в работе навигационных систем, внутренняя мелкомасштабная структура ПД на данный момент исследована не до конца. Наиболее полное и глубокое понимание мелкомасштабной структуры ПД даст комплексный подход к исследованию с использованием сочетания одновременных наземных и спутниковых наблюдений субавроральной ионосферы, включая измерения с высокой пространственной частотой. В наших работах впервые использованы результаты одновременных измерений, полученные с помощью различных наземных и спутниковых средств (включая спутники ГНСС), для изучения ПД во время нескольких случаев роста геомагнитной активности. В процессе исследований установлено, что внутри ПД с развитием геомагнитной активности флуктуации параметров плазмы увеличиваются на всех масштабах, при этом растет роль крупномасштабных эффектов. Обнаружен новый тип явлений, названный стратифицированный поляризационный джет (СПД) состоящий из нескольких мелкомасштабных страт, определен типичный размер страт. Было обнаружено влияние СПД на распространение трансionoсферных радиосигналов ГНСС: увеличение показателей фазовых и амплитудных мерцаний, а также потеря захвата сигнала. Выяснено, что страты поляризационного джета и неоднородности параметров плазмы внутри них могут вызывать множественные отражения радиосигнала, которые видны на ионограммах в виде F-рассеяния.

Ключевые слова: поляризационный джет, субавроральный ионный дрейф, субавроральная ионосфера, геомагнитная активность

Abstract. A polarization jet (PJ or SAID — SubAuroral Ion Drift) is a phenomenon of the subauroral ionosphere, which is a narrow band of fast (up to several km/s) westward ion drift at F-layer altitudes, the size of plasma irregularities inside which can reach tens to hundreds of meters. Despite the fact that such strong ion drifts and such highly structured ionospheric plasma can cause malfunctions in the operation of navigation systems, the internal small-scale structure of PJ/SAID has not yet been fully studied. The most complete and in-depth understanding of the small-scale structure of the PJ/SAID will be provided by a complex approach to research using a combination of simultaneous ground-based and satellite observations of the subauroral ionosphere, including measurements with high spatial frequency. Our works are the first to use the results of simultaneous measurements obtained using various ground-based and satellite means (including GNSS satellites) to study PJ/SAID during several cases of increased geomagnetic activity. During our studies, it was established that within the PJ/SAID, with the development of geomagnetic activity, fluctuations of plasma parameters increase on all scales and the role of large-scale effects increases. A new type of phenomena, called a stratified polarization jet (SSAID), consisting of several small-scale strata (PJS, Polarization Jet Strata), was discovered, and the typical size of the strata was determined. The influence of SSAID on the propagation of transionospheric GNSS radio signals was discovered: an increase in phase and amplitude scintillation, as well as loss of lock. It was found that PJS and irregularities of plasma parameters inside them can cause multiple reflections of radiosignals, which are visible in ionograms in the form of F-spread.

Keywords: polarization jet, subauroral ion drift, subauroral ionosphere, geomagnetic activity

ВВЕДЕНИЕ

Субавроральная зона расположена между проекцией положения плазмоспаузы вдоль силовых линий геомагнитного поля и экваториальной границей аврорального овала. Одно из наиболее интересных и малоизученных явлений в этой зоне — появление узких потоков быстрых субавроральных ионов, дрейфующих на запад вблизи проекции плазмоспаузы на высотах в F-области ионосферы.

Это явление было впервые обнаружено по данным советского спутника «Космос-184» и получило название поляризационный джет (ПД) [Galperin et al., 1974]. В научной литературе это явление часто называют также Subauroral Ion Drift (SAID) после статьи Spiro et al., [1979]. Столь узкая полоса дрейфа на высотах в F-области вследствие условий вмороженности плазмы связана со спутниковыми наблюдениями и развитием локальных,

направленных к полюсу электрических полей на экваториальной границе конвекционной зоны. Скорость плазмы в полосе ПД может достигать сверхзвуковых значений выше высот F-слоя.

Хорошо известно, что существование ПД приводит к ряду резких структурных изменений в ионосфере, таких как образование узкого провала в широтном распределении электронной концентрации, нагрев плазмы, появление плазменных неоднородностей разных масштабов, которые влияют на условия распространения радиоволн, тем самым отражая изменения космической погоды. Несмотря на то, что экспериментальные и теоретические исследования ПД ведутся уже несколько десятилетий, его природа остается не до конца понятной, и исследование этого явления остается актуальной задачей в физике ионосферы и магнитосферы. Кроме того, падение плотности ионосферной плазмы внутри поляризационного джета существенно влияет на условия прохождения коротковолнового радиоизлучения, что, в свою очередь, влияет на точность позиционирования навигационных спутников (GPS, ГЛОНАСС, Galileo и др.). Это определяет практическую значимость исследования физических явлений, происходящих в субавроральной ионосфере.

Наиболее полное и глубокое понимание мелко-масштабной структуры ПД даст комплексный подход к исследованию с использованием сочетания одновременных наземных и спутниковых наблюдений субавроральной ионосферы, включая измерения с высокой пространственной частотой. В наших работах впервые использованы результаты одновременных измерений, полученные с помощью различных наземных и спутниковых средств (включая спутники ГНСС), для изучения ПД во время нескольких случаев роста геомагнитной активности.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ

Для комплексного исследования ПД во время геомагнитной активности были использованы данные таких спутников и спутниковых систем как DMSP, Swarm и NorSat-1, а также данные спутников ГНСС (GPS, ГЛОНАСС). Также были использованы такие наземные измерительные средства как ионозонды, сцинтилляционные приемники и радары обратного когерентного рассеяния сети SuperDARN. ПД был исследован во время геомагнитных бурь 2018–2021 гг. Данные были

проанализированы с использованием Фурье- и вейвлет-анализа, а также с помощью нового впервые введенного авторами метода анализа внутренней структуры ПД [Sinevich et al., 2023].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В наших исследованиях по результатам проведенного анализа данных одновременных измерений наземных и спутниковых средств внутри ПД во время различных геомагнитных событий были сделаны следующие выводы:

– Установлено, что внутри ПД с развитием геомагнитной активности флуктуации параметров плазмы увеличиваются на всех масштабах, при этом растет роль крупномасштабных эффектов [Sinevich et al., 2022].

– Обнаружен новый тип явлений, названный стратифицированный поляризационный джет (СПД) состоящий из нескольких мелкомасштабных страт, определен типичный размер страт [Sinevich et al., 2023].

– Было обнаружено влияние СПД на распространение трансionoсферных радиосигналов ГНСС: увеличение показателей фазовых и амплитудных мерцаний, а также потеря захвата сигнала.

– Выяснено, что страты поляризационного джета и неоднородности параметров плазмы внутри них могут вызывать множественные отражения радиосигнала, которые видны на ионограммах в виде F-рассеяния.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-22-00133.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Galperin Y., Ponomarev V., Zosimova A. Plasma convection in the polar ionosphere // *Annales Geophysicae*. 1974. V. 30. P. 1–7.
- Sinevich A.A., Chernyshov A.A., Chuginin D.V. et al. Small-scale irregularities within polarization jet/SAID during geomagnetic activity // *Geophys. Res. Lett.* 2022. V. 49. e2021GL097107 <https://doi.org/10.1029/2021GL097107>
- Sinevich A.A., Chernyshov A.A., Chuginin D.V. et al. Stratified Subauroral Ion Drift (SSAID) // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2023. V. 128. e2022JA031109. <https://doi.org/10.1029/2022JA031109>
- Spiro R.W., Heelis R.A., Hanson W.B. Rapid subauroral ion drifts observed by Atmosphere Explorer C // *Geophys. Res. Lett.* 1979. V. 6(8). P. 657–660. <https://doi.org/10.1029/GL006i008p00657>

УДК 533.951.2

ГЕНЕРАЦИЯ ГЕОМАГНИТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ Pc4-5 ПОТОКАМИ ЭНЕРГИЧНЫХ ЧАСТИЦ В ДНЕВНОЙ МАГНИТОСФЕРЕ

Е.Е. Смотровая, О.С. Михайлова, П.Н. Магер, Д.Ю. Климушкин

Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия,
katerina.smotrova@iszf.irk.ru

GENERATION OF GEOMAGNETIC PULSATIONS Pc4-5 BY ENERGETIC PARTICLES' FLUXES IN THE DAYSIDE MAGNETOSPHERE

E.E. Smotrova, O.S. Mikhailova, P.N. Mager, D.Yu. Klimushkin

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia,
katerina.smotrova@iszf.irk.ru

Аннотация. В работе представлен анализ наблюдения серии ультранизкочастотных (УНЧ) волн по данным спутника Van Allen Probe A. Событие наблюдалось 15 февраля 2014 г. на дневной стороне магнитосферы. Были зарегистрированы два типа колебаний. Первый представлял собой компрессионную УНЧ-волну с частотой около 2 мГц и амплитудой около 3 нТл. Второй — альфвеновскую волну на частоте около 6.5 мГц. Показано, что в компрессионная волна была сгенерирована в ходе дрейфового резонанса с электронами на энергии около 90 кэВ, а полоидальная волна — в ходе баунс-дрейфового резонанса с потоками протонов с энергией около 150 кэВ. Были определены параметры наблюдаемых волн, а также механизм их генерации.

Ключевые слова: УНЧ-волны, баунс-дрейфовый резонанс, энергичные частицы, магнитосфера

Abstract. We present an analysis of the observation of a series of ultra-low frequency (ULF) waves using data from the Van Allen Probe A satellite. The event was observed on February 15, 2014 on the dayside magnetosphere. Two types of ULF waves were registered. The first was compressional ULF wave with a frequency of about 2 mHz and an amplitude of about 3 nT. The second one was an Alfvén wave with a frequency of about 6.5 mHz. It is shown that the compressional wave was generated during drift resonance with electrons with about 90 keV, and the poloidal wave was generated during bounce-drift resonance with proton fluxes with energies in the range of 150 keV. The parameters of the observed waves and the mechanism of their generation were determined.

Keywords: ULF waves, drift-bounce resonance, energetic particles, magnetosphere

ВВЕДЕНИЕ

УНЧ-волны являются удобным средством диагностики магнитосферы, поскольку они взаимодействуют с энергичными заряженными частицами магнитосферы [McPherron, 2005]. Запуск большого количества спутниковых миссий позволяет изучать УНЧ-волны в разных частях магнитосферы Земли, в том числе волны диапазона Pc4-5 (4–600 с), которые часто наблюдаются на освещенной стороне магнитосферы [Anderson, 1992; Rubtsov et al., 2023].

Исследования частных случаев генерации УНЧ-волн показывают, что они чаще генерируются при взаимодействии с протонами [Min et al., 2017; Takahashi et al., 2018a, 2018b]. Случаев взаимодействия волн с электронами существенно меньше [Ren et al, 2017]. Ранее был показан случай резонансной генерации полоидальной УНЧ-волны диапазона Pc4 потоком электронов [Mikhailova et al, 2022]. Однако, экспериментально не было продемонстрировано похожих наблюдений, в которых происходила бы генерация электронами УНЧ-волн в диапазоне Pc5. В данном исследовании представлены первые результаты анализа экспериментального наблюдения резонансной генерации компрессионной Pc5 волны потоками электронов, после которой наблюдается резонансная генерация протонами полоидальной Pc4 волны.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ГЕОМАГНИТНЫЕ УСЛОВИЯ

Используя данные миссии Van Allen Probe A (RBSPA), было исследовано событие 15 февраля 2014 г. Событие было зарегистрировано на дневной стороне магнитосферы на расстоянии 5.2–5.8 R_E. Были зарегистрированы два вида колебаний (рис. 1a), наблюдавшиеся при спокойных геомагнитных условиях за пределами плазмосферы. За несколько часов была зарегистрирована суббуря (время onset около 13:30 UT), во время которой индекс AL достиг значения -250 нТл.

Первая волна наблюдается в период с 17:30 до 18:30 UT с максимальной амплитудой 3 нТл в компрессионной компоненте (рис. 1a). Согласно вейвлет-спектру колебания происходят в диапазоне Pc5, где частота плавно меняется от 1.65 до 2.4 мГц (рис. 1b).

Вторая волна наблюдается с 18:15 до 19:00 UT с максимальной амплитудой в 5 нТл в радиальной и азимутальной компонентах магнитного поля (рис. 1a). Волна имеет смешанную поляризацию с максимумом на частоте около 6.5 мГц в радиальной компоненте, что относится к диапазону Pc4 (рис. 1b). Поскольку в это время компрессионная компонента значительно слабее остальных, можно сделать вывод, что мы наблюдаем альфвеновскую волну. Сопоставление собственных альфвеновских тороидальных частот с наблюдаемым спектром показало, волна представляет вторую гармонику альфвеновской волны.

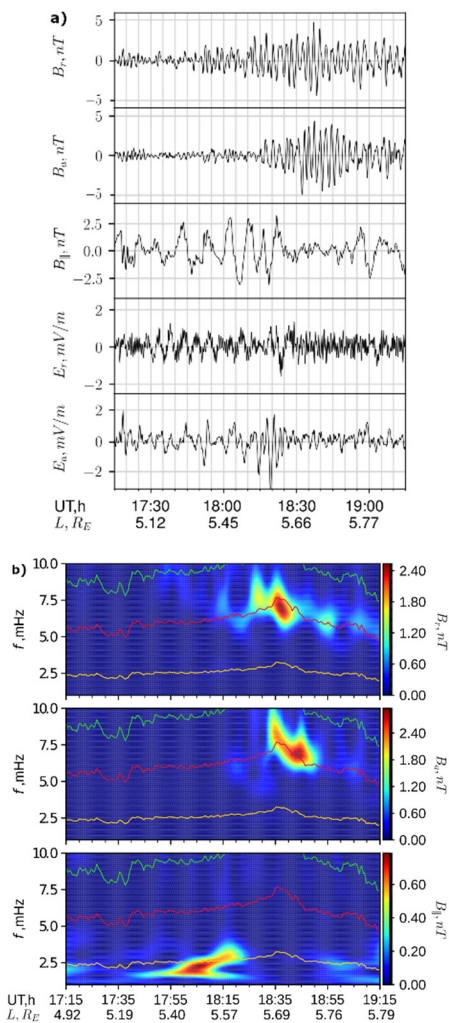


Рис. 1. Данные спутника RBSPA: а) — колебания в магнитном и электрическом полях: сверху вниз — радиальная, азимутальная и продольная компоненты магнитного поля, радиальная и азимутальная компоненты электрического поля, б) — вейвлет-спектр магнитного поля, цветными линиями указаны 1, 2 и 3 гармоник тороидальной волны с массовым числом $\mu = 4$

КОЛЕБАНИЯ ЭНЕРГИЧНЫХ ЧАСТИЦ

Нами были зарегистрированы модулированные потоки энергичных электронов и протонов, наблюдавшиеся одновременно с компрессионной и альфвеновской волнами соответственно.

Сопоставление компрессионной Pc5 компоненты с осцилляциями в потоках электронов показало, что резонансная энергия находится между каналами 86.7 и 92.3 кэВ (рис. 2а). Частота колебаний составляет около 1.65 мГц. Максимальная амплитуда колебаний фиксировалась у частиц с питч-углами 90° , что соответствует дрейфовому резонансу с фундаментальной гармоникой. Оценку азимутального волнового числа можно определить из условия баунс-дрейфового резонанса [Southwood, Kivelson, 1982]:

$$\omega - k\omega_b - m\omega_d = 0, \quad (1)$$

где ω — частота волны, m — азимутальное волновое число, k — баунс-гармоника, ω_b и ω_d — угловые частоты баунс-колебаний и магнитного дрейфа частиц, усредненная по баунс-периоду. Дрейфовый резонанс является частным случаем баунс-

дрейфового резонанса, когда баунс гармоника $k = 0$. В таком случае, исходя из (1), было получено значение $m = 12$. Волна является азимутально-крупномасштабной, распространяющейся на восток.

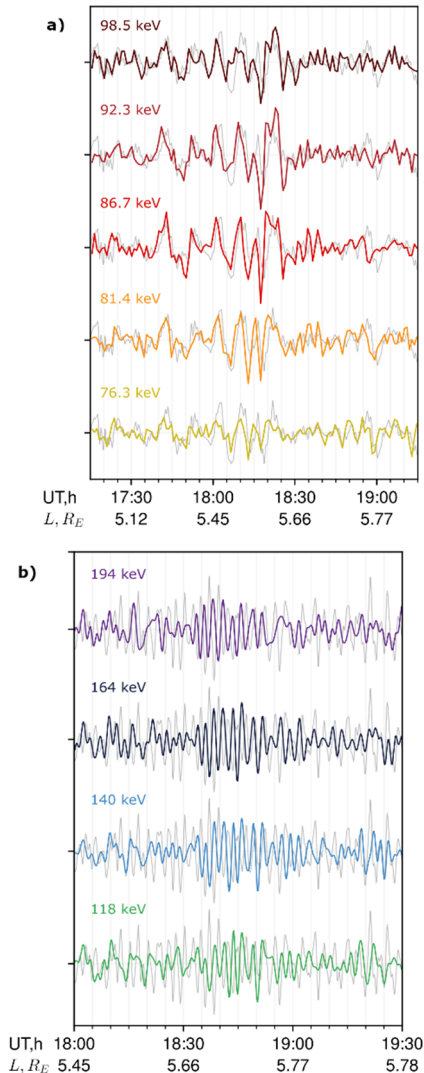


Рис. 2. а) — осцилляции в потоках электронов с инструмента RBSPICE, б) — осцилляции в потоках протонов с инструмента MAGEIS

В осцилляциях протонов были обнаружены колебания, совпадающие по частоте с наблюдаемой Pc4 волной. Распределение частиц по питч-углам указывает на то, что протоны находятся в баунс-дрейфовом резонансе с УНЧ-волной. При этом резонансная энергия порядка 150 кэВ. Оценка азимутального волнового числа из (1) указывает на два возможных азимутальных волновых числа: -230 ($k = -1$) и 180 ($k = 1$). Обе волны являются азимутально-мелкомасштабными, но распространяющиеся в противоположных направлениях.

О МЕХАНИЗМЕ ГЕНЕРАЦИИ

Для возможности передачи энергии от частиц к волне, необходимо наличие инверсной функции распределения по энергии или сильного радиального градиента функции распределения [Southwood et al., 1969]. Развитие подобной неустойчивости выполняется при условии:

$$\hat{Q}F = \left[\frac{\partial F}{\partial \varepsilon} + \frac{m}{\omega} \frac{c}{qV_{eq}L} \frac{\partial F}{\partial L} \right]_{\varepsilon_{res}} > 0. \quad (2)$$

В данном случае F — функция распределения, ε — энергия частиц, q — заряд частицы, c — скорость света, V_{eq} — магнитное поле на геомагнитном экваторе, L — параметр МакИлвейна, ε_{res} — резонансная энергия. Для определения возможного механизма генерации по спутниковым данным было проведено вычисление данного коэффициента неустойчивости для компрессионной УНЧ-волны Pc5 и для полоидальной альфвеновской волны Pc4.

В момент наблюдения компрессионной волны в магнитосфере наблюдалось инверсное распределение частиц по скоростям в пределах энергий 80–100 кэВ. Однако, больший вклад в генерацию данной волны внес сильный пространственный градиент функции распределения.

В случае полоидальной альфвеновской волны показано, что наблюдаемые колебания в радиальном магнитном поле действительно могут быть суперпозицией двух волн с одинаковой частотой, но разным азимутальным волновым числом. Если для волны с отрицательным m основным механизмом генерации являлась пространственная градиентная неустойчивость, то для волны с положительным m дополнительный вклад внесло также инверсное распределение частиц по скоростям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нами было проведено исследование события по данным спутника Van Allen Probe A, во время которого наблюдалась серия УНЧ-волн на дневной стороне магнитосферы.

Первая волна представляла собой первую гармонику компрессионной волны с переменной частотой в диапазоне от 1.65 до 2.4 мГц. Волна находилась в дрейфовом резонансе с потоком электронов с энергией 90 кэВ на частоте 1.65 мГц. Из теории баунс-дрейфового резонанса найдено азимутальное волновое число $m = 12$, что означает азимутально-крупномасштабную волну, распространяющуюся на восток. Волна генерировалась пространственной градиентной неустойчивостью.

Вторая волна являлась второй гармоникой альфвеновской волны смешанной поляризации с частотой 6.5 мГц. Было показано, что волна находилась в баунс-дрейфовом резонансе с протонами с энергией около 150 кэВ. Оценка азимутального

волнового числа показывает возможность присутствия двух волн с $m = -230$ ($k = -1$) и $m = 180$ ($k = 1$). Оценка условий генерации подтверждает возможное наличие двух волн. Обе волны сгенерированы преимущественно пространственной градиентной неустойчивостью, однако для второй волны дополнительный вклад в генерацию вносит инверсное распределение частиц по скоростям.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Anderson B.J., Erlandson R.E., Zanetti L.J. A statistical study of Pc1-2 magnetic pulsations in the equatorial magnetosphere: 1. Equatorial occurrence distributions // *J. Geophys. Res.* 1992. P. 3075–3088. DOI: 10.1029/91JA02706
- McPherron R.L. Magnetic pulsations: Their sources and relation to solar wind and geomagnetic activity // *Surveys in Geophysics*. 2005. V. 26. P. 545–592. DOI: 10.1007/s10712-005-1758-7
- Mikhailova O.S., Smotrova E. E., Mager P.N. Resonant generation of an Alfvén wave by a substorm injected electron cloud: A Van Allen probe case study // *Geophys. Res. Lett.* 2022. V. 49. e2022GL100433. DOI: 10.1029/2022GL100433
- Min K., Takahashi K., Ukhorskiy A.Y. et al. Second harmonic poloidal waves observed by Van Allen Probes in the dusk-midnight sector // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2017. V. 122, iss. 3. P. 3013–3039. DOI: 10.1002/2016JA023770
- Ren J., Zong Q.G., Zhou X.Z. et al. Phase relationship between ULF waves and drift-bounce resonant ions: A statistical study // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2017. V. 122. P. 7087–7096. DOI: 10.1002/2016JA023848
- Rubtsov A. V., Nosé M., Matsuoka A. et al. Polarization and spatial distribution features of Pc4 and Pc5 waves in the magnetosphere // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2023. 128. e2023JA031674. DOI: 10.1029/2023JA031674
- Southwood D.J., Kivelson M.G. Charged particle behavior in low-frequency geomagnetic pulsations. 2. Graphical approach // *J. Geophys. Res.* 1982. V. 87. P. 1707–1710. DOI: 10.1029/JA087iA03p01707
- Southwood D.J., Dungey J.W., Etherington R.J. Bounce Resonant interactions between pulsations and trapped particles // *Planetary and Space Sci.* 1969. V. 17. P. 349–361. DOI: 10.1016/0032-0633(69)90068-3
- Takahashi K., Claudepierre S.G., Rankin R. et al. Van Allen probes observation of a fundamental poloidal standing Alfvén wave event related to giant pulsations // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2018a. V. 123. P. 4574–4593. DOI: 10.1029/2017JA025139
- Takahashi K., Oimatsu S., Nosé M. et al. Van Allen probes observations of second harmonic poloidal standing Alfvén waves // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2018b. V. 123. P. 611–637. DOI: 10.1002/2017JA024869

ОЦЕНКА СВЯЗИ ДИНАМИЧЕСКОГО РЕЖИМА МЕЗОСФЕРЫ СО СТРАТОСФЕРНОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ ПО ДАННЫМ РЕ-АНАЛИЗА И СВЧ-РАДИОМЕТРИИ

А.В. Соколов^{1,2}, А.В. Коваль^{1,2}, Е.Н. Савенкова²

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия,
anigahuchi@yandex.ru

²Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

ESTIMATION OF THE RELATION BETWEEN THE MESOSPHERIC DYNAMIC REGIME AND THE STRATOSPHERIC CIRCULATION FROM REANALYSIS AND MICROWAVE RADIOMETRY DATA

A.V. Sokolov^{1,2}, A.V. Koval^{1,2}, E.N. Savenkova²

¹Saint-Petersburg University, Saint-Petersburg, Russia,
anigahuchi@yandex.ru

²Russian State Hydrometeorological University, Saint-Petersburg, Russia

Аннотация. Данные ТВЗА MLS/Aura на частотах 118 и 190 ГГц применены для изучения аномалий среднезональных температуры и объемного отношения смеси водяного пара на высотах мезосферы в весенние месяцы за период с 2008 по 2022 гг. Также для данных лет были рассчитаны вейвлет-амплитуды бегущих на запад ПВ в температуре на уровне 0.002 гПа. Установлено, что в годы усиления амплитуды ПВ1 с периодом 10 суток (2013, 2015 г.), наблюдаются отрицательные аномалии температуры (от 5 до 10°) и положительные аномалии объемного отношения смеси водяного пара (до 1 млн⁻¹). Для установления связи усиления амплитуды ПВ1 со стратосферной циркуляцией построены амплитуды СПВ1, а также среднезональный ветер по данным ре-анализа UKMO.

Ключевые слова: СВЧ-радиометрия, планетарные волны, стратосферно-мезосферное взаимодействие.

Abstract. 118 and 190 GHz MLS/Aura microwave radiometry data was used to investigate spring-time mesosphere zonal mean temperature and vapour mixing ratio in 2008–2022. 0.002 hPa level temperature wavelet amplitudes of westward propagating PW were calculated for these years. It has shown that when amplitude of PW1 with 10-day period is present (2013, 2015), there are negative temperature (5–10°) and positive vapour mixing ratio (1 ppmv) anomalies. To investigate a relation between PW1 amplitude increasing and stratosphere circulation SPW1, amplitudes and zonal mean zonal wind were calculated based on UKMO data.

Key words: microwave radiometry, planetary waves, stratosphere-mesosphere interactions.

ВВЕДЕНИЕ

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) из космоса по сей день является безальтернативным источником информации о состоянии системы океан-атмосфера (СОА). Радиометрическая аппаратура, размещаемая на низкоорбитальных космических аппаратах (КА), собирает информацию о вертикальном распределении метеорологических характеристик столба атмосферы путем спектрометрии в линиях поглощения атмосферных газов, в первую очередь, кислорода и водяного пара. Таким образом возможен глобальный мониторинг состояния климата.

Температурно-влажностное зондирование атмосферы (ТВЗА) СВЧ-зондом MLS (Microwave Limb Sounder) [Waters et al., 2007] с борта солнечно-синхронного КА Aura на частотах 118 и 190 ГГц позволяет восстанавливать вертикальные профили температуры и влажности на высотах от 10 до 100 км. КА пересекает экватор в 01:45 и 13:45 LT (Local Time). За сутки Aura совершает 15 витков вокруг Земли, что позволяет получать 3500 вертикальных профилей в сутки. Данные ТВЗА MLS/Aura в формате HDF (Hierarchical Data Format) можно найти на официальном сайте: <https://mls.jpl.nasa.gov/eos-aura-mls>. Радиометрическая аппаратура на борту Aura измеряет тепловое излучение атмосферного лимба на миллиметровых и субмиллиметровых длинах волн [Соколов и др., 2024].

ДИНАМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ МЕЗОСФЕРЫ В 2008, 2013, 2015 И 2016 Г.

Рассчитанные по данным ТВЗА аномалии среднезональных температуры (рис. 1) и объемного отношения смеси водяного пара (рис. 2) позволяют обнаружить сильное выхолаживание и увлажнение весенней (май) атмосферы на высотах 80–90 км в 2013 и 2015 гг. Для сравнения дополнительно представлены 2008 и 2016 гг., когда мезосфера Северного полушария была значительно теплее и менее увлажненной.

Из радиометрических измерений температуры на уровне 0.002 гПа, методом комплексного вейвлет-преобразования Морле [Torrence, Compo, 1998] были получены широтно-временные структуры амплитуд распространяющейся на запад планетарной волны с зональным волновым числом 1 (ПВ1) с периодом 10 суток (первая асимметричная мода Россби [Forbes, 1995]) с 2008 по 2022 гг. Установлена закономерность: в 2013 и 2015 гг. (рис. 3) имеет место усиление амплитуды ПВ1, продолжающееся с конца апреля по начало мая. В годы, когда температура/объемное отношение смеси водяного пара сохранялись в пределах нормы, первая асимметричная мода Россби либо существует зимой, затухая к началу весны, либо отсутствует вовсе.

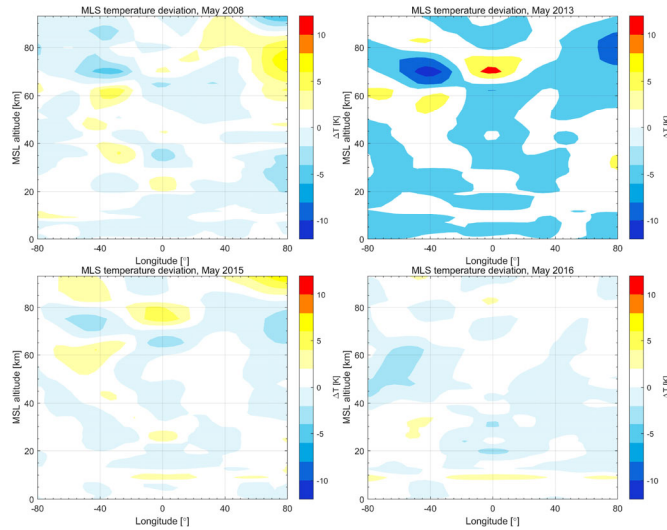


Рис. 1. Аномалии температуры в мае 2008, 2013, 2015 и 2016 г. соответственно, данные MLS/Aura (118 ГГц)

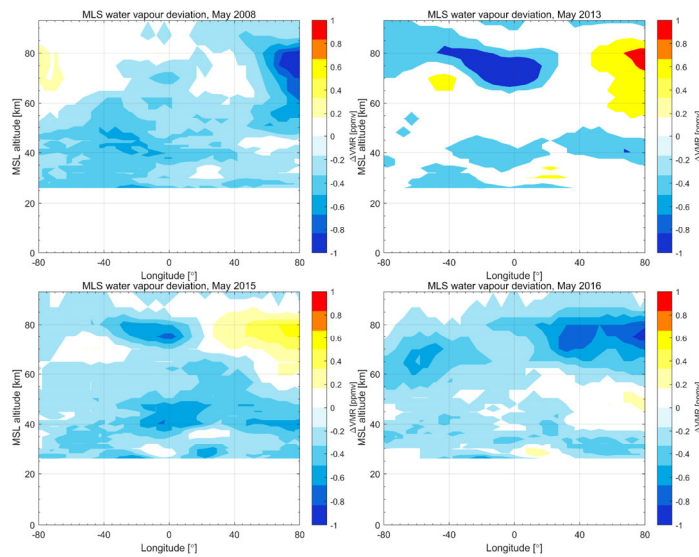


Рис. 2. Аномалии объемного отношения смеси водяного пара в мае 2008, 2013, 2015 и 2016 г. соответственно, данные MLS/Aura (190 ГГц)

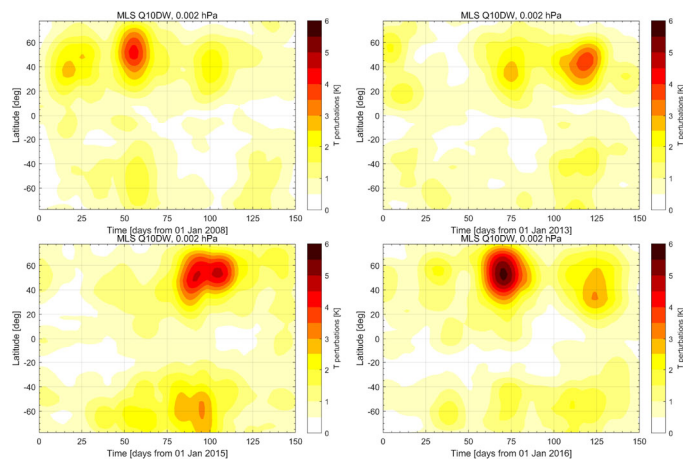


Рис. 3. Широтно-временные структуры амплитуд ПВ1 за 2008, 2013, 2015 и 2016 г. соответственно, данные MLS/Aura (118 ГГц)

ЦИРКУЛЯЦИЯ ЗИМНЕЙ СТРАТОСФЕРЫ

Условием возможной генерации, а также распространения первой асимметричной моды Россби в среднюю атмосферу является динамический режим зимней стратосферы: усиление амплитуды

стационарной планетарной волны с $m = 1$ (СПВ1) и скорость зонального ветра в этом слое. Для рассматриваемых лет были построены амплитуды СПВ1 и среднезональный зональный ветер по данным модели UK Met Office (рис. 4).

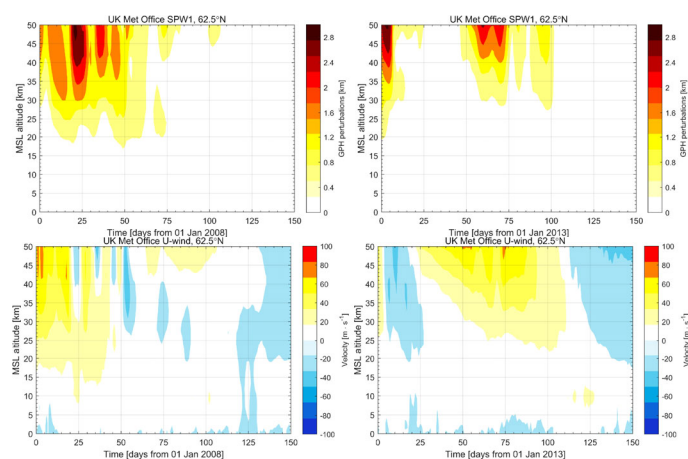


Рис. 4. Амплитуды СПВ1 (вверху) и среднесезонный зональный ветер (внизу) за 2008 и 2013 г. соответственно, данные UK Met Office

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ПВ1 нарушает сезонную вариацию температурно-влажностного режима верхней мезосферы, вызывая преждевременные выхолаживание и увлажнение этого слоя. Условием возможной генерации, а также распространения первой асимметричной моды Россби в среднюю атмосферу является динамический режим зимней стратосферы: усиление амплитуды СПВ1 и скорость зонального ветра в этом слое.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ (грант №20-77-2021-10006-П).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Соколов А.В., Савенкова Е.Н., Коваль А.В. Анализ динамического режима зимней стратосферы на основе

данных спутникового зондирования EOS MLS // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Гидрометеорология и физика атмосферы: современные достижения и тенденции развития». СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, (в печати).

Forbes J. M. Tidal and planetary waves, The Upper Mesosphere and Lower Thermosphere: A Review of Experiment and Theory // Geophys. Monogr. Ser. 1995. V. 87. P. 67–87. <https://doi.org/10.1029/GM087p0067>

Torrence Ch., Compo G.P. A practical guide to wavelet analysis // Bull. Amer. Met. Soc. 1998. V. 79. N. 1. P. 61–78.

Waters, J.W., Froidevaux, L., Harwood, R.S. et al. The Earth Observing System Microwave Limb Sounder (EOS MLS) on the Aura satellite // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2006. V. 44, iss. 5. P. 1075–1092.

ВРЕМЕННЫЕ МАСШТАБЫ КОГЕРЕНТНОСТИ ПУЛЬСАЦИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ДИАПАЗОНА 1-5 МГц В ГЕОМАГНИТНОМ ХВОСТЕ И НОЧНОМ МАГНИТОСЛОЕ

Д.А. Стуков, Н.В. Ягова

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН), Москва, Россия, sda@ifz.ru

COHERENCE TIMESCALES OF THE MAGNETIC FIELD PULSATIONS IN 1-5 MHZ RANGE IN THE MAGNETOTAIL AND NIGHT MAGNETOSHEATH

D.A. Stukov, N. V. Yagova

Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences (IPE RAS), Moscow, Russia, sda@ifz.ru

Аннотация. Исследуются флуктуации магнитного поля в магнитослое и геомагнитных пульсаций в магнитосферном хвосте в диапазоне 1–5 МГц (Pc5/Pi3). По данным магнитометрических измерений на спутниках Cluster за 2016 г. рассматривается зависимость спектральной когерентности вариаций магнитного поля от длины интервала при различных расположениях спутников относительно магнитопаузы. Показано, что спад когерентности при увеличении длины интервала T примерно одинаков для магнитного хвоста и магнитослоя при $T \leq 64$ мин, а при больших значениях T когерентность в магнитослое спадает быстрее, чем в геомагнитном хвосте.

Ключевые слова: магнитосфера, геомагнитные пульсации, магнитосферный хвост

Abstract. This study investigates fluctuations of the magnetic field in the magnetosheath and geomagnetic pulsations in the magnetotail in the range of 1–5 mHz (Pc5/Pi3). According to the data of magnetic measurements on the Cluster satellites in 2016, the dependence of the spectral coherence of magnetic field variations on the length of the interval is considered for different locations of the satellites relative to the magnetopause. It is shown that the decrease in coherence with increasing interval length T is approximately the same for the magnetotail and the magnetosheath at $T \leq 64$ minutes, and at larger values of T , the coherence in the magnetosheath decreases faster than in the magnetotail.

Keywords: magnetosphere, geomagnetic pulsations, magnetotail

ВВЕДЕНИЕ

В геомагнитном хвосте возникают волны всех основных магнитогидродинамических (МГД) типов и специфические для хвоста изгибные колебания [Tsutomi, Teruki, 1976]. Экспериментальные исследования показали, что глобальные пульсации могут возникать на расстояниях до десятков радиусов Земли R_E [Saraforoulous and Sarris, 1994]. Средняя амплитуда геомагнитных пульсаций диапазона Pc5 растёт с ростом флуктуаций динамического давления солнечного ветра [Wang et al., 2015]. При удалении от Земли частота пульсаций уменьшается, причем в дальнем хвосте преобладают бегущие волны, а в ближнем хвосте — стоячие [Zhang et al., 2018]. Настоящая работа является продолжением серии исследований [Nosikova et al., 2022; Ягова и др, 2022, Ягова и др, 2024]. В этих работах выявлено, что пространственных масштаб когерентности пульсаций в геомагнитном хвосте и их связь с вариациями геомагнитного поля в ночном магнитослое зависит от интенсивности внемагнитосферных флуктуаций в том же частотном диапазоне. При низком уровне флуктуаций динамического давления солнечного ветра и ММП перед ударной волной пульсации в долях геомагнитного хвоста демонстрируют высокую добротность и оказываются слабо связанными с флуктуациями поля в магнитослое. В этих работах все оценки когерентности выполнялись для одной длины спектрального интервала. В настоящей работе длина интервала T варьируется, что позволяет оценить не только абсолютные значения спектральной когерентности γ^2 для одного значения длины интервала T , но и характер зависимости $\gamma^2(T)$.

ДАнные И ОБРАБОТКА

Миссия Cluster представляет собой четыре спутника, расстояние между которыми меняется от 0.3 до 2.5 R_E . Магнитометрические измерения осуществлялись магнитонасыщенным (fluxgate) магнетометром с исходным временным шагом около 4 с [Escoubet et al., 2001]. Для анализа были использованы данные спутников Cluster2 и Cluster4 за 2016 г. Первичная обработка включала выбор положений спутников по данным SSCWEB [https://sscweb.gsfc.nasa.gov/], отбор данных без выбросов и поворот в систему координат по магнитному полю. Поворот осуществлялся с использованием данных собственных измерений спутника: для времени t_0 текущее значение вектора магнитного поля определялось в скользящем окне длительностью 20 мин ($t_0 \pm 10$ мин). Компонента B_r ориентирована вдоль главного магнитного поля, B_p перпендикулярна ей и лежит в плоскости, образованной касательной к линии поля и проходящей через центр Земли, а B_ϕ образует с ними правую тройку векторов. Для анализа отбираются интервалы длительности, превышающей заданный порог, для которых рассчитывается спектральная когерентность. Предварительный отбор выделил три варианта взаимного расположения спутников: оба спутника в доле хвоста (both in), пересечение магнитопаузы (MP crossing), оба спутника в магнитослое (both out). Обработка данных проводилась в среде Python с использованием библиотеки Scipy. Перед спектральным анализом выполнялась фильтрация в полосе 0.8–8.3 МГц и децимация к шагу

60 с. Далее для вариаций магнитного поля после фильтрации используется обозначение b с соответствующим индексом, чтобы отличить их от исходных значений магнитного поля B . Спектральный анализ выполнялся для интервалов от 48 до 96 мин. Для расчёта спектральной плотности мощности (PSD) и когерентности применялись функции `Periodogram` и `Coherence` библиотеки `Scipy.signal` со следующими параметрами: `window = 'blackman'`, `nperseg = 32`, `noverlap = 24`, `nfft = 128`. Параметры окна Блэкмана: ширина окна — 16 мин, перекрытие окон — 4 мин. Так как осредненный спектр PSD в геомагнитном хвосте может быть аппроксимирован обратностепенной зависимостью PSD от частоты [Ягова и др, 2022], для отбора событий использовалось условие на спектр мощности

$$P_{max} \cdot f_{max}^\alpha > P_b \quad (1)$$

в полосе 1–5 МГц при $\alpha = 1.5$, $P_b = 5$, где f_{max} — частота максимума, $P_{max} = \max(P(f))$. Использованный порог соответствует уровню амплитуд в несколько десятых нТл, для которых в геомагнитном хвосте регистрировались когерентные пульсации [Nosikova et al., 2022]. Когерентности для пары компонент рассчитывались, если условие (1) было выполнено для хотя бы одной из них.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

Количество интервалов, позволяющее выполнить статистический анализ зависимости $\gamma^2(T)$, оказалось достаточным для расположений «both in» и «both out» для пар компонент, включающих продольную компоненту b_τ . Для всех отобранных интервалов и пар компонент вычислялись спектры когерентности $\gamma^2(f)$ и максимальное значение γ^2_{max} в полосе 1–5 МГц. Результаты представлены на рис 1–3 в виде зависимости $\langle \gamma^2_{max} \rangle(T)$, где $\langle \gamma^2_{max} \rangle$ — среднее по всем интервалам заданной длины значение γ^2_{max} , а T — длина интервала. Для всех рассмотренных случаев среднее по диапазону изменений T значения γ^2_{max} для положения «both in» превышает значения «both out». При этом характер зависимости $\langle \gamma^2_{max} \rangle(T)$ и разность значений γ^2_{max} отличается для случая компоненты b_τ на обоих спутниках и пар, составленных из продольной и поперечной компонент. В первом случае (рис. 1) когерентность в геомагнитном хвосте выше, чем в магнитослое для всех значений T . Для положения «both in» при $T = 80$ мин спад сменяется плато, в отличие от «both out», где $\langle \gamma^2_{max} \rangle(T)$ убывает во всем диапазоне T . В случае разных компонент независимо от расположения спутников при $T \leq 64$ мин наблюдается практически одинаковый спад когерентности, а при больших значениях T спад замедляется для положения «both in» и сохраняется для положения «both out». В результате в магнитосферном хвосте когерентность при $T = 96$ мин оказывается примерно в 1.5 раза выше, чем в магнитослое, где она опускается ниже 0.5.

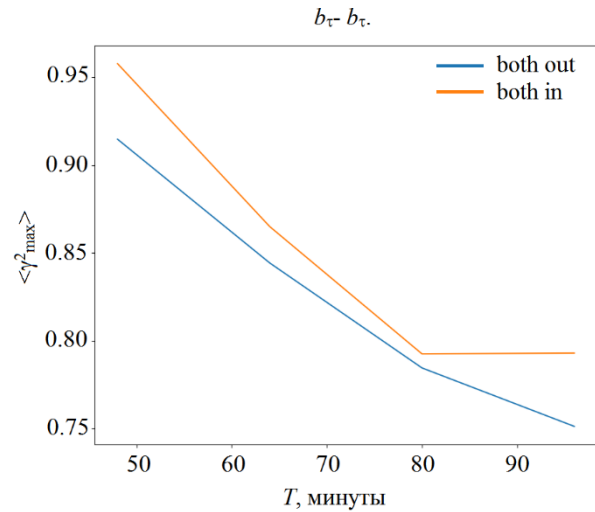


Рис. 1. Зависимость средних по всем интервалам с заданным положением спутников значений γ^2_{max} от длины интервала для пары компонент $b_\tau - b_\tau$

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Анализ пульсаций диапазона первых миллигерц (Pc5/P13) в геомагнитном хвосте и ночном магнитослое на двух спутниках Cluster показал, что не только абсолютные значения, но и характер зависимости $\langle \gamma^2_{max} \rangle(T)$ отличается в магнитосферном хвосте и в магнитослое. Характер зависимости $\langle \gamma^2_{max} \rangle(T)$ позволяет выделить две области масштабов с границей около 1 ч. На меньших временах отличие между когерентностями вне- и внутримангитосферных пульсаций мало, а на больших временах они становятся существенными. Смена режима при $T = 64$ мин особенно явно проявляется для пар, включающих нормальные к главному магнитному полю компоненты (рис. 2–3). Для продольной компоненты отличие сохраняется во всем диапазоне изменения T , а граница режимов сдвинута к большим длительностям, причем для геомагнитного хвоста при $T = 80$ мин зависимость выполаживается. Полученные результаты показывают необходимость учитывать при анализе низкочастотных

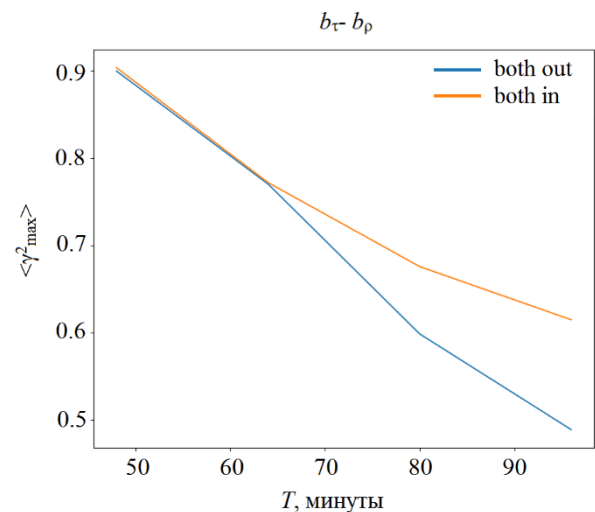


Рис. 2. То же для пары компонент $b_\tau - b_\rho$

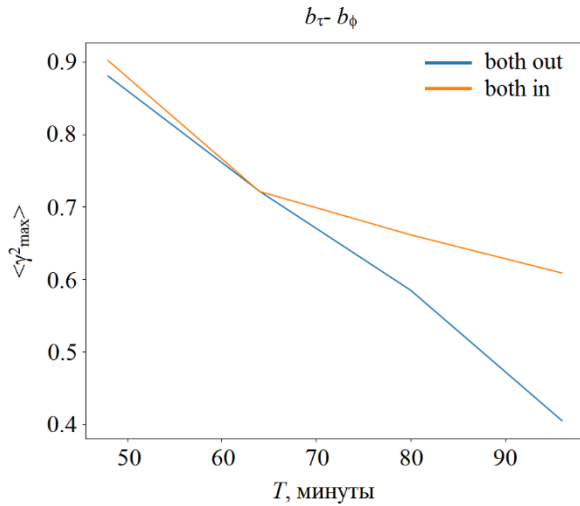


Рис. 3. То же для пары компонент b_{τ} - b_{ϕ}

геомагнитных пульсаций, типичных для внешних областей магнитосферы, геомагнитного хвоста и магнитослоя, не только абсолютное значение спектральной когерентности, но и характер его зависимости от длины интервала.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФЗ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ягова Н.В., Козырева О.В., Носикова Н.С. Геомагнитные пульсации диапазона 1–4 мГц (Pc5/Pi3) в

магнитосферном хвосте при разном уровне возмущенности в межпланетной среде // Солнечно-земная физика. 2022. Т. 8, № 2. Р. 84–91.

Ягова Н.В., Евсина Н.С. Геомагнитные пульсации диапазона 1–4 мГц (Pc5/Pi3) в магнитосферном хвосте. Вне и внутримангнитосферные источники // Космические исследования. 2024. Т. 62 (в печати)

Escoubet C.P., Fehringer M., Goldstein M. The Cluster mission // Ann. Geophys. 2001. V. 19. P. 1197–1200. DOI: 10.5194/angeo-19-1197-2001

Nosikova N.S., Yagova N.V., Baddeley L.J. et al. An investigation into the spectral parameters of ultra-low-frequency (ULF) waves in the polar caps and magnetotail // Ann. Geophys. 2022. V. 40. P. 151–165. DOI: 10.5194/angeo-40-151-2022.

Sarafopoulos D.V., Sarris E.T. Quiet-time Pc 5 pulsations in the Earth’s magnetotail: IMP-8, ISEE-1 and ISEE-3 simultaneous observations // Ann. Geophys. 1994ю V. 12. P. 121–138. <https://doi.org/10.1007/s00585-994-0121-5>.

Tsutomu T., Teruki M. Flapping motions of the tail plasma sheet induced by the interplanetary magnetic field variations // Planetary and Space Sci. 1976. V. 24. P. 147–159. DOI: 10.1016/0032-0633(76)90102-1.

Wang G.Q., Zhang T.L., Ge Y.S. Spatial distribution of magnetic fluctuation power with period 40 to 600 s in the magnetosphere observed by THEMIS // J. Geophys. Res. Space Phys. 2015. V. 120. P. 9281–9293, DOI: 10.1002/2015JA021584.

Zhang S., Tian, A., Shi Q. et al. Statistical study of ULF waves in the magnetotail by THEMIS observations // Ann. Geophys. 2018. V. 36. P. 1335–1346, <https://doi.org/10.5194/angeo-36-1335-2018>.

URL: <https://sscweb.gsfc.nasa.gov/> (дата обращения 24.04.2024).

ИССЛЕДОВАНИЕ АТМОСФЕРНЫХ ЛЕДЯНЫХ ЧАСТИЦ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ В РАМКАХ ПРИБЛИЖЕНИЯ ФИЗИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

Д.Н. Тимофеев, В.А. Шишко, Н.В. Кустова

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Россия,
tdn@iao.ru

INVESTIGATING THE ATMOSPHERIC ICE PARTICLES OF COMPLEX SHAPE WITHIN THE PHYSICAL OPTICS APPROXIMATION

D.N. Timofeev, V.A. Shishko, N.V. Kustova

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia,
tdn@iao.ru

Аннотация. В данной работе представлены матрицы рассеяния света для атмосферных гексагональных ледяных агрегатах, характерных для перистых облаков. Для данного исследования была выбрана форма «bullet», в качестве базовой частицы для агрегатов. Исследуемые агрегаты состоят из одинаковых частиц, расположенных ортогонально друг к другу. Для расчета был создан набор, состоящий из 3D моделей агрегатов с разным количеством частиц (от 1 до 6). Матрицы рассеяния света рассчитаны для случая произвольной пространственной ориентации частиц в рамках приближения геометрической и физической оптики. Установлено, что элементы матрицы рассеяния света для агрегатов могут быть получены из величин тех же элементов, что и у одиночных частиц, из которых они состоят.

Ключевые слова: рассеяние света, перистые облака, ледяные частицы, агрегаты, физическая оптика.

Abstract. This work presents the light-scattering matrices of atmospheric-aggregated hexagonal ice particles that appear in cirrus clouds. For this study the «bullet» shape of the base particle for aggregates was chosen. The aggregates consist of the same particles oriented orthogonal to each other. The set of 3D aggregate models with a different number of particles (from 1 to 6) was created for calculation. The light scattering matrices were calculated for the case of arbitrary spatial orientation of particles within the geometrical and optics physical approximation. It was found that the light-scattering matrix elements for aggregates can be obtained from the same elements of singular particles they consist of.

Keywords: light scattering, cirrus clouds, ice particles, aggregates, physical optics

ВВЕДЕНИЕ

Атмосферные ледяные частицы, которые обычно появляются в перистых облаках, являются важным компонентом атмосферных исследований, таких как дистанционное зондирование и перенос излучения. В общем случае, они находятся на высотах 7–11 км, имеют гексагональную форму и размеры в диапазоне 10–1000 мкм. Плотность частиц в перистых облаках мала по сравнению с облаками других типов, но они обладают трудно прогнозируемыми рассеивающими свойствами из-за специфической геометрии частиц. В то же время многие особенности задачи рассеяния света на ледяных частицах еще мало изучены [Berry, Mace, 2014].

Существуют прямые и дистанционные методы изучения перистых облаков. Поскольку прямые методы ограничены во времени и финансовых ресурсах, на практике более полезными являются дистанционные методы, такие как зондирование атмосферы с помощью лидаров. Для интерпретации лидарных данных необходимо решить прямую задачу рассеяния света монохроматического лазерного излучения. Для этого необходима база данных матриц рассеяния света (M) и соответствующих микрофизических свойств облаков. Для решения этой задачи обычно используют численные методы [Yurkin, Moskalensky, 2021; Sun et al., 2017].

Частицы перистых облаков по микрофизической структуре можно разделить на два типа: одиночные частицы (гексагональные столбики, пластинки, пули и т.д.) и агрегаты, состоящие из нескольких частиц. По данным полевых измерений, агрегаты

составляют значительную часть частиц перистых облаков [Um et al., 2015]. Однако соответствующая информация об их рассеивающих свойствах отсутствует в существующих базах данных. Кроме того, ожидается, что рассеяние света агрегатами, состоящими из одинаковых кристаллов, и рассеяние света одиночным кристаллом в облаке происходит схожим образом. В этом случае можно рассчитать M агрегатов, используя зависимость элементов M от количества частиц в агрегатах. Однако распределение света от отдельной частицы может отличаться от распределения света в совокупности.

Цель исследования — определить зависимость элементов матрицы рассеяния от числа и расположения частиц в агрегате.

Одной из характерных для перистых облаков агрегатных частиц является «bullet-rosette». Данный агрегат может состоять из различного количества одиночных частиц типа «bullet» («пуля») (см. рис. 1). Для агрегатов типа «bullet-rosette» с количеством частиц (N) от 1 до 6 (при $N = 1$ агрегат является одиночной «пулей») были рассчитаны матрицы рассеяния света.

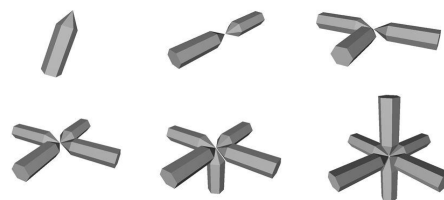


Рис. 1. Геометрические модели агрегата типа «bullet-rosette» с N от 1 до 6

РЕЗУЛЬТАТЫ ПО ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКЕ

Для вышеописанных агрегатов были рассчитаны матрицы M для углов рассеяния $0-180^\circ$ с шагом 1° в приближении геометрической оптики с показателем преломления льда 1,3116 (соответствует длине волны излучения 0,532 мкм) [Warren, Brandt, 2008]. Расчёт был проведён для более 1 млн случая пространственной ориентации для каждого агрегата. Для расчетов использовался модифицированный алгоритм трассировки пучков [Timofeev et al., 2018]. В качестве результатов на рис. 2

представлены зависимости элементов матрицы ($M_{11}, M_{22}, M_{12}, M_{14}$) от угла рассеяния (θ). Значения M_{22}, M_{12}, M_{14} для удобства нормированы на M_{11} (т.е. $m_{22} = M_{22}/M_{11}$ и т.д.).

Наиболее информативным параметром для сравнения является M_{11} , разделенный на среднюю геометрическую площадь тени (G_A). Эту площадь можно рассчитать, используя геометрию агрегата, не решая задачу светорассеяния. Результат показывает, что M_{11}/G_A и элементы матрицы очень незначительно меняется с N для агрегата.

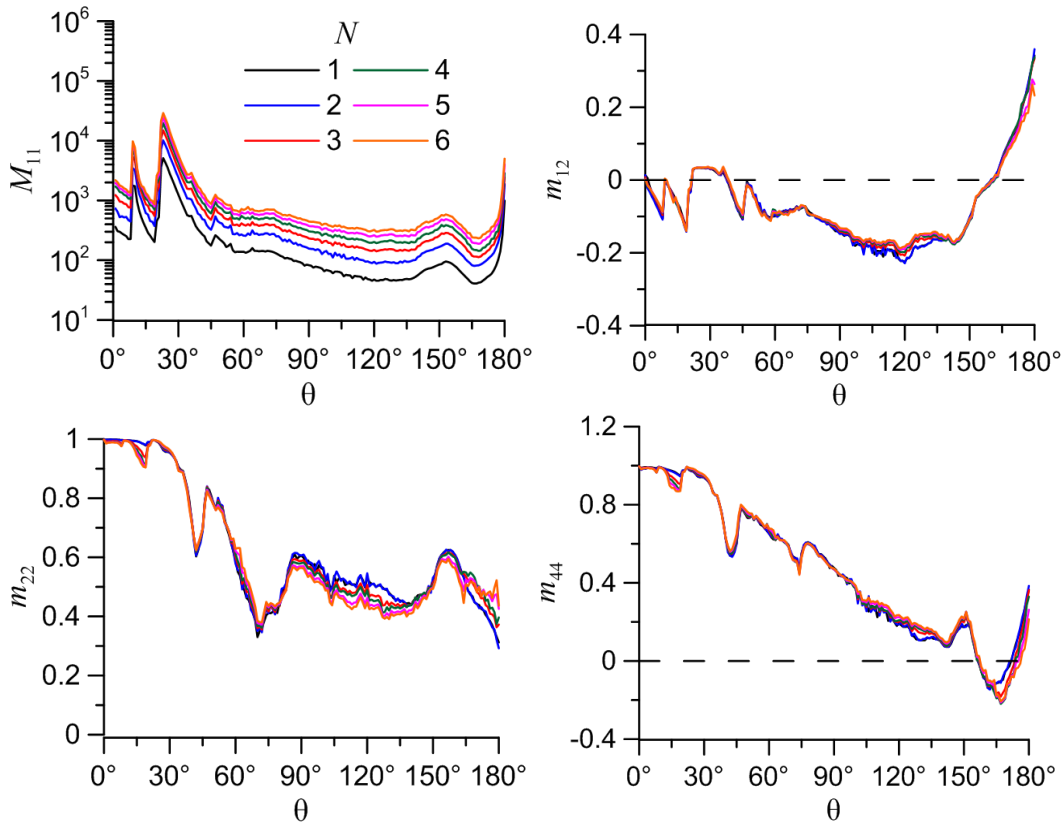


Рис. 2. Зависимость элементов матрицы рассеяния света от угла рассеяния (θ) для исследуемых агрегатов

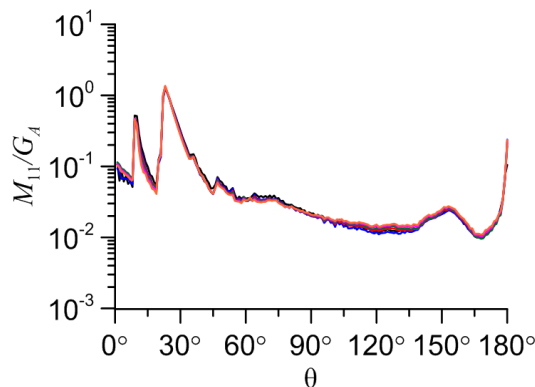


Рис. 3. Зависимость M_{11}/G_A от θ агрегатов типа «bullet-rossette»

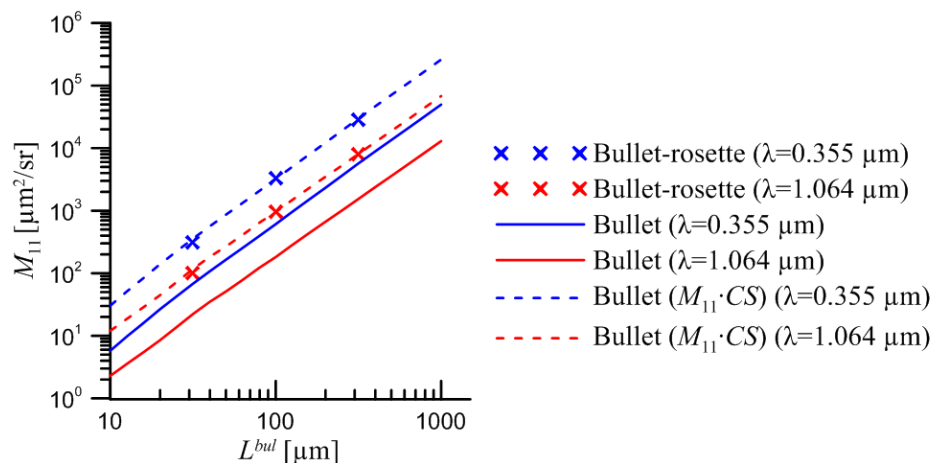


Рис. 4. Зависимость M_{11} от L^{bul} для агрегата типа «bullet-rosette» и одиночной частицы

РЕЗУЛЬТАТЫ ПО ФИЗИЧЕСКОЙ ОПТИКЕ

Расчитав в M в направлении рассеяния 180° в приближении физической оптики, мы можем сравнить M_{11} для агрегата типа «bullet-rosette» (6 частиц) и для одиночной пули, используя существующую базу данных. Поскольку размеры агрегата одиночной частицы отличаются, мы используем зависимость M_{11} от длины одиночной частицы (L^{bul}). Затем M_{11} для одиночной частицы умножалось на полное сечение рассеяния агрегата. Результат представлен на рис. 4.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Расчеты матрицы рассеяния света в приближении геометрической и физической оптики для агрегатов, состоящих частиц типа «bullet», показывают квазилинейные зависимости первого элемента матрицы светорассеяния (M_{11}) от числа частиц (N). Величину M_{11} для агрегата можно получить умножением M_{11} для одиночной пули на полное сечение рассеяния для агрегата в приближении как геометрической, так и физической оптики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Berry E., Mace G.G. Cloud properties and radiative effects of the Asian summer monsoon derived from A-Train data // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2014. V. 119(15). P. 9492–9508.
- Yurkin M.A., Koschek A.E. Open-source implementation of the discrete-dipole approximation for a scatterer in an absorbing host medium // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021. V. 12167.
- Sun B., Yang P., Kattawar G.W., Zhang X. Physical-geometric optics method for large size faceted particles // *Opt. Express.* 2017. V. 25(20). P. 24044–24060.
- Um J., McFarquhar G.M., Hong Y.P. et al. Dimensions and aspect ratios of natural ice crystals // *Atmos. Chem. Phys.* 2015. V. 15. P. 3933–3956.
- Warren S.G., Brandt R.E. Optical constants of ice from the ultraviolet to the microwave: A revised compilation // *J. Geophys. Res.* 2008. V. D14220. P. 113.
- Timofeev D.N., Konoshonkin A.V., Kustova N.V. Modified Beam-Splitting 1 (MBS-1) Algorithm for Solving the Problem of Light Scattering by Nonconvex Atmospheric Ice Particles // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31(06). P. 642–649.

ВОЛНОВАЯ АКТИВНОСТЬ ВГВ В НИЖНЕЙ ТЕРМОСФЕРЕ В ПЕРИОД МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО ШТОРМА ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ SABER/TIMED

О.П. Борчевкина, Ф.С. Бессараб, А.В. Тимченко, И.В. Карпов

Калининградский филиал института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н. В. Пушкова Российской академии наук, Калининград, Россия,
timchenko.leks@gmail.com

GRAVITY WAVES ACTIVITY IN THE MESOSPHERE AND LOWER THERMOSPHERE DURING A METEOROLOGICAL STORM

O. P. Borchevkina, F. S. Bessarab, A. V. Timchenko, I. V. Karpov

West Department of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation,
Russian Academy of Sciences, Kaliningrad, Russia,
timchenko.leks@gmail.com

Аннотация. Исследуется влияние метеорологического шторма в октябре 2018 г. в Балтийском море на состояние мезосферы и нижней термосферы. Проведён анализ волновой активности внутренних гравитационных волн по данным спутника TIMED/SABER и определены эффекты метеорологического шторма на высотах 80–100 км. Проведённый вейвлет-анализ возмущений температуры выявил два диапазона вертикальных длин волн 5–8 км и 14–18 км. В области метеорологического шторма амплитуда ВГВ с вертикальными длинами волн 5–8 км возрастает, а область их максимума расширяется и смещается вверх на высоты ~90 км, в то время как в метеорологически спокойные дни данные волны наблюдаются на высотах 65–70 км и с меньшими амплитудами. Над областью метеорологического шторма на высотах 90–100 км значительно увеличиваются значения плотности потенциальной энергии внутренних гравитационных волн по сравнению со спокойными днями до и после шторма, а также увеличиваются пространственные размеры области возмущения.

Ключевые слова: TIMED/SABER, метеорологический шторм, ВГВ, внутренние гравитационные волны.

Abstract. The influence of the meteorological storm in October 2018 in the Baltic Sea on the state of the mesosphere and lower thermosphere is investigated. The wave activity of gravity waves was analyzed using TIMED/SABER satellite data and the effects of the meteorological storm at altitudes of 80–100 km were determined. The wavelet analysis of temperature perturbations revealed two ranges of vertical wavelengths 5–8 km and 14–18 km. In the area of a meteorological storm, the GWs amplitude with vertical wavelengths of 5–8 km increases, and the area of their maximum expands and shifts upward to heights of ~90 km, while on meteorologically calm days these waves are observed at heights of 65–70 km and with smaller amplitudes. Above the meteorological storm region at altitudes of 90–100 km, the values of the gravity waves potential energy density significantly increase compared to calm days before and after the storm, as well as the spatial dimensions of the disturbance region increase.

Keywords: TIMED/SABER, meteorological storm, GWs, the gravity waves.

ВВЕДЕНИЕ

Динамические процессы в нижней атмосфере, такие как метеорологические штормы, ураганы, извержения вулканов, землетрясения являются источником широкого спектра внутренних гравитационных волн (ВГВ), которые способны распространяться вверх до высот термосферы и ионосферы и оказывать существенное влияние на параметры и динамику верхней атмосферы [Borchevkina et al., 2021]. Влияние ВГВ, распространяющихся из области метеорологических штормов в тропосфере, отмечается в существенных возмущениях как в F-области ионосферы [Карпов и др., 2016; Koucká Knížová et al., 2020], так и в мезосфере и нижней термосфере [Бахметьева и др., 2023; Шалимов и др., 2023].

Для экспериментального исследования влияния ВГВ на термосферу и ионосферу используют как наземные, так и спутниковые методы наблюдений. Спутниковые миссии позволяют обеспечивать большой объём наблюдений с разным временным и пространственным разрешением. Спутник TIMED (Thermosphere-Ionosphere-Mesosphere Energetic and Dynamics) широко используется для исследования состояния атмосферы до высот нижней термосферы. Зондирование атмосферы с помощью

широкополосной эмиссионной радиометрии (SABER) на спутнике TIMED позволяет определить профили температуры до высот примерно 110 км. Подробная информация об инструменте SABER и соответствующих данных о температуре представлены в работах [Remsberg et al., 2008].

Цель настоящей работы заключается в анализе волновой активности в нижней термосфере в период прохождения метеорологического шторма на основе измерений температуры спутниковой миссией TIMED.

ОПИСАНИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО ШТОРМА И ДАННЫЕ

Для исследования активности ВГВ нами был выбран шторм в октябре 2018 г. в Балтийском море. Атмосферные возмущения на высотах тропосферы характеризовались сильными порывами ветра, достигающими 8 баллов по шкале Бофорта. 21 октября 2018 г. сформировавшийся в Атлантическом океане шторм начал движение на восток и достиг южной Балтики к 5 UT 23 октября 2018 г., где существовал до ~23 UT 24 октября. Пространственный размер возмущения составлял около 300 км². Основное внимание уделялось области

метеорологического шторма $\sim 55\text{--}60^\circ \text{ N}$, 15° E 22–23 октября 2018 г.

На рис. 1 представлены изменения температуры в дневное и ночное время 20–27 октября 2018 г. по данным SABER в европейском регионе ($40\text{--}60^\circ \text{ N}$, $0\text{--}20^\circ \text{ E}$) в области высот 80–105 км. Заметим, что под ночными часами мы подразумеваем интервал от 21:00 одного дня до 08:00 UT следующего дня. Например, ночь 22 октября — это время от 21 до 24 UT 22.10.2018 г. и от 0 до 8 UT 23.10.2018 г.

В дневное время отчётливо видно увеличение температуры на высотах от 80 до 88 км и её уменьшение на высотах от 93 до 104 км в первые дни метеорологического шторма. Подобное, но менее выраженное поведение температуры отмечается и в ночное время. Заметим, что повышение температуры в области мезопаузы началось до формальной даты прихода шторма в исследуемую область. Такое изменение фоновой температуры можно объяснить тем, что возмущение в виде ВГВ от центра метеосторма распространяется не вертикально [Куницын и др., 2015; Кшевский и др., 2023]. Такие изменения в параметрах нейтральной атмосферы в отсутствие геомагнитной возмущённости связаны с волновой активностью.

Для дальнейшего анализа, учитывая географию области метеорологического возмущения, отбирались профили температуры по данным SABER/TIMED в широтно-долготном регионе $50\text{--}60^\circ \text{ N}$, $15\text{--}20^\circ \text{ E}$ в течение нескольких дней в октябре 2018 г., включающих дни шторма, без пространственного и временного осреднения.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В метеорологически спокойные дни 18 и 20 октября, предшествующие шторму, плотность потенциальной энергии невелика и не превышает 300 Дж/кг. Из рис. 2 можно отметить присутствие двух областей на высотах 60–65 км и 80–83 км с увеличенными значениями E_p по сравнению со значениями в метеорологически спокойные дни. При этом максимум энергосвыделения расположен на высотах 93–97 км. Характерные горизонтальные размеры локальных максимумов E_p составляют около 400–500 км. Температурные профили спутникового зондирования 22 октября, используемые для расчётов E_p , получены в 23:26–26:30 UT, когда передний фронт шторма достиг 10° E . Во время метеорологического возмущения (22–24 октября) плотность потенциальной энергии увеличивается и на высотах 90–100 км достигает 500 Дж/кг. Расширяется и горизонтальная область волнового возмущения, которая максимальна 23 октября. Характерный размер этой области на высоте 92 км составляет около 1000 км и несколько меньше — на 97 км. К 24 октября величина потенциальной энергии уменьшается и не превосходит значений в спокойный день 18 октября. Интересно выглядит пространственное распределение E_p на 97 км 24 октября. Резкая граница, разделяющая области максимума и минимума плотности энергии, может свидетельствовать о преимущественно долготной ориентации области волнового возмущения.

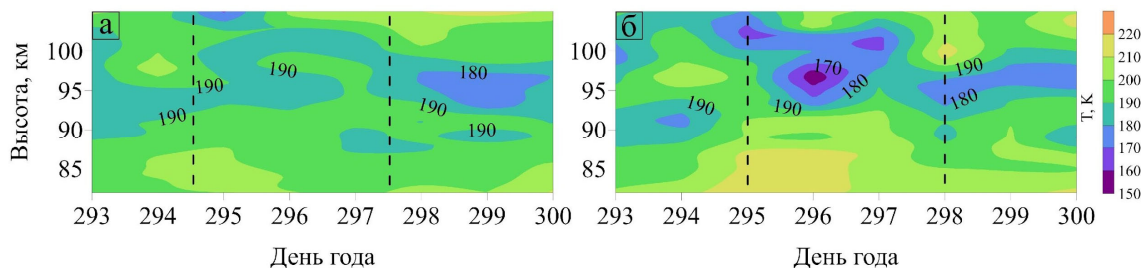


Рис. 1. Вариации температуры в ночное (а) и дневное (б) время по данным SABER/TIMED. Время начала и окончания шторма выделено вертикальными штриховыми линиями

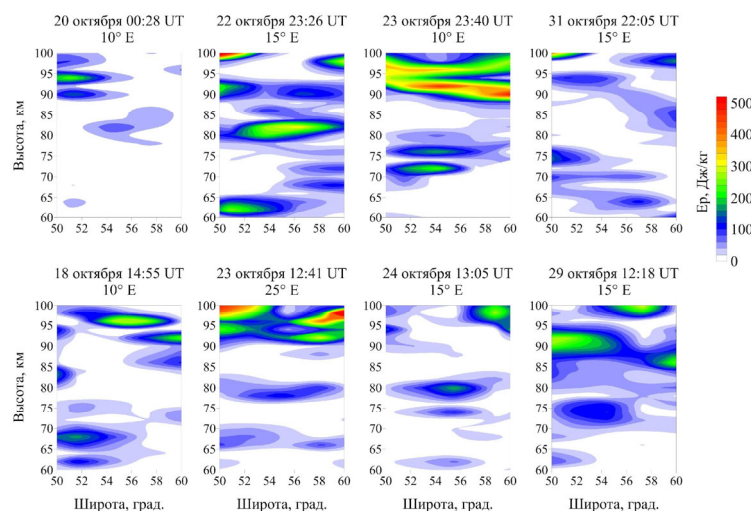


Рис. 2. Изменения потенциальной энергии ВГВ в различные дни октября 2018 г. в ночное время (верхняя панель) и в дневное время (нижняя панель)

Обрушение ВГВ и образование турбулентных областей в нижней термосфере приводит к значительным тепловым и динамическим эффектам. Изменения в нейтральной составляющей верхней атмосферы приводят и к заметным изменениям ионосферных параметров.

ВГВ, распространяющиеся из области конвективных процессов в нижней атмосфере, в частности, метеосторма, могут усиливать турбулентные процессы на высотах верхней мезосферы и нижней термосферы. Амплитуда ВГВ увеличивается по мере уменьшения плотности атмосферы с высотой. При достижении определенного порогового значения [Fritts et al., 2003] волна становится неустойчивой и разрушается, образуя турбулентные области.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты исследования спутниковых наблюдений температуры в период прохождения метеорологического шторма над Балтийским морем в октябре 2018 г.

Результаты анализа 186 температурных профилей, отобранных из массива экспериментальных данных SABER/TIMED, для исследуемой области позволили определить эффекты метеорологического шторма на высотах мезосферы и нижней термосферы. Так, в дни метеорологического шторма отчетливо видно увеличение температуры на высотах от 80–88 км и её уменьшение на высотах 93–104 км.

Рассчитанные значения плотности потенциальной энергии ВГВ (E_p) показали, что над областью метеорологического шторма на высотах мезопазы–нижней термосферы (90–100 км) величина E_p значительно увеличивается, по сравнению со спокойными днями до и после шторма. Пространственные размеры области волнового возмущения, соответствующие большим значениям E_p , в период шторма увеличиваются с 400–500 км до 1000 км на высотах мезосферы и нижней термосферы. Широко-высотное распределение E_p демонстрирует устойчивые области повышенных значений плотности потенциальной энергии на высоте 62–63 и 80–84 км во все рассматриваемые дни.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-77-10004, <https://rscf.ru/project/23-77-10004/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бахметьева Н.В., Жемяков И.Н., Григорьев Г.И., Калинина Е.Е. Влияние природных факторов на температуру нижней термосферы // *Хим. физика*. 2023. Т. 42, № 10. С. 50–63. doi 10.31857/S0207401X23100023
- Карпов И.В., Борчевкина О.П., Дадашев Р.З., Ильминская А.В. Влияние метеорологических штормов на параметры ионосферы в Балтийском регионе в 2010 г. // *Солнечно-земная физика*. 2016. Т. 2, № 2. С. 64–68. doi 10.12737/18653
- Кшевцевский С.П., Курдяева Ю.А., Гаврилов Н.М. Приближение коротких по вертикали волн малой амплитуды в атмосфере с учетом среднего ветра // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2023. Т. 59, № 1. С. 44–54. doi 10.31857/S0002351523010078
- Куницын В.Е., Крысанов Б.Ю., Воронцова А.М. Генерация акустико-гравитационных волн различными источниками на поверхности Земли // *ВМУ. Серия 3. Физика. Астрономия*. 2015. № 6. С. 112–119.
- Шалимов С.Л., Захаров В.И., Соловьева М.С. и др. Волновые возмущения нижней и верхней ионосферы во время тропического циклона Faxai 2019 г. // *Геомагнетизм и аэрономия*. 2023. Т. 63, № 2. С. 216–226. doi 10.31857/S0016794022600442
- Borchevkina O.P., Adamson S.O., Dyakov Y.A. et al. The influence of tropospheric processes on disturbances in the D and E ionospheric layers // *Atmosphere*. 2021. V. 12, N 9. P. 1116. doi 10.3390/atmos12091116
- Fritts D.C., Bizon C., Wern, J.A., Meyer C.K. Layering accompanying turbulence generation due to shear instability and gravity-wave breaking // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108, N D8. doi 10.1029/2002JD002406
- Koucká Knížová P., Podolská K., Potužníková K. et al. Evidence of vertical coupling: meteorological storm Fabienne on 23 September 2018 and its related effects observed up to the ionosphere // *Ann. Geophys.* 2020. V. 38, N. 1. P. 73–93. doi 10.5194/angeo-38-73-2020.
- Remsberg E.E., Marshall B. T., Garcia-Comas M. et al. Assessment of the quality of the Version 1.07 temperature-versus-pressure profiles of the middle atmosphere from TIMED/SABER // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113, iss. D17. P. D17101. doi 10.1029/2008JD010013

РАССЕЯНИЕ СВЕТА АТМОСФЕРНЫМИ МНОГОГРАННЫМИ КРИСТАЛЛАМИ

И.В. Ткачев, А.В. Коношонкин, В.А. Шишко, Д.Н. Тимофеев, Н.В. Кустова

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Россия, tiv@iao.ru

LIGHT SCATTERING BY ATMOSPHERIC POLYHEDRAL CRYSTALS

I.V. Tkachev, A.V. Konoshonkin, V.A. Shishko, D.N. Timofeev, N.V. Kustova

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia, tiv@iao.ru

Аннотация. Решение проблемы рассеяния света на атмосферных ледяных кристаллах имеет важное значение для анализа результатов лазерного зондирования атмосферы в различных точках мира, включая г. Томск. В настоящем исследовании мы представляем результаты расчётов матриц обратного рассеяния света для атмосферных ледяных кристаллов произвольной формы, имеющих 15, 20 и 40 граней и размеры от 10 до 300 мкм в рамках приближения физической оптики. Были проведены расчёты для частиц с хаотической пространственной ориентацией при однократном рассеянии света на длинах волн 0,532 мкм и 1,064 мкм. Результаты показали незначительные отличия в оптических свойствах исследуемых частиц с разным количеством граней. Выяснили, что оптические характеристики эталонной частицы из базы данных ИОА СО РАН соответствуют рассматриваемому распределению. Таким образом, исследование подтверждает целесообразность использования данной базы данных для анализа широкого спектра частиц от 15 до 40 граней.

Ключевые слова: рассеяние света, поглощение, атмосферные ледяные частицы, перистые облака, лазерное зондирование, лидар.

Abstract. Solving the light scattering problem on atmospheric ice crystals is important for analyzing the results of laser sensing of the atmosphere in various parts of the world, including Tomsk. In this study, we present the results of calculation of backscattering matrices for atmospheric ice crystals of arbitrary shape having 15, 20 and 40 facets and sizes from 10 to 300 microns within the physical optics approximation. Calculations were done for particles with a chaotic spatial orientation with a single scattering of light at wavelengths of 0.532 microns and 1.064 microns. The results show slight differences in the optical properties of the studied particles with different numbers of facets. It has been found out that the optical characteristics of the reference particle from the IOA SB RAS database correspond to the distribution under consideration. Thus, the study confirms the feasibility of using this database to analyze a wide range of particles from 15 to 40 facets.

Keywords: light scattering, absorption, atmospheric ice crystals, cirrus clouds, laser sensing, lidar.

ВВЕДЕНИЕ

Повышенный интерес к перистым облакам среди научного сообщества обусловлен, с одной стороны, их большим влиянием на климат нашей планеты [Baker, 1997; Wendling et al., 1979; Liou, 1986], с другой — необходимостью их учета при интерпретации данных дистанционного зондирования Земли из космоса [Zabukovec et al, 2021]. Несмотря на длительные попытки разрешить проблему рассеяния света на ледяных кристаллических частицах перистых облаков, решение до сих пор не найдено, в отличие от жидкокапельных облаков, для которых решение можно легко получить в рамках теории Лоренца-Ми [Wiscombe, 1980].

Для решения данной задачи была разработана программа и описан метод на основе принципов физической оптики, созданный в Институте оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН (ИОА СО РАН) [Shishko, 2019]. Этот метод был выбран для создания оптической модели ледяных частиц перистых облаков, поскольку он применим для частиц, размеры которых превышают длину волны падающего излучения.

С использованием метода физической оптики была создана база данных матриц обратного рассеяния света ИОА СО РАН [Ткачев и др., 2021] (далее БД), однако в ней до сих пор отсутствуют определенные типы частиц, встречающиеся на снимках, сделанных в полевых экспедициях. К ним относятся частицы произвольной формы [Shishko, 2019]. Для построения БД было решено использовать частицу со

средними оптическими характеристиками, описанную в работе [Shishko, 2019], в качестве эталона (рис.1). Однако выбор этой частицы был основан на оптических характеристиках, полученных в геометрическом приближении, поэтому необходимо сравнить оптические характеристики эталонной частицы и множества других частиц произвольной формы, но уже рассчитанных в рамках физического приближения. Кроме того, не было проведено исследование о влиянии количества граней у частиц произвольной формы на оптические характеристики обратного рассеяния света. Все это необходимо для проверки имеющихся в БД оптических характеристик частиц неправильной формы.

Таким образом, целью данной работы является расчет оптических характеристик множества частиц произвольной формы в рамках физического приближения и их сравнение с характеристиками эталонной частицы из БД ИОА СО РАН, а также анализ влияния количества граней у частиц на оптические характеристики обратного рассеяния света.

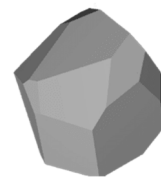


Рис. 1. Геометрическая форма эталонной частицы, используемая в БД в качестве произвольной формы

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для исследования были разработаны трехмерные модели частиц (2000 шт.), характеристики которых были определены случайным образом.

Для создания модели частицы произвольной формы с 15 гранями в 2018 г. был использован определенный алгоритм. Сначала на определенном расстоянии от центра координат было построено несколько плоскостей, выбранных случайным образом. Затем частица была определена как набор точек пространства между начальной точкой и построенными плоскостями. Расстояние до каждой плоскости было выбрано случайным образом из заранее заданного диапазона. Этот метод позволил создать набор частиц с 15 гранями.

Для генерации частиц с 20 и 40 гранями был использован усовершенствованный алгоритм. Была выбрана центральная точка, вокруг которой строились две сферы с различными радиусами. Затем между этими сферами случайным образом были выбраны точки в пространстве, количество которых соответствовало необходимому числу граней. После этого проводились линии от центральной точки до остальных точек, которые были перпендикулярны к плоскостям, проходящим через эти точки. Таким образом пересечения всех плоскостей образовывались плоскости частицы. В результате случайным образом были выбраны частицы с 20 и 40 гранями, в количестве 140 штук для каждого типа частиц.

В качестве примера на рис. 2 представлена геометрическая форма некоторых частиц с разным количеством граней $N = 15$, $N = 20$, $N = 40$.

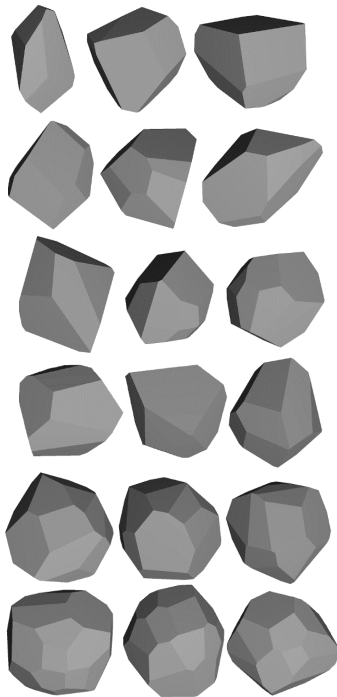


Рис. 2. Геометрические формы произвольных частиц, используемых в расчётах, с разным количеством граней (N), слева направо: $N = 15$, $N = 20$, $N = 40$

На практике значимыми являются измеряемые лидаром оптические параметры, а именно:

спектральные (χ), деполаризационные (δ) и лидарные (η) отношения. На рис. 3 представлены:

а) Зависимость спектрального отношения (длины волн 1,064/0,532) от размера частицы D_{\max} ,

б) Диаграмма рассеяния для спектрального (длины волн 1,064/0,532) и деполаризационного отношений (0,532 мкм) для различных форм ледяных частиц,

в) Диаграмма рассеяния для лидарного и деполаризационного отношений (длина волны 0,532 мкм) для различных форм ледяных частиц.

Из рис. 3 видно, что такой подход позволяет различить гексагональные частицы от частиц произвольной формы и дроксталлов, а также показывает, что частицы произвольной формы с разным числом граней располагаются в той же области, что и эталонная частица, что подтверждает возможность её использования в качестве эталона для банка данных.

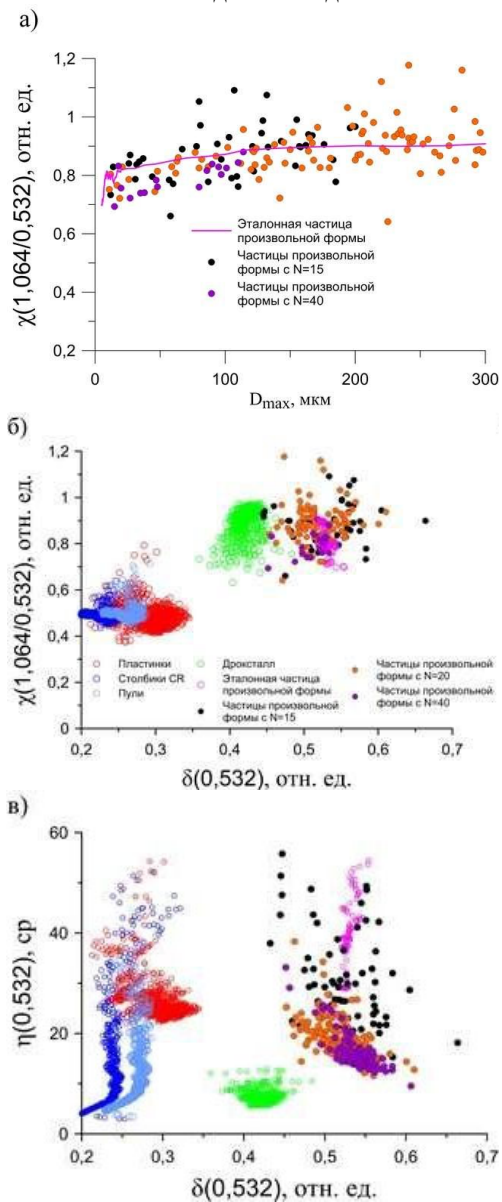


Рис. 3. Зависимости спектрального отношения (χ) от размера частицы D_{\max} ; χ от линейного деполаризационного отношения (δ) и лидарного отношения (η) от δ . Обозначения 1,064 и 0,532 соответствуют длинам волн падающего излучения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе исследования было проведено сравнение набора частиц из 15, 20 и 40 граней с эталонной частицей. Анализ показал, что частицы из различных наборов плотно приближаются к графику эталонной частицы, что подтверждает правильность выбора эталона для банка данных. График линейного деполяризационного отношения демонстрирует равномерное распределение частиц вокруг эталонной частицы независимо от количества граней. Такие результаты подтверждают возможность интерпретации данных лазерного зондирования атмосферы с использованием банка данных для эталонной частицы. Диаграммы спектрального отношения и лидарного отношения от линейного деполяризационного отношения позволяют определить тип частицы независимо от ее размеров без необходимости знания ее формы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ткачев И.В., Тимофеев Д.Н., Кустова Н.В., Коношонкин А.В. Банк данных матриц обратного рассеяния света

на атмосферных ледяных кристаллах размерами 10–100 мкм для интерпретации данных лазерного зондирования // Оптика атмосф. и океана. 2021. Т. 34, № 03. С. 199–206.

Baker B.M. Cloud microphysics and climate // Science. 1997. V. 276. P. 1072–1078.

Zbukovec A., Ancellet G., Penner I.E., Arshinov M., Kozlov V., Pelon J., Paris J.-D., Kokhanenko G., Balin Y.S., Chernov D., Belan B.D. Characterization of aerosol sources and optical properties in Siberia using airborne and spaceborne observations // Atmosphere. 2021. V. 12 (2), art. no. 244.

Liou K.N. Influence of cirrus clouds on weather and climate processes: A global perspective // Mon. Wea. Rev. 1986. V. 114, N 6. P. 1167–1199.

Shishko V.A., Konoshonkin A.V., Kustova N.V., Timofeev D.N., Borovoi A.G. Coherent and incoherent backscattering by a single large particle of irregular shape // Opt. Express. 2019. V. 27, N 23. P. 32984–32993.

Wendling P., Wendling R., Weickmann H.K. Scattering of solar radiation by hexagonal ice crystals // Appl. Opt. 1979. V. 18. P. 2663–2671.

Wiscombe W.J. Improved Mie scattering algorithms // Appl. Opt. 1980. V. 19. P. 1505–1509.

РЕГИСТРАЦИЯ ДВУХ СОБЫТИЙ МЕЗОСФЕРНОГО БОРА В СВЕЧЕНИИ НОЧНОГО НЕБА НАД ЯКУТИЕЙ

О.В. Тыщук, И.И. Колтовской, С.В. Николашкин

Институт космофизических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера
Сибирского отделения Российской академии наук, Якутск, Россия,
oleSmile@mail.ru

DETECTION OF TWO MESOSPHERIC BORES IN THE NIGHTGLOW OVER YAKUTIA

Tyshchuk O.V., Koltovskoi I.I., Nikolashkin S.V.

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy of Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia,
oleSmile@mail.ru

Аннотация. В работе представлено описание двух случаев наблюдения, так называемых мезосферных боров, представляющих собой выделяющийся волновой фронт, по данным регистрации свечения ночного неба камерами всего неба над центральной частью Якутии (северо-восточная часть Сибири). Целью работы является изучение особенности распространения и механизма формирования этого явления. В первом случае описывается проявление бора в излучениях молекул гидроксила ОН на уровне мезопаузы (высота 87 км.) и зеленой линии атомарного кислорода [OI] (высота 97 км.). Во втором случае представлено описание бора, зарегистрированное в эмиссии молекул гидроксила ОН. Рассчитаны такие параметры как: длина волны, фазовая скорость распространения, период волны, направление распространения, время и продолжительность явления. Обсуждаются возможные источники формирования мезосферного бора.

Ключевые слова: мезосферный бор, внутренние гравитационные волны, свечение ночного неба, камера всего неба, эмиссия гидроксила.

Abstract. The study presents a description of two events of observation of the so-called mesospheric bores, representing a prominent wave front, based on the recording of the night airglow by all-sky cameras over the central part of Yakutia (north-eastern part of Siberia). The purpose of the work is to study the features of the distribution and formation mechanism of this phenomenon. In the first event, manifestation of the bore in the emissions of hydroxyl OH molecules at the level of the mesopause (altitude 87 km) and the green line of atomic oxygen [OI] (altitude 97 km) is described. The second event presents a description of bore recorded in the emission of hydroxyl OH molecules. We calculated the following parameters: wavelength, phase velocity of propagation, wave period, direction of propagation, time and duration of the phenomenon. Possible sources of formation of the mesospheric bore are discussed.

Keywords: mesospheric bore, internal gravity waves, night airglow, all-sky camera, hydroxyl emission.

ВВЕДЕНИЕ

Среди обычных волновых возмущений в мезосфере изредка можно заметить проявление выделяющейся одиночной волны, так называемого мезосферного бора. Это явление представляет собой явный фронт, за которым, чаще всего, последовательно распространяются внутренние гравитационные волны [Loughmiller, 2006]. Такое усиление волновых возмущений может влиять на потоки импульса и энергии, и тем самым воздействовать на тепловой режим и состав на всех уровнях атмосферы. Мезосферный бор можно наблюдать на изображениях свечения ночного неба в эмиссии молекул ОН на высоте ~87 км, Na на высоте ~90 км, O₂ на высоте ~94 км и OI на высоте ~96 км. При прохождении бора по горизонтальному волноводному каналу на высоте между Na и O₂, два нижних слоя свечения, ОН и Na, демонстрировали усиление яркости фронта и его последовательного волнового поля, два верхних слоя свечения, O₂ и OI, демонстрировали противоположный эффект [Taylor, 1995]. Такую структуру слоев называют мезосферными инверсионными слоями (mesospheric inversion layers — MIL). По интенсивности свечения относительно стабильного состояния слоя, мезосферные боры классифицируют на светлые и темные [Hozumi, 2019]. Такое различное их проявление зависит от высоты распространения бора относительно MIL [Medeiros, 2005].

Целью работы является изучение особенности распространения и механизма формирования мезосферного бора по данным съемок камер всего неба в географических условиях территории Якутии. Результаты работы важны для накопления общемировой статистики этих явлений, что поможет в дальнейшем внести ясность в причины образования этого явления и их влияние на общую циркуляцию атмосферы.

АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Регистрация волновых процессов в свечении ночного неба осуществлялась с помощью цифровых камер всего неба, размещенных на полигоне Маймага (63.0° N, 129.5° E).

Первая камера создана на базе ПЗС-камеры «СТ-6», в которой используется объектив «рыбий глаз» с широкополосным стеклянным фильтром, пропускающим свет в ближней инфракрасной области спектра (660–1000 нм) [Ammosov, 2003]. В данном диапазоне высвечиваются полосы молекул гидроксила ОН. Камера имеет разрешение 241×250 пикселей. Интервал съемки между кадрами равен 3 мин при длительности экспозиции в 150 с.

Вторая камера всего неба является усовершенствованной версией камеры «СТ-6». Используется ПЗС-камера «СТ-9» с разрешением 512×512 пикселей.

Интервал съемки между кадрами равен 1 мин при длительности экспозиции в 20 с.

Третья камера всего неба «Keo Sentry» состоит из ПЗС-камеры «EMCCD PI Acton ProEM 1024B» и шести интерференционных фильтров [Иевенко, 2022]. В данной работе использовался фильтр, центрированный на длину волны 557.7 нм [OI]. Камера имеет разрешение 1024×1024 пикселей. Длительность экспозиции равна 10 с.

Для того чтобы лучше анализировать данные по изображениям камеры всего неба используется метод временного дифференцирования (time differencing — TD) [Swenson, 1994]. Изображение TD представляет собой разницу между интенсивностью пикселей двух последующих кадров. Для изображений с частотой съемки меньше, чем период волновых возмущений, применяется модифицированный метод TD. Обработка данных проводилась пакетом программ [Тыщук, 2023] собственной разработки на языке программирования Python.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Первое событие мезосферного бора зарегистрировано 19 ноября 2017 г. камерами всего неба «ST-6» и «Keo Sentry» (рис. 1).

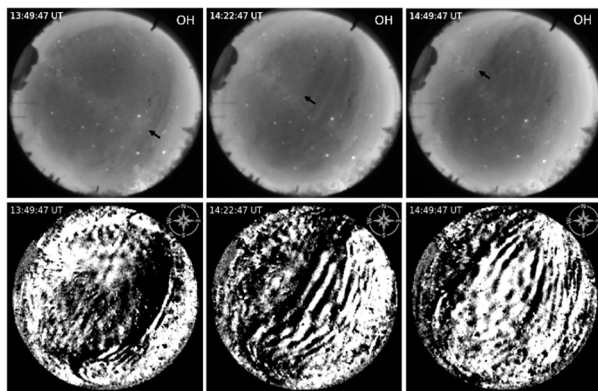


Рис. 1. Изображения в эмиссии OH по камере всего неба «ST-6» на которых видно движение мезосферного бора 19 ноября 2017 г. в 13:49 UT (появление бора), 14:22 UT (бор в зените камеры) и 14:49 UT (уход бора из поля зрения камеры). На верхних кадрах показаны необработанные изображения. Темный мезосферный бор и его направление распространения указаны черными стрелками. На нижних кадрах представлены изображения TD

На верхней серии кадров рис. 1 виден четкий фронт волны, разделяющий небо на светлую и темную области. Этот фронт является темным бором, означающий, что канал расположен ниже слоя OH, соответственно высота распространения мезосферного бора меньше 87 км. Для подтверждения этой гипотезы были проанализированы спутниковые данные Aura Microwave Limb Sounder (MLS). За фронтом волны последовательно распространяются ВГВ. Азимут распространения $\sim 290^\circ$ (северо-запад). Горизонтальная фазовая скорость мезосферного бора ~ 66 м/с. Время наблюдения составило 1 ч 18 мин. Последовательно распространяющиеся за мезосферным бором волны наблюдались до 16:10 UT. Их длина волны равна ~ 27 км.

Еще одно событие мезосферного бора было зарегистрировано 30 января 2022 г. по камере всего неба «ST-9» (рис. 2).

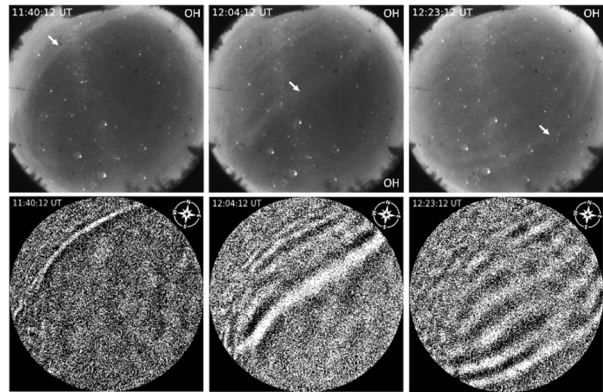


Рис. 2. Изображения в эмиссии OH по камере всего неба «ST-9» на которых видно движение мезосферного бора 30 января 2022 г. в 11:40 UT (появление бора), 12:04 UT (бор в зените камеры) и 12:23 UT (уход бора из поля зрения камеры). На верхних кадрах показаны необработанные изображения. Светлый мезосферный бор и его направление распространения указаны белыми стрелками. На нижних кадрах представлены изображения TD

На серии кадров рис. 2 виден четкий фронт волны, разделяющий небо на темную и светлую области. В отличие от предыдущего рассматриваемого события, фронт является светлым бором. Это подразумевает, что его волноводный канал расположен выше слоя OH. Можно предположить, что бор распространялся на высотах между слоями излучения молекул гидроксидов OH и молекул атомарного кислорода OI (87 и 96 км). Стрелки белого цвета указывают направление распространения мезосферного бора, которое равно $\sim 140^\circ$ (юго-восток). Горизонтальная фазовая скорость мезосферного бора составила ~ 86 м/с. Время наблюдения 1 ч 23 мин. После ухода бора за горизонт, последовательно распространяющиеся волны перестали отображаться в $\sim 12:53$ UT. Длина последовательных ВГВ составляет ~ 34 км.

Источники генерации бора и ВГВ можно классифицировать на: орографические волны (распространяются против зонального фонового ветра) [Nakamura, 1999] и неорографические волны (распространяются преимущественно меридионально вследствие геострофической коррективы струйных течений) [Plougonven, 2014]. Для рассматриваемых в данной работе случаев были рассмотрены синоптические карты Арктического и антарктического научно-исследовательского института (АНИИ) [Иванов, 2021], глобальные карты ветров и погодных условий по данным NCEP (National Centers for Environmental Prediction) [Beccario, 2024].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе изучены механизмы и особенности явления мезосферного бора. Были выявлены два события, наблюдавшиеся в северных широтах над центральной частью Якутии. Предполагаемым источником генерации мезосферного бора 19 ноября 2017 г. являлись орографические особенности

местности. Генерация мезосферного бора 30 января 2022 г. возможно была вызвана неорографическими источниками, а именно быть результатом сдвиговой неустойчивости, вызванной мелкомасштабными турбулентными движениями, либо противоположно направленными системами тропосферного струйного течения и стратосферного полярного вихря.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Иевенко И.Б., Парников С.Г. Связь динамики SAR-дуги с суббуравой инжекцией по наблюдениям полярных сияний. Магнитосферные явления в окрестности плазмоспаузы // Геомагнетизм и аэрономия. 2022. Т. 62, № 2. С. 171–188. doi:10.31857/S0016794022020092.
- Тыщук О.В., Колтовской И.И. Разработка программы для обработки и анализа данных камеры всего неба на языке Python / Материалы научной конф. студентов, аспирантов и молодых ученых XXV Лаврентьевских чтений Республики Саха (Якутия). Якутск, 10–13 апреля 2023 г. Якутск: Изд-во СВФУ. 2023. С. 82–85.
- Ammosov P.P., Gavrilyeva G.A. Observations of short-term waves with an all sky camera in the infrared oh brightness over Yakutsk / Physics of Auroral Phenomena: Proc. XXVI Annual Seminar. Apatity, 15–18 February 2003. P. 179–181. 2003.
- Hozumi Y., Saito A., Sakanoi T. et al. Geographical and seasonal variability of mesospheric bores observed from the International Space Station // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2019. V. 124. P. 3775–3785. doi:10.1029/2019JA026635.
- Loughmiller P.J., Hickey M.P., Kelley M.C. et al. Observational and modeling study of mesospheric bores. 2006.
- Medeiros A.F., Fechine J., Buriti R.A. et al. Response of OH, O₂ and OI5577 airglow emissions to the mesospheric bore in the equatorial region of Brazil // Adv. Space Res. 2005. V. 35, N 11. P. 1971–1975. doi:10.1016/j.asr.2005.03.075.
- Nakamura T., Higashikawa A., Tsuda T., Matsushita Y. Seasonal Variations of gravity wave structures in OH airglow with a CCD imager at Shigaraki // Earth Planets Space. 1999. V. 51, N 7–8. P. 897–906.
- Plougonven R., Zhang F. Internal gravity waves from atmospheric jets and fronts // Rev. Geophys. 2014. V. 52. P. 33–76.
- Swenson G.R., Mende S.B. OH emission and gravity wave (including a breaking wave) in all-sky imagery from Bear Lake // Geophys. Res. Lett. 1994. V. 21, N 20. P. 2239–2242.
- Taylor M.J., Turnbull D.N., Lowe R.P. Spectrometric and imaging measurements of a spectacular gravity wave event observed during the ALOHA-93 campaign // Geophys. Res. Lett. 1995. V. 20. P. 2849–2852. doi:10.1029/95GL02948.
- Иванов В.В., Алексеенков Г.А. Приземные и высотные метеорологические карты. ОДМП ААНИИ. <https://www.aari.ru/data/realtime>. 2021.
- Cameron Beccario. Earth: a visualization of global weather conditions. <https://earth.nullschool.net>. 2024.

ФОТОМЕТРИЧЕСКАЯ КАЛИБРОВКА ИНТЕРФЕРОМЕТРОВ ФАБРИ-ПЕРО НГК РАН ПО ЗВЕЗДАМ

А.Д. Шелков, М.Ф. Артамонов

¹Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия, alshel@iszf.irk.ru

NHC RAS FABRY-PEROT INTERFEROMETERS' PHOTOMETRIC CALIBRATION USING STARS

A.D. Shelkov, M.F. Artamonov

¹Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, alshel@iszf.irk.ru

Аннотация. В данной работе представлен метод фотометрической калибровки интерферометров Фабри-Перо НГК РАН по звездам. Были проанализированы интерферограммы за 2023 – начало 2024 г. Проведен расчет количества энергии, пришедшей на входное окно интерферометра от 10 звезд. После подсчета интенсивности на матрице в отсчетах АЦП, был получен калибровочный коэффициент, применение которого к имеющимся данным по относительной интенсивности позволит перейти к абсолютным интенсивностям ночного свечения неба.

Ключевые слова: интерферометр Фабри-Перо, фотометрическая калибровка.

Abstract. This paper presents a photometric calibration method of the Fabry-Perot interferometers of the NHC RAS using stars. Interferograms from 2023 to early 2024 were analyzed. We calculated incident energy on interferometer's entry window from 10 stars. After acquiring intensity of star images in ADC counts, we derived a calibration coefficient. This coefficient can convert existing nightglow arbitrary intensity data into absolute intensities.

Keywords: Fabry-Perot interferometer, photometric calibration.

ВВЕДЕНИЕ

Фотометрическая калибровка оптических инструментов нужна, чтобы перейти от неких абстрактных относительных единиц к абсолютным значениям энергии или потока излучения. Интерферометр Фабри-Перо (ИФП) фиксирует изображение интерферограмм с помощью ПЗС-матрицы. На выходе мы видим пространственное распределение отклика матрицы и усилителя на падающее излучение в относительных единицах АЦП. Такие данные позволяют точно рассчитывать температуру и скорость ветра нейтральной компоненты, но про интенсивность свечения можно говорить только относительно.

Чтобы получить абсолютные значения интенсивности, нужно использовать некий эталонный источник излучения. Это может быть специальный калибровочный источник или хорошо изученный естественный объект или явление, например, звезда. Звезды хорошо подходят на роль калибровочного источника по нескольким причинам:

1. Звезды, если они не являются переменными, являются очень стабильными во времени источниками излучения.

2. Положение звезд на небе меняется очень слабо в течение года. Это позволяет использовать звезды не только для фотометрической калибровки, но и для пространственной калибровки монтировки.

3. Многие звезды уже хорошо изучены и есть большой массив данных о них.

РАСЧЕТ ЭНЕРГИИ ОТ ЗВЕЗД, ПРИШЕДШЕЙ НА ВХОДНОЕ ОКНО ИФП

Для получения информации об интенсивности свечения, необходимо провести фотометрическую калибровку интерферометров Фабри-Перо. Чтобы

не прерывать научную программу действующих инструментов, было решено провести калибровку по звездам используя архивные данные за 2023 и начало 2024 г. В рамках исследования использовались интерферограммы северной части неба, полученные на длине волны 630 нм.

Сперва, нужно выделить безлунные и безоблачные дни. Луна сильно повышает фоновую интенсивность, что не позволит выделить звезды. Для выделения безлунных дней использовалась утилита Mooncalc.org. Сильная облачность вносит шумы и повышает фон изображения за счет поглощения и рассеяния. Для оценки облачности использовались данные с цветной камеры Филин [Подлесный и др., 2022]. Камера направлена на север, поле зрения составляет 86 на 76 градусов. Программа обработки считает количество звезд в поле зрения — так можно оценить временные промежутки со слабой или отсутствующей облачностью.

Следующий этап — идентификация звезд. В рамках исследования использовались интерферограммы северной части неба, полученные на длине волны 630 нм. За период 2023–2024 гг. на интерферограммах было выявлено 10 звезд (табл. 1). Для этого использовалась программа Stellarium. После идентификации необходимо рассчитать количество энергии, пришедшей на входное окно интерферометра от звезды. Поверхностная спектральная плотность излучения рассчитывалась с помощью формулы Планка:

$$B(\lambda, T_{eff}) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\frac{e^{hc}}{kT_{eff}\lambda} - 1}$$

Таблица 1.
Звезды, использованные для калибровки,
и их параметры.

Звезда	m	M	$B - V$	Спектральный класс	T_{eff}, K	Расстояние, св. лет
HD 217382	4,7	-0,55	1,42	K4III	4045	365,65
HD 216446	4,75	-0,2	1,26	K3III	4371	319,14
HD 26659	5,45	0,63	0,85	G8III	5311	300,05
HD 26356	5,5	-1,11	0	B5V	10125	685,2
HD 4853	5,55	0,1	0,1	A4V	9027	268,22
HD 15036	6,65	0,09	1,36	K0	4017	669,73
HD 12918	6,45	0,78	0,95	K0	4960	443,75
HD 112014	5,8	1,63	0	A0	10125	222,18
HD 112028	5,3	0,46	0,04	A2	9443	303,4
HD 120565	5,9	0,59	0,98	G9III	4904	376,19

Для длины волны λ брался диапазон пропускающего красного фильтра интерферометра $630 \pm 0,4$ нм. Эффективная температура T_{eff} звезд, где было возможно, бралась из базы данных Simbad [Wenger et al., 2000] Для звезд без измеренной T_{eff} она рассчитывалась с использованием показателя цвета $B - V$ [Ballesteros, 2012]:

$$T_{eff} = 4600 \left(\frac{1}{0,92(B - V) + 1,7} + \frac{1}{0,92(B - V) + 0,62} \right).$$

Уравнение для потока энергии выглядит так:

$$\Phi = \int_{629,96}^{630,04} B(\lambda) d\lambda \int dA \int d\Omega.$$

Для вычисления потока энергии, приходящего от звезды на входное окно ИФП, нужно найти площадь излучающей поверхности и телесный угол:

$$A = 2\pi R^2, R = R_{Sun} \left(\frac{T_{Sun}}{T_{eff}} \right)^2 \cdot \sqrt{\frac{L}{L_{Sun}}}, \Omega = \frac{d^2}{A_{entry}}$$

Здесь R и R_{Sun} — радиусы рассматриваемой звезды и Солнца, L и L_{Sun} — их светимости, d — расстояние между ИФП и звездой, A_{entry} — площадь входного окна ИФП. Умножив получившийся поток на время экспозиции, получим количество энергии, пришедшей от звезды на входное окно ИФП.

ПОЛУЧЕНИЕ КАЛИБРОВОЧНОГО КОЭФФИЦИЕНТА

Теперь, нужно определить, сколько энергии, в терминах отсчетов АЦП, попало на матрицу интерферометра. Изображение звезды на интерферограмме вытянуто из-за отсутствия гидирования и интерференции. Более того, на фоне звезды есть множество интерференционных колец, которые мешают подсчету интенсивности в изображении звезды. Чтобы компенсировать влияние колец, был реализован следующий алгоритм:

1) На изображении находится центр интерферограммы;

2) Вручную выделяется прямоугольная область, содержащая изображение звезды;

3) Вычисляется суммарная интенсивность внутри этой области;

4) Вычисляется суммарная интенсивность в трех прямоугольных областях, отраженных относительно вертикальной и горизонтальной осей интерферограммы и относительно центра;

5) Среднее значение интенсивности этих трех областей вычитается из первого значения.

Осталось лишь составить соотношение теоретически рассчитанного количества энергии и интенсивности на матрице:

$$Calibrationcoef = \frac{\Phi t_{exp}}{I_{cam}}.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан алгоритм фотометрической калибровки астрономических интерферометров Фабри-Перо по звездам. Проведена фотометрическая калибровка Интерферометров Фабри-Перо НГК РАН по 10 звездам, попавшим в поле зрения инструмента в 2023–2024 гг. Средний калибровочный коэффициент равен $25,5 \frac{\text{фотонов/с}}{\text{y.e.}}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Подлесный С.В., Девятова Е.В., Саункин А.В., Васильев Р.В. Сопоставление методов определения облачного покрова над байкальской природной территорией в декабре 2020 г. // Солнечно-земная физика. 2022. Т. 8, № 4. С. 102–109.
- Ballesteros F.J. New insights into black bodies // Europhysics Lett. 2012. V. 97, N 3. 34008.
- Wenger M. The SIMBAD astronomical database. The CDS reference database for astronomical objects // Astronomy and Astrophys. Supplement Ser. 2000. V. 143. P. 9–22.

УДК 550.388.8

СОПОСТАВЛЕНИЕ НОЧНЫХ ВАРИАЦИЙ ПАРАМЕТРОВ НЕЙТРАЛЬНОЙ КОМПОНЕНТЫ И КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ В ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЕ

А.Д. Шелков, Р.В. Васильев, М.Ф. Артамонов, К.Г. Ратовский

Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия,
alshel@iszf.irk.ru

COMPARISON BETWEEN NOCTURNAL VARIATIONS OF THE NEUTRAL ATMOSPHERIC PARAMETERS AND ELECTRON DENSITIES IN THE UPPER ATMOSPHERE

A.D. Shelkov, R.V. Vasilyev, M.F. Artamonov, K.G. Ratovsky

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia,
alshel@iszf.irk.ru

Аннотация. В работе представлены результаты сопоставления ночных вариаций параметров нейтральной компоненты атмосферы и электронной концентрации в верхней атмосфере. Параметры нейтральной компоненты, а именно ее температура, концентрация и циркуляция брались из данных интерферометров Фабри-Перо НГК СО РАН. Электронная концентрация – из данных цифрового ионозонда DPS-4.

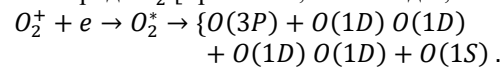
Ключевые слова: электронная концентрация, ночное свечение, ионосфера, нейтральная компонента верхней атмосферы.

Abstract. This work presents results of the comparison between the neutral atmospheric parameters and electron densities in the upper atmosphere. Neutral component's parameters, namely temperature, circulation and density were obtained by the Fabry-Perot Interferometer of the NHC of SB RAS. Electron densities were obtained by DPS-4 digisonde.

Keywords: electron density, nightglow, ionosphere, neutral component of the upper atmosphere.

Интерферометр Фабри-Перо (ИФП) КЕО Arinae позволяет с высокой точностью определять температуру и циркуляцию нейтральной компоненты атмосферы, а также ее концентрацию [Васильев и др., 2017]. Совместное измерение этих параметров и значений электронной концентрации на разных высотах позволит уточнить имеющиеся механизмы ночного хода интенсивности свечения, такие как предрассветное усиление. Так, благодаря данным с Иркутского радара некогерентного рассеяния, была выявлена высокая корреляция между интенсивностью свечения красной линии кислорода 630 нм и электронной концентрации на высотах 200–300 км. Например, на рис. 1 видно, как электронная концентрация в утренние часы начинает расти вместе с интенсивностью свечения красной линии, хотя Солнце находится на высоте приблизительно -12 градусов. Потенциальным источником электронов в это время может быть магнитосферная точка, где в этот момент уже наступил рассвет [Shepherd et al., 1973]. Интенсивность свечения красной линии 630 нм зависит от концентрации возбужденных атомов кислорода $O(1D)$ на высотах порядка 200–

300 км. Эти возбужденные атомы преимущественно появляются в результате электронного удара или диссоциативной рекомбинации молекул кислорода O_2 [Брюнелли, Намгаладзе, 1988]:



Полученные в рамках работы данные позволят уточнить имеющиеся модели транспорта энергии и вещества из магнитосферной точки, эффективные сечения реакций, ответственных за свечение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука. 1988. 528 с.

Васильев Р.В., Артамонов М.Ф., Белецкий А.Б. и др. Регистрация параметров верхней атмосферы Восточной Сибири при помощи интерферометра Фабри-Перо КЕО Scientific «Arinae» // Солнечно-земная физика. 2017. Т. 3, № 3. С. 70–87.

Shepherd G.G., Brace L.H., Whitteker J.H. Predawn Enhancement of 6300-Å Emission Observed near the Plasma-pause from the Isis-2 Spacecraft // J. Geophys. Res. 1973. V. 78, N 22. P. 4689-4695.

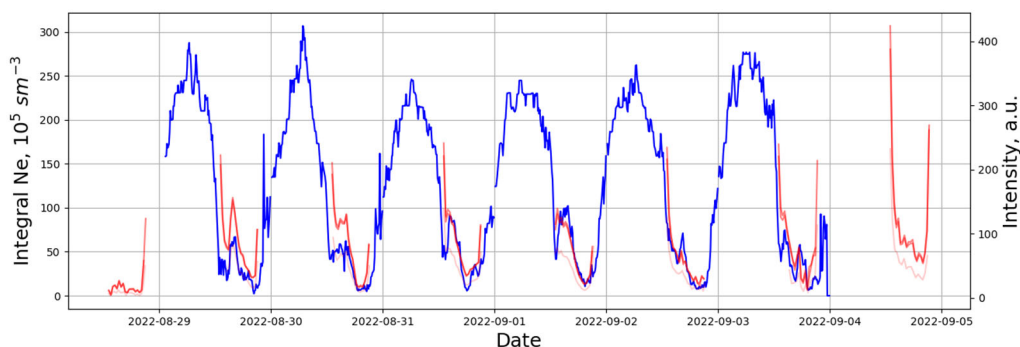


Рис. 1. Сопоставление электронной концентрации по данным Иркутского радара некогерентного рассеяния с ночным ходом интенсивности на ИФП

ВЫПОЛНИМОСТЬ УСЛОВИЯ ВМОРОЖЕННОСТИ В МАГНИТОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЯХ: АНАЛИЗ ДАННЫХ THEMIS-A

Д.А. Шубин, А.В. Рубцов, П.Н. Магер, Д. Ю. Климушкин

Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия,
d.shubin@iszf.irk.ru

IMPLEMENTATION OF THE FROZEN-IN CONDITION IN MAGNETOSPHERIC DISTURBANCES: ANALYSIS OF THEMIS-A DATA

D.A. Shubin, A.V. Rubtsov, P.N. Mager, D.Yu. Klimushkin

Institute of Solar-Terrestrial Physics of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia,
d.shubin@iszf.irk.ru

Аннотация. В работе было проведено статистическое исследование выполнимости условия вмороженности плазмы в магнитное поле. Это условие, являющееся фундаментальным в магнитной гидродинамике и физике космической плазмы, может быть записано в виде $E = -u \times B$, где E — электрическое поле, u — скорость потока частиц B — магнитное поле. Для проверки этого условия были использованы данные зонда А миссии THEMIS за март 2017 г. В ходе анализа были обнаружены случаи, когда E совпадает с $-u \times B$ как по фазе, так и по амплитуде, однако чаще наблюдаются случаи, когда этого совпадения нет. Таким образом, применять условие вмороженности при исследовании возмущений в магнитосфере следует с осторожностью, поскольку вероятной причиной несовпадения может являться большая значимость кинетических факторов.

Ключевые слова: магнитосферная плазма, условие вмороженности, THEMIS.

Abstract. In this study, we conducted a statistical study of plasma frozen-in condition in a magnetic field. This phenomenon, which is essential in magnetic hydrodynamics and cosmic plasma physics, is represented by the equation $E = -u \times B$, where E represents the electric field, u represents the particle flow velocity, and B represents the strength of the magnetic field. We used data from the March 2017 probe A of the THEMIS mission to examine this phenomenon. Subsequently, analysis revealed that there were instances where the E corresponded with the $-u \times B$ component in both phase and magnitude, although this was not consistently the case. Consequently, caution must be exercised when applying the plasma frostbite assumption to investigations of disturbances within the magnetosphere, given that significant kinetic factors may influence outcomes.

Keywords: magnetospheric plasma, freezing condition, THEMIS

ВВЕДЕНИЕ

Исследование магнитосферных возмущений (в том числе ультранизкочастотных (УНЧ) волн) является одним из ключевых направлений в физике космической плазмы. Теоретическим базисом исследования магнитосферных возмущений является магнитная гидродинамика, одним из основных уравнений которой является условие вмороженности: $E = -u \times B$, (1) где E — электрическое поле, u — скорость потока частиц B — магнитное поле. Это условие предполагает, что магнитные силовые линии «вморожены» в плазму и движутся вместе с ней [Alfvén, 1943]. Условие вмороженности считается следствием высокой проводимости космической плазмы [Gordeev et al., 2017].

Предыдущие исследования выполнимости условия вмороженности были достаточно эпизодическими и не позволили прийти к окончательному выводу: различные исследователи предоставляли аргументы как в пользу, так и против универсальной выполнимости этого условия [Lui, 2015]. Ввиду принципиальной важности этого условия в физике космической плазмы представляет большой интерес его комплексная проверка. Для решения этой задачи необходимо использовать данные космических аппаратов, поскольку они предоставляют данные как по электрическому и магнитному полю, так и по скорости частиц.

ДААННЫЕ И ИНСТРУМЕНТЫ

В рамках текущего исследования были использованы данные за март 2017 г. по зонду А многоспутниковой миссии Time History of Events and Macroscale Interactions during Substorms (THEMIS) [Angelopoulos, 2008], полученные из открытого источника CDAWeb (<https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>). В рассматриваемый период времени спутник находился в предполуденном регионе и смещался в сторону вечернего сектора, что соответствует интервалу местного магнитного времени (MLT) с 20 до 22 часов (рис. 1).

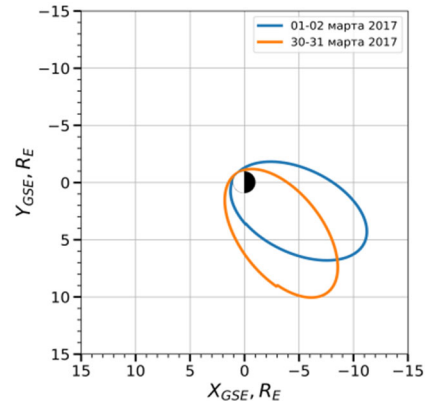


Рис. 1. Траектории движения спутника THEMIS-A в проекции на плоскость X–Y (GSE) на начало и конец марта 2017 г. MLT изменялся от 22 до 20 часов

Для проверки условия вмороженности плазмы было необходимо провести анализ на тех временных интервалах, для которых одновременно доступны значения как электрического [Bonnell et al., 2008] и магнитного [Auster et al., 2008] поля, так и скорости ионов [McFadden et al., 2008].

Среди магнитосферных возмущений большую роль играют волны Pc4-Pc5 (период 45–600 с), поэтому чтобы перейти к анализу полученных интервалов, необходимо избавиться от постоянных составляющих E и $-u \times B$. Для этого был использован метод скользящего среднего с окном в 40 мин. Чтобы избавиться от высокочастотных флуктуаций был повторно применён метод скользящего среднего, но уже с окном в 45 с. Так как в ходе работы метода теряется часть данных равная размеру окна, то для анализа использовались временные интервалы продолжительностью от одного часа.

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВМОРОЖЕННОСТИ

Чтобы определить выполнимость вмороженности плазмы, введём параметр H :

$$H = \frac{|E|^2 - |v \times B|^2}{|E|^2 + |v \times B|^2} \quad (2)$$

Параметр H позволяет оценить на сколько отличаются между собой суммарные значения по трём компонентам E и $-u \times B$. Он принимает значения в интервале $(-1; 1)$, где значения близкие к 1 говорят об преобладании E над $-u \times B$, и наоборот если значение близко к -1 . Если параметр $H \sim 0$ это говорит о схожести в фазе и амплитуде колебаний между исследуемыми величинами, что подтверждает выполнимость условия (1).

Среди проанализированных временных интервалов были случаи, для которых средний параметр H_{avg} принимал значения близкие к 0. Так, например на рис. 2 можно заметить хорошую корреляцию между E и $-u \times B$, для этого интервала $H_{avg} = 0.343$. Что говорит о значительной выполнимости условия (1). Однако чаще наблюдались случаи, когда нельзя говорить о том, что условие вмороженности выполняется, как на рис. 3, для которого $H_{avg} = 0.778$.

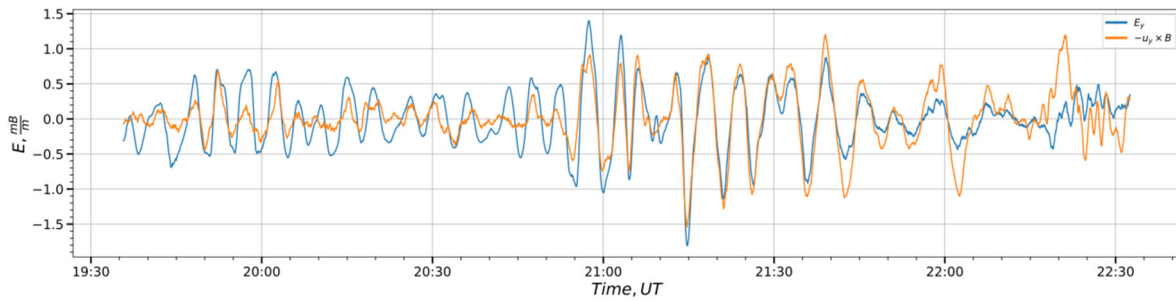


Рис. 2. Соотношение колебаний E и $-u \times B$ для временного интервала 29 марта 2017 г. с 19:35 по 22:32

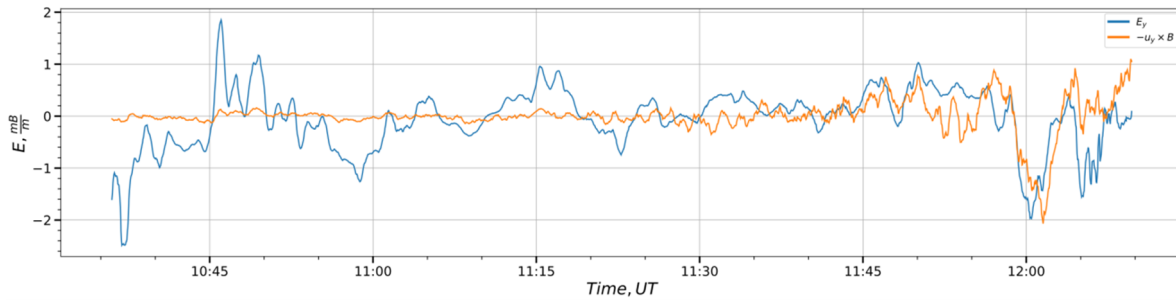


Рис. 3. Соотношение колебаний E и $-u \times B$ для временного интервала 6 марта 2017 г. с 10:36 по 12:09

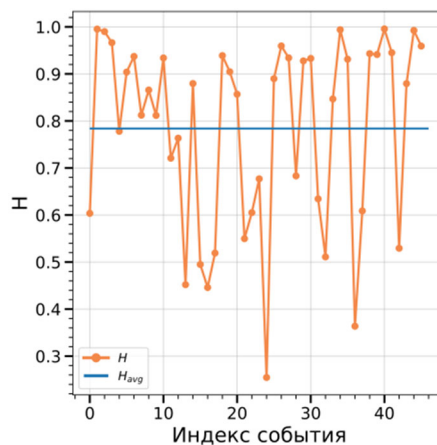


Рис. 4. Изменение среднего показателя параметра H в течении марта 2017 г. по изучаемым временным интервалам. Синей линией выделено общее среднее значение параметра H за весь месяц

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенного исследования были проанализированы 46 временных интервалов продолжительностью от одного до 12 ч (рис. 4). Был введён параметр $H(2)$, позволяющий оценить, насколько коррелируют между собой E и $-u \times B$.

Среди интервалов были обнаружены участки с небольшими значениями параметра $H_{avg} < 0.5$, для которых можно считать, что выполнимость условия вмороженности есть, хоть и не на всём исследуемом интервале. Однако противоположных случаев с $H_{avg} > 0.5$ гораздо больше, что говорит о том, что нельзя говорить об однозначном выполнении условия вмороженности. Таким образом, изучение вмороженности плазмы остаётся актуальным вопросом и требует дальнейшего изучения.

Работа выполнена при поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 22-77-10032.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Alfvén H. On the existence of electromagnetic–hydrodynamic waves // *Arkiv för matematik, astronomi och fysik*. 1943. V. 29B, N 2. P. 1–7.
- Angelopoulos V. The THEMIS Mission // *Space Sci Rev*. 2008. V. 141. P. 5–34.
- Auster H.U. et al. The THEMIS Fluxgate Magnetometer // *Space Sci Rev*. 2008. V. 141, N 1–4. P. 235–264.
- Bonnell J.W. et al. The Electric Field Instrument (EFI) for THEMIS // *Space Sci Rev*. 2008. V. 141, N 1–4. P. 303–341.
- Gordeev E. et al. On the origin of plasma sheet reconfiguration during the substorm growth phase // *Geophys. Res. Lett*. 2017. V. 44, N 17. P. 8696–8702.
- Lui A.T.Y. Dipolarization fronts and magnetic flux transport // *Geosci Lett*. 2015. V. 2, N 1. P. 15.
- McFadden J. P. et al. THEMIS ESA First Science Results and Performance Issues // *Space Sci Rev*. 2008. V. 141, N 1–4. P. 477–508.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ АТМОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Сюань Цянь*, Юнцян Яо, Хуншуан Ван

Национальные астрономические обсерватории Китайской академии наук, Пекин, Китай,
*qianxuan@nao.cas.cn

THE STUDY OF ATMOSPHERIC OPTICAL TURBULENCE

Xuan Qian*, Yongqiang Yao, Hongshuang Wang

National Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China,
*qianxuan@nao.cas.cn

Аннотация. При обследовании мест размещения, проектировании и эксплуатации современных крупных телескопов необходимо получать профиль оптической турбулентности атмосферы и оценивать его интегральные параметры. Кроме метода измерения, международное астрономическое сообщество в последние десятилетия разрабатывало методы моделирования оптической турбулентности атмосферы. Мезомасштабная метеорологическая модель используется для получения метеорологических характеристик над выбранной астроплощадкой на основе установленной взаимосвязи между метеорологическими характеристиками и параметрами оптической турбулентности; при этом можно дополнительно рассчитывать параметры оптической турбулентности, такие как C_n^2 , качество астрономических изображений (seeing), изопланатический угол, время когерентности и т.д. на основе использования моделей параметризации атмосферной оптической турбулентности. Основываясь на численной модели, мы можем построить систему прогнозирования оптической турбулентности, которая позволит не только обследовать места размещения телескопов по обширной территории, но и станет очень удобным и полезным инструментом для работы существующих обсерваторий и телескопов, а также для изучения характеристик турбулентности. В этой статье, основываясь на предыдущих исследованиях, в краткой форме обсуждаются распределения параметров оптической турбулентности атмосферы по всему Китаю.

Ключевые слова: оптическая турбулентность атмосферы, интенсивность турбулентности C_n^2 , качество астрономических изображений, длина когерентности атмосферы, изопланатический угол, время когерентности атмосферы

Abstract. In the site survey, design and operation of modern large telescopes, the atmospheric optical turbulence profile and its integral parameters need to be obtained. In addition to the measurement method, the international astronomical community has gradually developed the model method of atmospheric optical turbulence in recent decades. The mesoscale meteorological model is used to obtain the meteorological parameters at a site, through establishing the relationship between the meteorological parameters and the optical turbulence parameters, the optical turbulence parameters such as C_n^2 , seeing, isoplanatic angle, coherence time etc. can be further calculated, that's the model method of atmospheric optical turbulence parameterization. And based on numerical model, the forecast system of optical turbulence can be built, not only for site survey in broad area, but also will be of much convenience and benefits for the operation of observatories and telescopes, as well as the study of turbulence characteristics. In this paper, the distributions of atmospheric optical turbulence parameters all over China are briefly introduced in previous studies.

Keywords: atmospheric optical turbulence, turbulence intensity C_n^2 , seeing, atmospheric coherence length, isoplanatic angle, atmospheric coherence time

1. INTRODUCTION

When the light propagates in the atmosphere, the wavefront distortion of the light as well as its intensity flicker will be caused due to the existence of atmospheric optical turbulence. The main parameters describing the effect of turbulence on light are C_n^2 , seeing, atmospheric coherence time, isoplanatic angle, and so on. Through the relationship between the meteorological parameters and the optical turbulence intensity C_n^2 , the C_n^2 profile and its integral parameters can be calculated, that's the calculation method of atmospheric optical turbulence parameterization model. Using mesoscale numerical meteorological models, as well as the measurement like radiosounding balloon, the distributions of meteorological parameters above an observatory can be obtained. And combined with the turbulence parameterization model, the overall characteristics of optical turbulence above a site, as well as the regional distributions and the prediction of turbulence can be summarized. Since the 1990s, the international astronomical community has gradually developed a method to calculate and forecast the intensity of atmospheric optical turbulence using mesoscale meteorological models ([Bougeault et al., 1995; Masciadri et al., 1999a&b]).

In astronomical site survey, the model can be used to find out the optimal area with better optical turbulence conditions, and the work intensity and cost can be greatly reduced, as well as the work efficiency can be improved. Understanding the comprehensive optical turbulence characteristics of observatories can provide necessary parameters for the design and operation of the telescopes. And the prediction of optical turbulence in the local area of the observatory can be used to optimize the observation time of the telescope, and also provide guidance for the best time window of the operation of the ground-based photoelectric equipment. According to the forecast results, the optimal observation path and time can be selected by avoiding the region with strong optical turbulence. In this paper, the regional distributions of atmospheric turbulence parameters all over China are briefly introduced and presented, mainly using the numerical model.

2. METHODS

The meso-scale Weather Research and Forecast numerical model (WRF), is a completely compressible non-statics model, using Arakawa C grid points in the horizontal direction and terrain following mass

coordinates in the vertical direction. The third or fourth order Runge-Kutta algorithm is used in time integration. In the configuration of WRF model over the whole China [Wang&Qian, 2012], the time period was the whole 2010, with the horizontal spatial resolution of 30km, and the time interval of 1 hour; meanwhile, in the vertical direction, there were 50 levels covered from ground to the pressure level of 10hPa (about 30km above sea level), with the vertical resolutions range from tens of meters near the ground to nearly 1 km in the upper air. The initial meteorological input data were the FNL (Final Operational Global Analysis) and the GFS (Global Forecast System) data sets, with spatial resolutions of 1°, and the terrain data was the GEOG (Geographical data) with a spatial resolution of 30".

3. RESULTS

3.1 the structure constant of atmospheric refractive index C_n^2

The C_n^2 indicates the intensity of optical turbulence, its order can approximately predict the effect of atmospheric turbulence on optical link performance, and the effectiveness of prediction depends largely on the configuration of the link and the position of the optical transmitter and receiver. The dependence of each order is the integration of path, and a series of optical turbulence parameters affecting the optical transmission or imaging quality can be obtained by integrating the

height. The atmospheric refractive index is a passive conservative quantity, similar to the potential temperature structure constant, and there is a refractive index structure parameter, with which the relation is [Businger et al., 2011; Cherubini et al., 2008],

$$C_n^2 = \left(\frac{80 \cdot 10^{-6} P}{T^2} \right)^2 C_t^2 \quad (1)$$

and the temperature fluctuation structure constant C_t^2 can be determined by the wind shear and the potential temperature gradient,

$$C_t^2 = \langle C_t^2 \rangle_m \frac{\chi}{\langle \chi \rangle_m} \left(\frac{S}{\langle S \rangle_m} \right)^{\frac{1}{2}},$$

$$\chi = \frac{d\theta}{dz}, \quad S = \sqrt{\left(\frac{dV_x}{dz} \right)^2 + \left(\frac{dV_y}{dz} \right)^2},$$

$$\theta = T \left(\frac{1000}{P} \right)^{0.286} \quad (2)$$

S is the wind shear, χ is the gradient of potential temperature, V_x and V_y are the horizontal and vertical wind speeds, respectively, and $\langle \rangle_m$ indicates the median values of all observations at the same altitude. θ is the potential temperature, T is the temperature and P is the pressure. The potential temperature can be considered as a conserved quantity in the dry adiabatic process, which is defined as the temperature a dry air parcel would have if restored adiabatically from the existing state to a standard pressure of 1000 hPa. In Figure 2 shown the vertical and spatial distributions of C_n^2 above an area or an observatory.

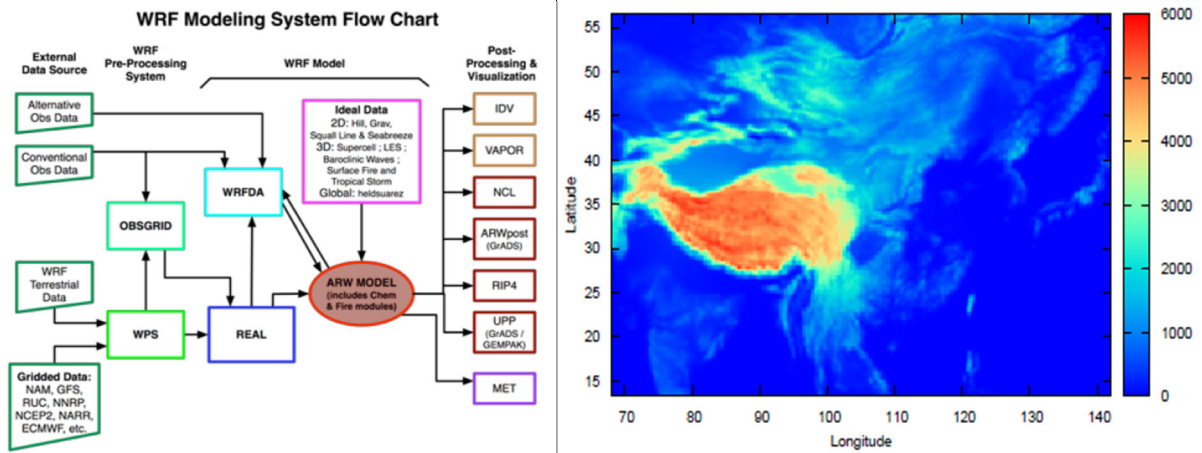


Fig. 1. The flow chart of the WRF model (left), the calculated aera over China using the WRF model (right)

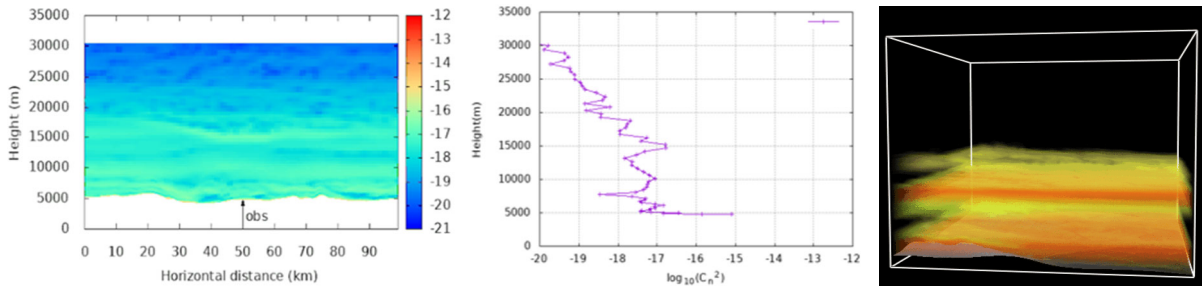


Fig. 2. The vertical distribution of C_n^2 slice at E-W direction above an observatory (left), the C_n^2 profile at a site (middle), and the spatial distribution of C_n^2 (right)

3.2 seeing

The atmospheric seeing represents the full width at half-maximum (FWHM) of the point spread function, the best angular resolution that an optical telescope can achieve in a long exposure image, corresponding to the FWHM of the blurry blob when observing a star through

the atmosphere. The seeing ε_0 can be calculated as

$$\varepsilon_0 = 5.25\lambda^{(-1)/5} \left[\int C_n^2(h) dh \right]^{3/5} \quad (3)$$

λ is the wavelength, p is the total air pressure, h is the altitude and t is the air temperature. At the excellent observatories in the mid-latitude, the typical value of seeing is usually 0.6–1.0 arcsec.

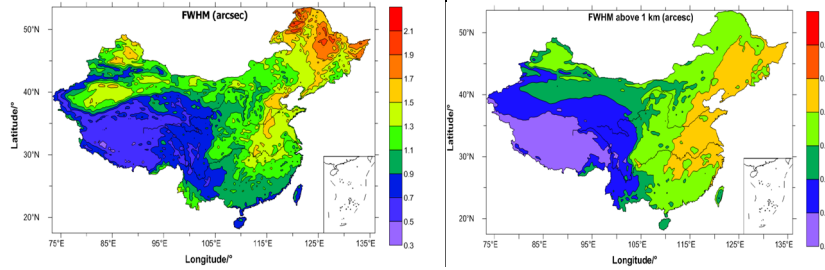


Fig. 3. The distributions of yearly mean seeing in the whole atmosphere (left) and free atmosphere (above 1km, right)

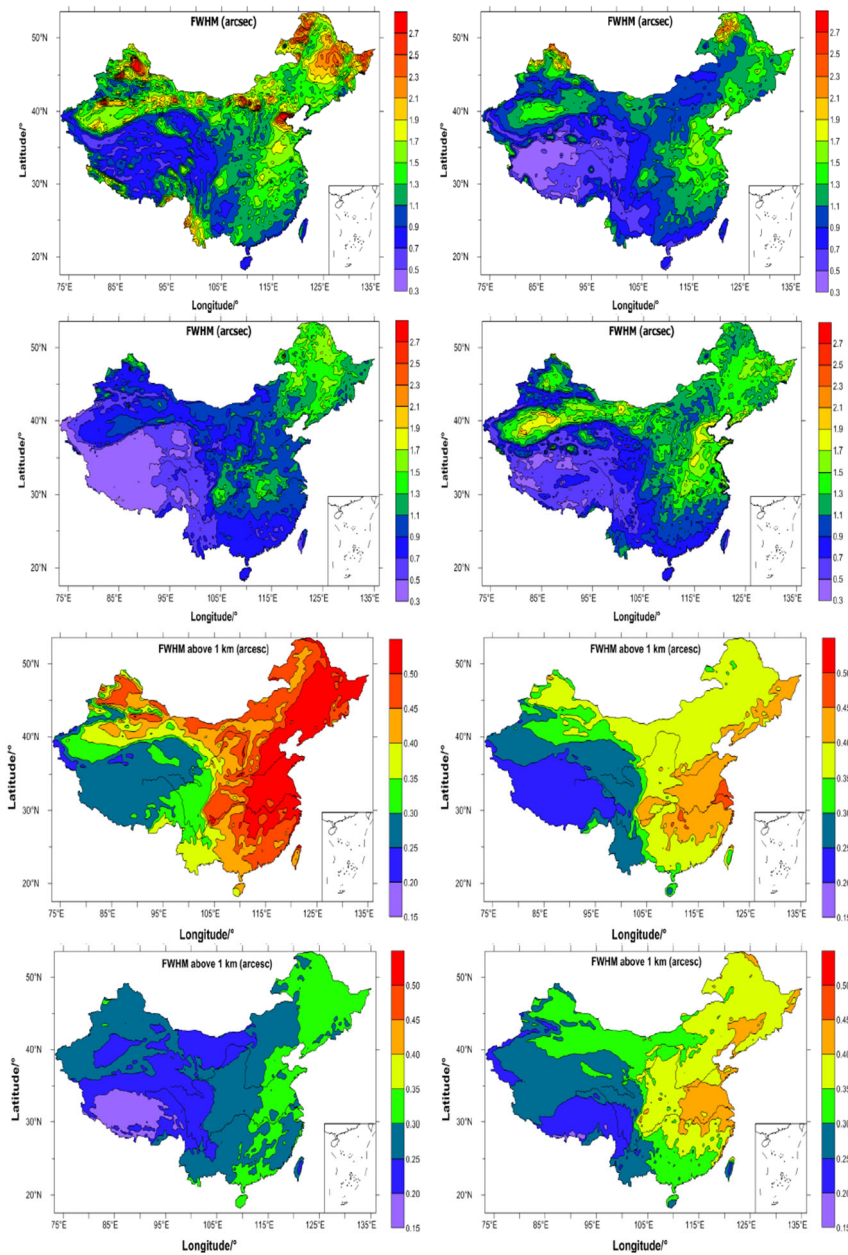


Fig. 4. The seasonal distributions of seeing in the whole atmosphere (top) and free atmosphere (bottom), from left to right are the seeing in January, April, July, and October

3.3 atmospheric coherence time and isoplanatic angle

The atmospheric coherence time τ_0 depends on C_n^2 and the wind speed profiles, while the isoplanatic angle

$$\theta_0 \text{ accounts on } C_n^2, \text{ expressed as follows,} \\ \tau_0 = 0.058\lambda^{6/5} \left[\int |V(h)|^{5/3} C_n^2(h) dh \right]^{(-3)/5}, \quad (4)$$

$$\theta_0 = 0.058\lambda^{6/5} \left[\int h^{5/3} C_n^2(h) dh \right]^{(-3)/5} \quad (5)$$

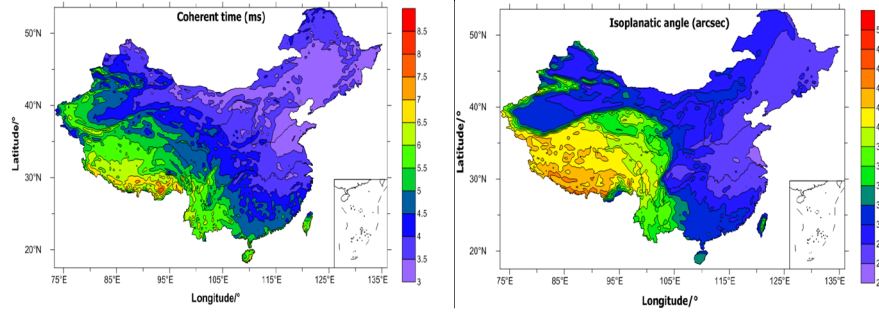


Fig. 5. The distributions of yearly mean atmospheric coherence time (left) and isoplanatic angle (right)

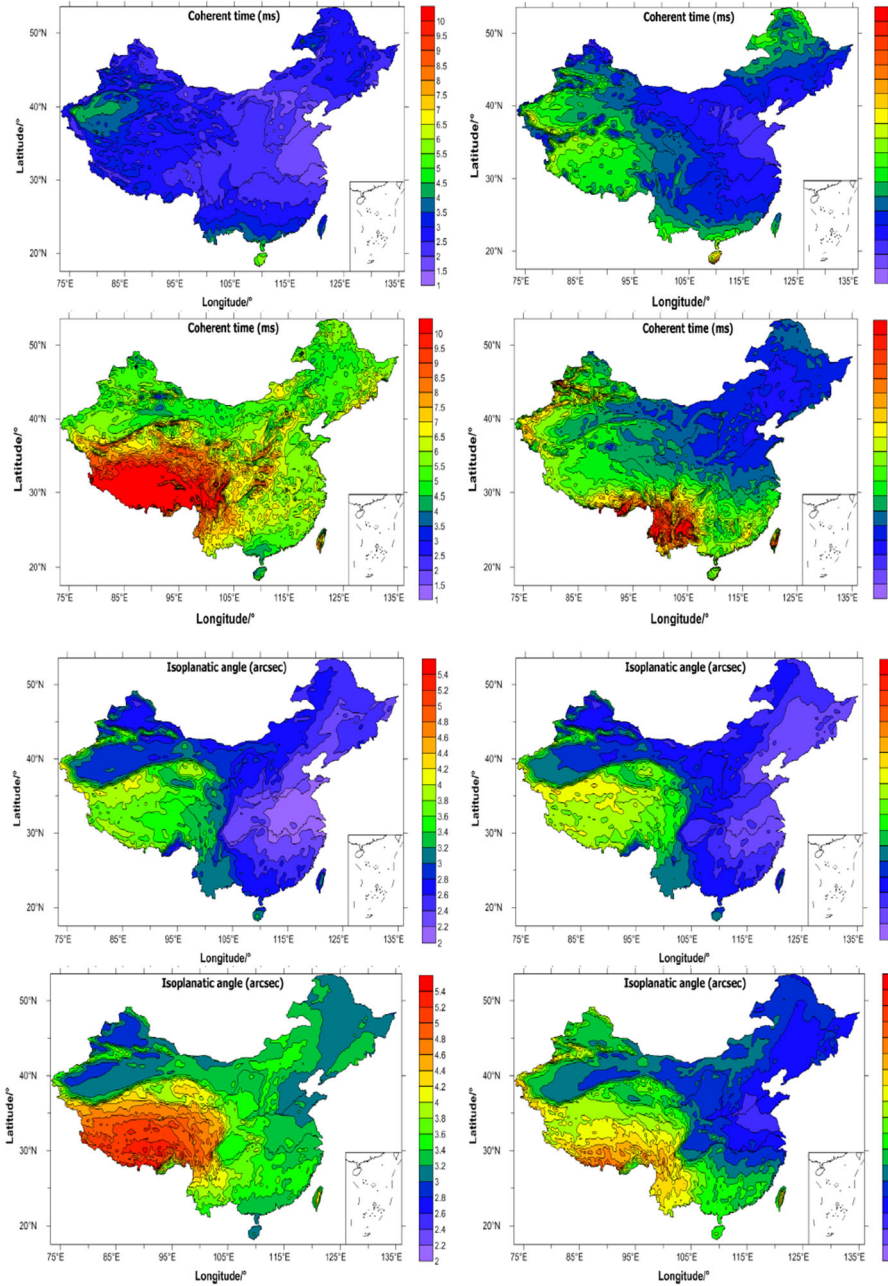


Fig. 6. The seasonal distributions of atmospheric coherence time (top) and isoplanatic angle (bottom), from left to right are the seeing in January, April, July, and October

Furthermore, the intensity and height of high-altitude optical turbulence will significantly affect the θ_0 and τ_0 . From Formulas 4–5, the weights of $H^{5/3}$ and $V^{5/3}$ are added in the integrals of C_n^2 , respectively. In order to intuitively understand the influence of high altitude turbulence on the θ_0 and τ_0 , the vertical profiles of the $C_n^2 H^{5/3}$ and the $C_n^2 V^{5/3}$ are presented in Figure 7. In the near-ground layer, that has little effect on the θ_0 where much influencing the seeing value, and the $C_n^2 H^{5/3}$ in the upper air is obviously higher than that in near-ground layer. The $C_n^2 V^{5/3}$ both in near-ground layer and in upper air vary little, while the thickness in the upper air is greater than that near the ground, and the influence of the upper air on the τ_0 is much greater than that of the ground layer.

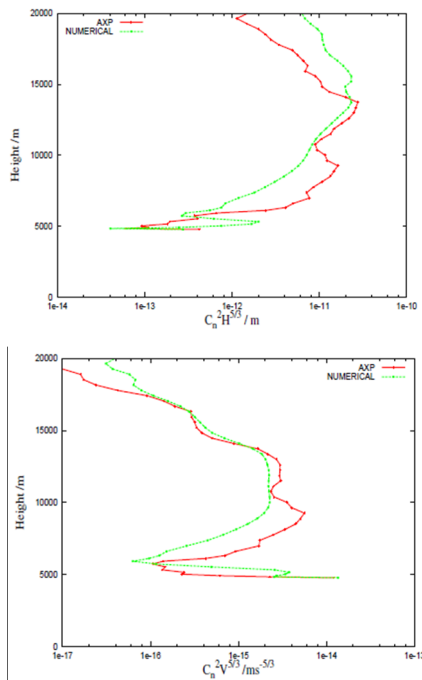


Figure 7 The mean $C_n^2 H^{5/3}$ and $C_n^2 V^{5/3}$ profiles in one week above the Ali observatory.

4. DISCUSSIONS AND CONCLUSIONS

Atmospheric turbulence and its seasonal variation should have strong regional characteristics. As China has a vast territory and diverse climate distributions, especially the Tibetan Plateau with complex terrain and special climate, to develop specific regional turbulence

models suitable for different climatic region in China is worth in-depth and detailed study. The model method has made great progress and is statistically consistent with the measured data [Qian et al., 2020–2024], but the method itself needs to be further improved, no one model can be applied to all the sites in different regions, the model must be modified continuously, considering various influencing factors, especially in the near ground layer, to improve the calculation accuracy of optical turbulence parameters.

REFERENCES

Bougeault P, De Hui C, Fleury B. et al. Investigation of seeing by means of an atmospheric mesoscale numerical simulation[J] // *ApOpt*, 1995. 34(18): 3481–3488.

Businger S., Chenrubini T. Seeing clearly-the impact of atmosphere turbulence on the propagation of extroterrestrial radiation. 2011, TX: Virtualbook-worm.com Publishing Inc.: 29–34.

Cherubini T., Businger S., Lyman R. // *J. Appl. Meteorological and Climatology*. 2008. V. 47. 1140.

Masciadri E, Vernin J, Bougeault P. 3D mapping of optical turbulence using an atmospheric numerical model. I. A useful tool for the ground-based astronomy // *A&AS*. 1999a. 137: 185–202

Masciadri E, Vernin J, Bougeault P. 3D mapping of optical turbulence using an atmospheric numerical model. II. First results at Cerro Paranal[J] // *A&AS*. 1999b. 137: 203–216.

Qian Xuan, Yao Yongqiang et al. Statistics of cloud cover above the Ali observatory, Tibet // *MNRAS*. 2024. V. 529. P. 1195–1204. <https://doi.org/10.1093/mnras/stae582>

Qian Xuan, Yao Yongqiang et al. Optical turbulence in the atmospheric surface layer at the Ali observatory, Tibet // *MNRAS*. 2022. V.510. P. 5179–5186.

Qian Xuan et al. Modelling of atmospheric optical turbulence with the Weather Research and Forecasting model at the Ali observatory, Tibet // *MNRAS*. 2021. V. 505. P. 582–592.

Qian Xuan, Yao Yongqiang et al. Validation of the WRF model for estimating precipitable water vapor at the Ali observatory on the Tibetan Plateau // *PASP*. 2020a. 132:125003.

Qian Xuan, Yao Yongqiang et al. Statistics and analysis of high-altitude wind above the western Tibetan Plateau // *MNRAS*. 2020b. V. 498. P. 5786–5797.

Qian Xuan et al. Numerical calculations of atmospheric conditions over Tibetan Plateau by using WRF model // *SPIE*. 2015. V. 595. 012028 <https://doi.org/10.1088/1742-6596/595/1/012028>

Wang Hongshuai, Yao Yongqiang, Qian Xuan et al. The method of modeling atmospheric optical turbulence // *ACTA ASTRONOMICA SINICA*. 2012. V. 53, N 6. P. 527–537.

ВОЗБУЖДЕНИЕ РЕЗОНАНСОВ ПЛАЗМОНОВ В InGaAs ПЛАСТИНЕ ПЛОСКОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНОЙ

Н.Д. Аниутин

Российский новый университет, Москва, Россия, blnikan@mail.ru

EXCITATION OF PLASMON RESONANCES ON InGaAs PLATE BY A PLANE ELECTROMAGNETIC WAVE

N.D. Aniotin

Russian New University, Moscow, Russia

Аннотация. Рассматривается двумерная задача дифракции цилиндрической Н-поляризованной электромагнитной волны на пластине из полупроводника InGaAs. В инфракрасном диапазоне ($250 \text{ см}^{-1} < \nu < 280 \text{ см}^{-1}$) строгим численным методом рассчитаны спектры нормированного поперечника рассеяния, зависимость компоненты поля Hz в точке на поверхности структуры и пространственное распределение компоненты поля Hz в ближней зоне пластины (структуры). Исследовано влияние угла падения плоской волны на резонансы плазмонов.

Ключевые слова: Пластина из полупроводника, InGaAs, резонансы плазмонов, плазмонные резонансы, частотная характеристика поля, нормированный диаметр рассеяния.

Abstract. The 2D problem of diffraction of a plane H-polarized electromagnetic wave on an InGaAs semiconductor plate was considered. The spectra of the normalized scattering pattern, the dependence of the field component Hz at a point on the surface of the structure and the spatial distribution of the field component Hz in the near zone of the structure were calculated using a rigorous numerical method in the infrared range ($250 \text{ cm}^{-1} < \nu < 280 \text{ cm}^{-1}$). We investigated how a plane wave's angle of incidence affects plasmon resonances.

Keywords: Plate semiconductor, InGaAs, plasmon resonances, frequency response of the field, normalized scattering pattern.

ВВЕДЕНИЕ

Начиная с середины 20 века наблюдается значительный интерес к исследованию взаимодействия электромагнитных волн на структурах с отрицательной диэлектрической проницаемостью [Schumann, 1948; Tamir, Oliner, 1963; Shatrov, and Shevchenko, 1974; Аниутин, 2019]. Как известно в этом случае на поверхности таких структур возникают поверхностные волны — плазмоны, а также их резонансы. Обычно плазмоны рассматриваются на структурах из благородных металлов в оптическом диапазоне. Например, было установлено, что в нано проводках из серебра (Ag) и золота (Au) существуют не только плазмоны, но и их резонансы [Sondergaard 2007; Giannini, Sanchez-Gil, 2007].

Однако отметим, что отрицательную диэлектрическую проницаемость в ИК диапазоне имеют не только благородные металлы и плазменно-подобные среды, но и полупроводники - например InGaAs, а соответственно на поверхности структур из данного материала образуются плазмоны и их резонансы. Этот полупроводник активно применяется для инфракрасных фотодетекторов [Billaha et al., 2020], патч антенн [Palaferrri, 2018].

Цель данной работы состоит в исследовании плазмонов и их резонансов образующихся при дифракции Н поляризованной плоской электромагнитной волны на полупроводниковой пластине из InGaAs при различных углах падения плоской волны и потерь среды.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФОРМУЛИРОВКА

Рассматривается 2D задача дифракции плоской Н поляризованной электромагнитной волны на диэлектрической пластине из InGaAs. Геометрия решаемой задачи представлена на рис. 1 (a — большая полуось

прямоугольника, b — малая, φ_0 — угол падения плоской электромагнитной волны). В цилиндрической системе координат (r, φ) уравнение контура r_s имеет вид:

$$r_s(\varphi) = \frac{b}{\sqrt{\left(\frac{b}{a} \cos(\varphi)\right)^n + \sin(\varphi)^n}}, n = 18. \quad (1)$$

Предполагалось, что волновое число находилось в ИК диапазоне $250 \text{ см}^{-1} < \nu < 280 \text{ см}^{-1}$ ($35.7 \text{ мкм} < \lambda < 40 \text{ мкм}$), где полупроводниковая пластина из InGaAs имеет отрицательную диэлектрическую проницаемость $\varepsilon_{InGaAs}(\nu) = \varepsilon'_{InGaAs} - i\varepsilon''_{InGaAs} = \text{Re}(\varepsilon_{InGaAs}) - i \text{Im}(\varepsilon_{InGaAs})$. Расчет относительной диэлектрической проницаемости InGaAs осуществлялся на основе кубической интерполяции экспериментальных данных [Le et al., 2022] и приведен на рис. 2.

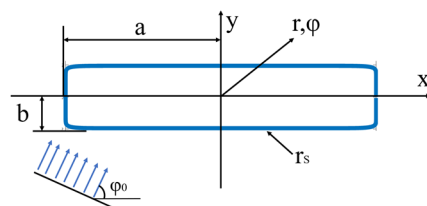


Рис. 1. Геометрия задачи

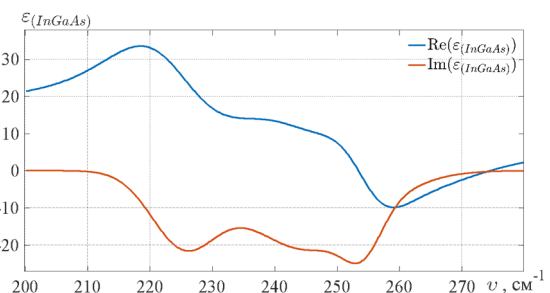


Рис. 2. Зависимость относительной диэлектрической проницаемости InGaAs от волнового числа см^{-1}

Падающая H поляризованная плоская электромагнитная волна имеет компоненту поля H_z и может быть представлена в виде:

$$H_z = U_0(r, \varphi) = \exp(-ikr * \cos(\varphi - \varphi_0)). \quad (2)$$

Полное поле вне пластины ($r > r_s$) представим в виде суперпозиции $U(r, \varphi) = U_0(r, \varphi) + U_s(r, \varphi)$ (где $U_s(r, \varphi)$ — рассеянное поле), а полное поле внутри пластины ($r < r_s$) обозначим $U_p(r, \varphi)$.

При этом граничные условия для полного поля $U(r, \varphi)$ принимают вид:

$$U^P(r_s - 0, \varphi) = U^S(r_s + 0, \varphi) + U^0(r_s + 0, \varphi) \\ \frac{1}{\varepsilon_{InGaAs}} \frac{\partial U^P}{\partial N}(r_s - 0, \varphi) = \frac{\partial U^S}{\partial N}(r_s + 0, \varphi) + \frac{\partial U^0}{\partial N}(r_s + 0, \varphi) \quad (3)$$

Поле $U_s(r, \varphi)$ в цилиндрической системе координат должно удовлетворять условиям излучения в дальней зоне ($kr \rightarrow \infty$):

$$U^S(r, \varphi) = \Phi(\varphi) \left(\frac{2}{\pi kr}\right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(-ikr + i\frac{\pi}{4}\right), \quad (4)$$

где $\Phi(\varphi)$ — диаграмма рассеяния пластины. Так же важной характеристикой рассеянного поля является поперечник рассеяния σ_s , который определяется по формуле:

$$\sigma_s = \frac{2}{\pi k} \int_0^{2\pi} |\Phi(\varphi)|^2 d\varphi. \quad (5)$$

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Численное решение сформулированной задачи проводилось модифицированным методом дискретных источников (ММДИ) [Кюркчан, Смирнова, 2014]. Семейство кривых компоненты поля H_z в точке $(0, -b)$ на поверхности пластины и нормированного поперечника рассеяния $k\sigma_s$ в зависимости от волнового числа ν представлено на рис. 3 и 4 соответственно. Для случая, когда $b = 155$ нм, $a = 10b$ при различных углах падения плоской электромагнитной волны φ_0 : $\varphi_0 = \pi/6$ (кривая 1), $\pi/4$ (кривая 2), $\pi/2$ (кривая 3).

Из данных представленных на рис. 3 и 4 видно, что существует всего один максимум (резонанс) как компоненты поля $H_z(0, -b)$, так и нормированного поперечника рассеяния $k\sigma_s$ в районе $\nu = 263$ см⁻¹ ($\lambda = 38.0238$ мкм). Заметим, что амплитуда кривых $H_z(0, -b)$ и $k\sigma_s$ увеличиваются с приближением угла падения волны к значению: $\varphi_0 = \pi/2$ (кривые 3 рис. 3 и 4).

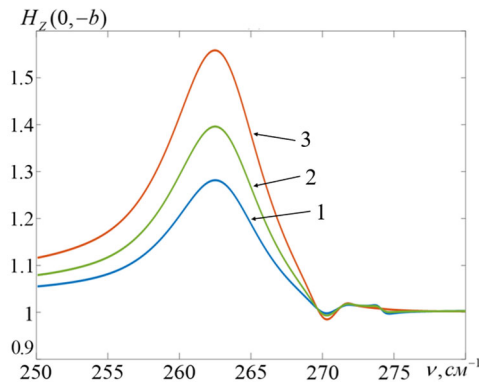


Рис. 3. Зависимость компоненты поля $H_z(0, -b)$ от волнового числа

Распределение ближнего поля магнитной компоненты поля H_z представлено на рис. 5–8 для случая реальных потерь ($\gamma = 1$) и отсутствия потерь ($\gamma = 0$) полупроводника InGaAs. Отметим, что потери приводят к уменьшению амплитуды поля H_z , к исчезновению мультипольных резонансов [Анютин, 2019] и изменению структуры ближнего поля (см. рис. 5–8).

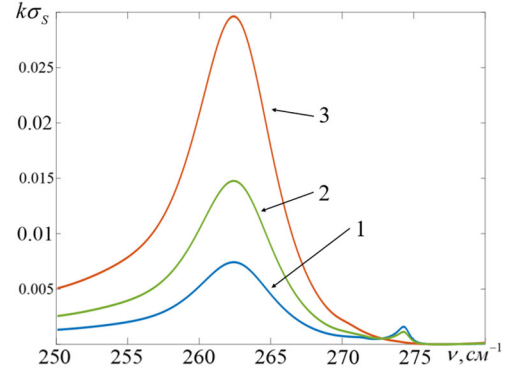


Рис. 4. Зависимость нормированного поперечника рассеяния $k\sigma_s$ от волнового числа

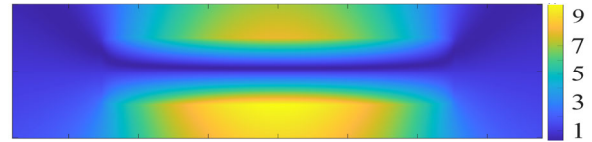


Рис. 5. Распределение ближнего поля компоненты поля H_z ($\nu = 260$ см⁻¹), $\gamma = 0$

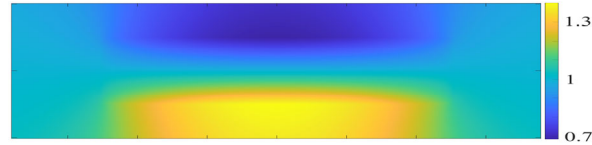


Рис. 6. Распределение ближнего поля компоненты поля H_z ($\nu = 260$ см⁻¹), $\gamma = 1$

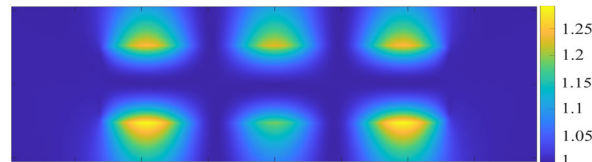


Рис. 7. Распределение ближнего поля компоненты поля H_z ($\nu = 270$ см⁻¹), $\gamma = 0$

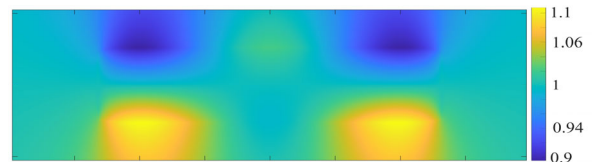


Рис. 8. Распределение ближнего поля компоненты поля H_z ($\nu = 270$ см⁻¹), $\gamma = 1$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования двумерной задачи дифракции плоской электромагнитной волны на полупроводниковой пластине из InGaAs было установлено, что существует всего один резонанс компоненты поля H_z и нормированного поперечника рассеяния $k\sigma_s$ в диапазоне частот 250 см⁻¹ < ν < 280 см⁻¹. Установлено наличие четного типа резонанса плазмонов и отсутствие нечетных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Анютин А.П. О резонансах плазмонов тонкой пластины конечных размеров из метаматериала // Радиотехника и электроника. 2019. Т. 64, №. 12. С. 1177–1180.
- Кюркчан А.Г., Смирнова Н.И. Математическое моделирование в теории дифракции с использованием априорной информации об аналитических свойствах решения. М.: Медиа Паблшер, 2014. 226 с.
- Billaha M.A., Roy B., Ray S. et al. Asymmetric algaas/gaas/ingaas based quantum well long wavelength infrared photodetector // 4th International Conference on Electronics, Materials Engineering Nano-Technology (IEMENTech). 2020. P. 1–3.
- Giannini V., Sánchez-Gil J.A. Calculations of light scattering from isolated and interacting metallic nanowires of arbitrary cross section by means of Green's theorem surface integral equations in parametric // J. Opt. Soc. Am. A. 2007. V. 24, N 9. С. 2822–2830. <http://dx.doi.org/10.1364/JOSAA.-24.002822>.
- Le T.N. et al. Determination of the far-infrared dielectric function of a thin InGaAs layer using a detuned Salisbury screen // Optical Materials Express. 2022. V. 12, N 7. P. 2711–2723.
- Palaferrri D., Todorov Y., Bigioli A. et al. Room-temperature nine- μm -wavelength photodetectors and GHz-frequency heterodyne receivers // Nature. 2018. V. 556, N 7699. P. 85–88.
- Schumann W.O. Wellen Langs Homogener Plasmaschichten // S. B. Akad. D. Wiss. Math. Naturwiss. 1948. V. 225. P. 255–261.
- Shatrov A.D., Shevchenko V.V. Expansion of a field in open stratified waveguide in case of degeneracy of guided waves // Radiophys. Quantum Electronics. 1974. V. 17, N 11. P. 1293–1300.
- Sondergaard T. Modeling of plasmonic nanostructures: Green's function integral equation methods // Phys. Status Solidi b. 2007. V. 244, N 10. P. 3448–3462. <http://dx.doi.org/10.1002/pssb.200743153>.
- Tamir T., Oliner A.A. The spectrum of electromagnetic waves guided by plasma layer // Proc. IEEE. 1963. V. 55, N 2. P. 317–332.

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ ТРАЕКТОРИЙ В НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ

Н.В. Буряк¹, И.А. Носиков², М.В. Клименко²

¹Балтийский федеральный университет им. И. Канта, г. Калининград, Россия,
bnikolay2005@gmail.com

²Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н. В. Пушкова РАН, г. Калининград, Россия

MODERN METHODS OF TRAJECTORY OPTIMIZATION IN INHOMOGENEOUS MEDIA

N.V. Buryak¹, I.A. Nosikov², M.V. Klimenko²

¹Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia,
bnikolay2005@gmail.com

²Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS, Kaliningrad, Russia

Аннотация. В работе представлено применение различных методов оптимизации в задаче расчета лучевых траекторий высокочастотных волн в неоднородных средах прямым вариационным методом. Рассмотрены современные реализации метода сопряженных градиентов и квазиньютоновских методов. Проведенный анализ позволил определить наиболее оптимальный подход к поиску искомой лучевой траектории.

Ключевые слова: принцип Ферма, граничная задача, метод сопряженных градиентов, квазиньютоновский подход.

Abstract. This paper describes the application of various optimization methods in the problem of high-frequency point-to-point ray tracing in inhomogeneous media using the direct variational method. Modern implementations of the conjugate gradient method, as well as quasi-Newton methods, are considered. The analysis made it possible to determine the most optimal parameters of convergence to the desired ray path.

Keywords: Fermat's principle, boundary problem, radio waves.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших задач о распространении высокочастотных волн в неоднородной среде (радиоволны в ионосфере, волны цунами в океане, сейсмические волны в земной коре) является определение времени распространения волны между двумя объектами, положение которых известно (от источника возмущения к приемнику). Существует множество методов решения граничной задачи о распространении высокочастотных волн. Их можно разделить на две большие группы: традиционный лучевой метод и сеточный подход [Rawlinson et al., 2008]. В лучевом приближении наиболее традиционным подходом к решению краевой задачи является метод пристрелки. Известны альтернативные методы решения краевой задачи с использованием методов изгибания [Julian et al. 1977; Pereyra et al. 1980] и псевдоизгибания [Um, Thurber, 1987; Moser et al., 1992], где лучевая траектория определяется прямой минимизацией. В основе расчета луча лежит основополагающий принцип Ферма о минимуме (стационарности) фазового пути (времени прихода). Вышеперечисленные подходы получили широкое применение для решения прикладных геофизических задач. В данной работе исследуются особенности сходимости лучевой траектории методом прямой минимизации функционала времени распространения [Nosikov et al., 2017] с использованием различных численных методов оптимизаций. Рассматриваются современные реализации метода сопряженных градиентов и

квазиньютоновских методов с использованием первой и второй производных целевой функции.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

В качестве модельной среды для расчета лучевых траекторий была выбрана модельная среда, где поле скоростей задавалось выражением $c(y) = 1 + 0.01y$ [Moser et al., 1992]. Такая постановка задачи позволяет сделать оценку сходимости метода и провести сравнение полученных результатов с известным аналитическим решением. В работе рассмотрено применение трех методов оптимизации траектории из внутренней библиотеки Scipy: метод сопряженных градиентов CG (Метод Флетчера-Ривса), работающий на основе информации и значениях функции и ее градиенте; BFGS — алгоритм Бroyдена-Флетчера-Гольдфарба-Шанно, квазиньютоновский метод численной оптимизации, предназначенный для нахождения локального экстремума нелинейного функционала без ограничений; L-BFGS-B — метод BFGS с ограниченным использованием памяти. Серия численных расчетов лучевой траектории (см. таблицу 1) в модельной среде показало, что из трех выбранных методов самым быстрым по числу итераций оказался L-BFGS-B. Наиболее близкое значение времени распространения к известному аналитическому решению получено методом BFGS (отклонение 0.02 %). При этом самым сбалансированным оказался метод сопряженных градиентов.

Таблица 1.

Результаты численных расчетов. Символ δ_i обозначает точность определения по модулю градиента: $\delta_1 = 0.01, \delta_2 = 0.001, \delta_3 = 0.0001$.

Метод	Количество итераций	Количество итераций			Результат		
		δ_1	δ_2	δ_3	δ_1	δ_2	δ_3
CG	5	7	29	41	96.8963	96.8395	96.8392
	15	11	26	449	96.3098	96.3036	96.2923
	25	25	69	178	96.3748	96.2631	96.2625
BFGS	5	14	52	53	96.9604	96.8392	96.8392
	15	31	58	265	96.3099	96.3035	96.2910
	25	37	53	329	96.2763	96.2645	96.2601
L-BFGS-B	5	1	3	4	97.7604	96.9589	96.9542
	15	1	7	12	97.9471	96.4005	96.3064
	25	1	1	16	97.9468	97.9468	96.2847
Аналитическое решение [Moser et al., 1992]					96.2424		

На рис. 1 представлены результаты расчета лучевой траектории в модельной среде с начальным приближением траектории в виде прямой линии. Полученный результат показывает хорошее согласие с аналитическим решением (см. табл. 1).

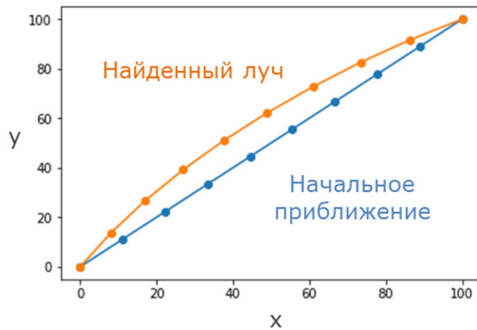


Рис. 1. Лучевая траектория, рассчитанная прямым вариационным методом

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Численные расчеты показали, что метод сопряженных градиентов (CG) позволяет реализовать поиск искомой лучевой траектории с оптимальными параметрами сходимости. При этом наименьшее число обращений к целевой функции и, как следствие, более высокая скорость вычислений наблюдается при использовании квазиньютоновского метода L-BFGS-B.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Rawlinson N., Pozgay S., Fishwick S. Seismic tomography: a window into deep Earth // Phys.Earth and Planetary Interiors. 2010. V. 178, N 3-4. P. 101–135.

Julian B.R. et al. Three-dimensional seismic ray tracing // J. Geophys. 1977. V. 43, N 1. P. 95–113.

Pereyra V., Lee W.H.K., Keller H.B. Solving two-point seismic-ray tracing problems in a heterogeneous medium: Part 1. A general adaptive finite difference method // Bull. Seismologic. Soc. America. 1980. V. 70, N 1. P. 79–99.

Um J., Thurber C. A fast algorithm for two-point seismic ray tracing // Bull. Seismologic. Soc.America. 1987. V. 77, N 3. P. 972–986.

Moser T.J., Nolet G., Snieder R. Ray bending revisited // Bull. Seismologic. Soc. America. 1992. V. 82, N 1. P. 259–288.

Nosikov I.A. et al. Application of the nudged elastic band method to the point-to-point radio wave ray tracing in IRI modeled ionosphere // Adv. Space Res. 2017. V. 60, N 2. P. 491-497.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ ЭУФ ИЗЛУЧЕНИЯ В ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЕ С ПОМОЩЬЮ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ АБЕЛЯ

В.Е. Гусева, А.Н. Нечай, А.А. Перекалов, Н.И. Чхало

Институт физики микроструктур Российской академии наук, Нижний Новгород, Россия,
valeriegus@ipmras.ru

STUDYING RADIAL DISTRIBUTION OF EUV RADIATION SOURCES IN LASER PLASMA BY ABELE TRANSFORM METHODS

V.E. Guseva, A.N. Nechay, A.A. Perekalov, N.I. Chkhalo

Institute for Physics of Microstructures RAS, Nizhniy Novgorod, Russia,
valeriegus@ipmras.ru

Аннотация. В работе представлены результаты обработки изображений лазерной искры, полученных с помощью ЭУФ микроскопа, работающего на длине волны 11.25 нм, при возбуждении инертных газов (Ar, Kr, Xe) излучением Nd:YAG лазера ($\lambda = 1064$ нм, $\tau_{\text{имп}} = 4$ нс и $E_{\text{имп}} = 0.8$ Дж). Газовая мишень формировалась при истечении струй газа в вакуумную камеру из конического сверхзвукового сопла с $d_{\text{кр}} = 500$ мкм, $l = 5$ мм, $\alpha/2 = 4.5^\circ$ при давлении на входе в сопло 3–10 бар. Образующаяся лазерная плазма имеет температуру порядка 10^6 К. В работе описан метод получения и обработки изображений лазерной плазмы с помощью обратного преобразования Абеля. Показаны особенности радиального распределения интенсивности при возбуждении различных газовых мишеней.

Ключевые слова: лазерная плазма, ЭУФ излучение, преобразование Абеля.

Abstract. This paper presents the results of processing images of a laser spark obtained using an EUV microscope operating at a wavelength of 11.25 nm when excitation of inert gases (Ar, Kr, Xe) by Nd:YAG laser radiation ($\lambda = 1064$ nm, $\tau_{\text{pulse}} = 4$ ns and $E_{\text{pulse}} = 0.8$ J). The gas target was formed by the flow of gas jets into a vacuum chamber from a conical supersonic nozzle with $d_{\text{cr}} = 500$ μm , $l = 5$ mm, $\alpha/2 = 4.5^\circ$ under a pressure at the nozzle inlet of 3–10 bar. The resulting laser plasma has a temperature of the order of 10^6 K. The paper describes a method for obtaining and processing images of laser plasma using the inverse Abel transform. The features of the radial intensity distribution during excitation of different gas targets are shown.

Keywords: laser plasma, EUV radiation, Abel transform.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что лазерная плазма является одним из наиболее перспективных источников экстремального ультрафиолетового (ЭУФ) излучения. Характеристики лазерно-плазменного источника исследуются достаточно длительное время. Однако процессы, происходящие в лазерной плазме, по-прежнему можно отнести к малоизученным. Большое количество новой информации можно получить, исследуя изображение лазерных искр в ЭУФ спектральном диапазоне.

В данной работе исследовалось радиальное распределение источников ЭУФ излучения плазмы, образованной при возбуждении газоструйных мишеней инертных газов импульсным излучением Nd:YAG лазера. Изображения лазерной искры были получены на длине волны 11.25 нм с помощью микроскопа с пятикратным увеличением, основанном на объективе Шварцшильда. Для выяснения радиального распределения интенсивности ЭУФ излучения в области искры было использовано обратное преобразование Абеля [Dribinski et al., 2002; Bockasten, 1961]. Возможность использования данного метода обусловлена цилиндрической симметрией лазерной искры относительно оси лазерного луча.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Работа осуществляется следующим образом. Излучение Nd:YAG лазера 1 с длительностью импульса (4 нс, 0.8 Дж) проходит делительную пластинку 2, отклоняющую часть излучения в калориметр 3.

Проходящее излучение отклоняется призмой 4 и через вводное окно 5 попадает в объем вакуумной камеры 6, где фокусируется с помощью линзы 7 на струе газа, истекающей из сверхзвукового конического сопла 8 ($d_{\text{кр}} = 500$ мкм, $l = 5$ мм, $\alpha/2 = 4.5^\circ$). Давление газа на входе в сопло варьировалось от 3 до 10 бар. В области пробоя мишени образуется лазерная плазма 9. С помощью рентгеновского микроскопа 10, работающего на длине волны 11.25 нм, были получены изображения лазерных искр. Основным оптическим элементом микроскопа является двухзеркальный сферический объектив Шварцшильда. Объектив состоит из двух зеркал — выпуклого зеркала 11 и вогнутого зеркала 12. После прохождения объектива излучение детектируется с помощью CMOS матрицы 13.

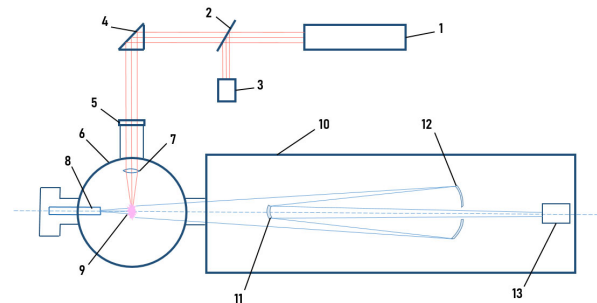


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

ОПИСАНИЕ МЕТОДА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Для лазерной искры существует цилиндрическая симметрия относительно оси лазерного пучка [Dribinski et al., 2002]. В таких случаях 3D

изображение искры является функцией только двух координат в цилиндрической системе и представляет собой радиальное распределение источников ЭУФ излучения $I = I(r, z)$. Пусть $P(x, z)$ это двумерная проекция $I(r, z)$ на плоскость детектора (x, z) , где ось x перпендикулярна оси z . Эти две функции связаны интегралом Абеля:

$$P(x, z) = 2 \int_{|x|}^{\infty} \frac{rI(r, z)}{\sqrt{r^2 - x^2}} dr.$$

Полученная экспериментально проекция $P(x, z)$ является 2D массивом P с элементами, определенными на двумерной сетке 2048×2048 пикселей (1 пиксель = 6.5 мкм). Интересующей величиной является изображение $I(r, z)$, которое можно получить непосредственно путем вычисления обратного преобразования Абеля:

$$I(r, z) = -\frac{1}{\pi} \int_r^{\infty} \frac{\left[\frac{dP(x, z)}{dx} \right]}{\sqrt{x^2 - r^2}} dx.$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В эксперименте были получены изображения лазерной искры на газоструйных мишенях (Ar, Kr, Xe). Изображение искры аргона ($p = 5$ бар) представлено на рис. 2а.

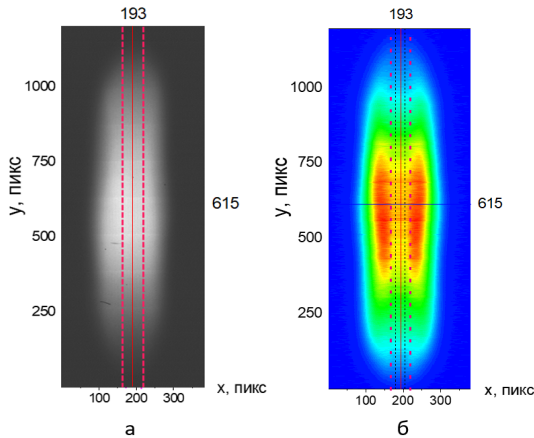


Рис. 2. Изображение лазерной искры до (а) и после преобразования Абеля (б)

На снимке лазерный луч направлен снизу и является осью симметрии. Размеры указаны в пикселях. Штрихованные линии соответствуют диаметру лазерного пучка в области фокуса — 66 мкм. По оси y фокус расположен на 615 пикс (см. рис. 2а). Следует отметить, что ~70 % энергии лазерного пучка сосредоточено в диаметре 66 мкм. На рис. 2б приведено изображение после преобразования Абеля, представляющее собой радиальное распределение источников излучения в искре на длине волны 11.25 нм. Черные линии выделяют полосу, в которой могут наблюдаться значительные погрешности [Bockasten, 1961], связанные с используемым математическим преобразованием. Эта область составляет около 6 % и была вручную сглажена на изображении. Видно, что для радиального распределения интенсивности в искре аргона характерно

наличие двух центров излучения в продольном срезе искры. Следовательно, искра аргона представляет собой полый плазменный цилиндр.

Для определения зависимости распределения интенсивности в лазерной искре от давления газа достаточно анализа профиля поперечного среза при одном y . Профили были сняты при давлениях газа на входе в сопло 3, 5, 8 и 10 бар при возбуждении мишени аргона и представлены на рис. 3. Мелкими штриховыми линиями выделена область, составляющая ~6 %, в которой могут наблюдаться значительные математические погрешности. Крупными штрихами показан диаметр лазерного луча в области фокуса (66 мкм).

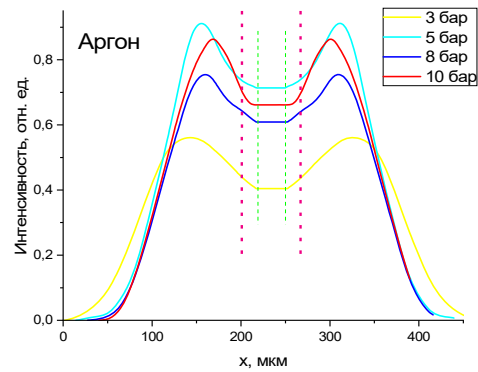


Рис. 3. Поперечные профили распределения центров ЭУФ излучения в искре Ar

Видно, что при изменении давления газа вид распределения центров излучения на длине волны 11.25 нм сохраняется.

Были также получены радиальные распределения интенсивности излучения при возбуждении струй криптона и ксенона. Радиальное распределение интенсивности для искры ксенона, подобно искре аргона, является полым цилиндром, однако со значительно более толстыми стенками. Распределение интенсивности для криптона имеет вид, подобный распределению Гаусса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты обработки экспериментальных данных — получены радиальные распределения интенсивности излучения в лазерной плазме Ar, Kr, Xe при регистрации изображений искр с помощью микроскопа, работающего на длине волны 11.25 нм. Показано, что искры различных газов имеют характерные особенности в распределении источников излучения, связанные с отличиями в физике плазменных процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Bockasten K. Transformation of observed radiances into radial distribution of the emission of a plasma // JOSA. 1961. V. 51, N 9. P. 943–947.
- Dribinski V. et al. Reconstruction of Abel-transformable images: The Gaussian basis-set expansion Abel transform method // Rev. Sci. Instrum. 2002. V. 73, N 7. P. 2634–2642.

ТЕСТИРОВАНИЕ ПРОЦЕДУР УДАЛЕНИЯ ТРЕНДА ИЗМЕРЕНИЙ ФАЗЫ НЕСУЩЕЙ И РАСЧЕТА ИНДЕКСОВ ИОНОСФЕРНЫХ МЕРЦАНИЙ

Е.И. Данильчук^{1,2}, В.В. Демьянов^{1,2}

¹Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия,
danilchuk.k@mail.ru

²Институт солнечно земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

TESTING CARRIER PHASE MEASUREMENT DETRENDING PROCEDURES AND CALCULATION OF IONOSPHERIC SCINTILLATION INDICES

E.I. Danilchuk^{1,2}, V.V. Demyanov^{1,2}

¹Irkutsk State University, Irkutsk, Russia, danilchuk.k@mail.ru

²Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia

Аннотация. Проведено тестирование процедур удаления тренда измерений фазы несущей с высокой частотой регистрации и расчета индексов ионосферных мерцаний на основе модели фазы несущей трансionoсферного сигнала, которая учитывает влияние рефракционных эффектов, связанных с движением спутника; регулярного ионосферного слоя; низкочастотных вариаций фазы, вызванных перемещающимися ионосферными неоднородностями различных масштабов; вариаций фазы, вызванных френелевскими неоднородностями; шумы измерений приемника.

Ключевые слова: фаза несущей, удаление тренда измерений, ионосферные индексы мерцаний.

Abstract. We tested high-rate carrier phase measurement detrending procedures and calculation of ionospheric scintillation indices. It was based on model of the carrier phase of transionoсpheric signal which takes into account the influence of refractive effects associated with satellite motion; the regular ionospheric layer; low-frequency phase variations caused by various scale traveling ionospheric disturbances; phase variations caused by Fresnel disturbances; receiver measurement noise.

Keywords: carrier phase, detrending, ionospheric scintillation indexes.

ВВЕДЕНИЕ

Ионосфера Земли представляет сложную динамическую систему, которая на протяжении многих десятилетий была и остается актуальным объектом исследований. Начиная с конца 1990-х годов активно развиваются методы радиозондирования ионосферы на основе обработки и анализа измерений параметров сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Эффективным и высокоинформативным средством мониторинга ионосферы являются сигналы ГНСС.

В настоящее время становятся более доступными измерения параметров сигналов ГНСС с высокой частотой регистрации от 10 Гц и выше [McCaffrey, Jayachandran, 2017]. Кроме того, современные поколения спутников транслируют множество различных сигнальных в различных диапазонах частот L1, L2 и L5 [Bolla, Vogge, 2018]. Возможности, которые представляются благодаря анализу таких измерений в геофизических исследованиях, в частности для исследований ионосферы, используются не в полном объеме. Это связано, во-первых, с большим объемом измерений, которые необходимо хранить и обрабатывать, а во-вторых, с недостаточным развитием методов обработки измерений параметров сигнала ГНСС с высокой частотой регистрации. Поэтому для разработки новых, а также усовершенствования имеющихся методов мониторинга ионосферы с помощью трансionoсферных сигналов с высокой частотой регистрации необходим инструмент, который позволит определить оптимальные параметры процедур обработки измерений ГНСС. Таким инструментом является многокомпонентная модель фазы несущей, которая позволяет определить оптимальные параметры

процедур удаления тренда измерений, а также параметры расчета ионосферных индексов мерцаний. Таким образом, целью данной работы является определение оптимальных параметров обработки фазы несущей трансionoсферного сигнала с высокой частотой регистрации.

МОДЕЛЬ ФАЗЫ НЕСУЩЕЙ ТРАНСИОНОСФЕРНОГО СИГНАЛА

Модель фазы несущей сигнала навигационного спутника основана на теории возмущений, согласно которой фазу несущей навигационного сигнала, диэлектрическую проницаемость среды распространения сигнала и траекторию распространения сигнала можно представить в виде суперпозиции невозмущенной (регулярной) части и возмущенной малой интенсивности.

Таким образом, разработанная модель фазы несущей навигационного сигнала учитывает регулярный набег фазы несущей, связанный с видимым движением навигационного спутника; рефракционные приращения фазы в регулярном ионосферном слое, которые рассчитываются с использованием модели ионосферной коррекции Клобучара; низкочастотные вариации фазы, вызванные перемещающимися ионосферными неоднородностями различных масштабов; вариаций фазы, которые вызваны влиянием мелкомасштабных неоднородностей, размеры которых больше первой зоны Френеля (для частот спутников ГНСС лежат в пределах от 300–400 м до 1–2 км); а также шумы измерений в навигационном приемнике. Разработанная модель предназначена для оценки эффективности методов и методик обработки измерений фазы несущей сигналов навигационных спутников и для определения

оптимальных параметров процедур удаления тренда, фильтрации и усреднения при расчетах индексов состояния ионосферы, основанных на измерениях параметров трансionoсферных сигналов.

**ТЕСТИРОВАНИЕ ПРОЦЕДУР
ОБРАБОТКИ ИЗМЕРЕНИЙ ФАЗЫ
НЕСУЩЕЙ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ФАЗЫ
НЕСУЩЕЙ ТРАНСИОНОСФЕРНОГО
СИГНАЛА И РАСЧЕТА ИНДЕКСОВ
ИОНОСФЕРНЫХ МЕРЦАНИЙ**

Разработанная многокомпонентная модель фазы несущей трансionoсферного сигнала предназначена для определения оптимальных параметров процедур фильтрации фазовых измерения и расчета индексов состояния ионосферы. В частности, можно определить оптимальные параметры расчета индекса мерцаний σ_φ , который основан на обработке измерений фазы несущей с удаленным трендом измерений. Для удаления тренда измерений (фильтрации) рекомендуется использовать фильтр Баттерворта 6-го порядка [Van Dierendonck et al., 1993]. При этом результат будет зависеть, как от частоты среза фильтра Баттерворта, так и от времени усреднения при расчете ионосферного индекса мерцаний σ_φ .

На рис. 1 показаны результаты расчетов индекса σ_φ при использовании фильтра Баттерворта 6-го порядка с частотами среза 0,1 Гц (рис. 1а,б) и 1 Гц (рис. 1в,г). При этом для индекса σ_φ было выбрано разное время усреднения 0,1 с (синяя кривая 1), 1 с (желтая кривая 2) и 10 с (красная кривая 3).

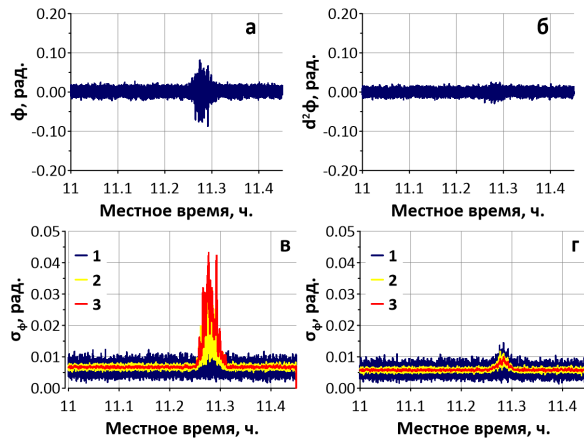


Рис. 1. Пример расчета индекса мерцаний σ_φ при различных значениях частоты среза фильтра Баттерворта и времени усреднения при расчете индекса σ_φ

Из-за влияния частоты среза фильтра Баттерворта на амплитуду вариаций фазы несущей трансionoсферного сигнала уменьшается расчетное значение индекса σ_φ (рис. 1г). Согласно рис. 1 увеличение времени накопления при расчете индекса σ_φ , приводит к подавлению шумов измерений, но при этом вызывает значительное увеличение расчетного значения индекса σ_φ — с 0,023 при времени усреднении 0,1 с (кривая 1, рис. 1в) до 0,04 при времени усреднения 10 с (кривая 3, рис. 1г). Таким, образом, некорректно выбранное время

усреднения может привести к завышению оценки индекса σ_φ .

Вторая производная фазы несущей $d^2\varphi$ может быть использована для прямого выделения шумов измерений и обнаружения ионосферных мерцаний с высокой частотой регистрации измерений [Demyanov et al., 2019]. Эффективность индекса $d^2\varphi$, как средства обнаружения слабых вариаций фазы, прямо зависит от уровня шумов измерений. Поэтому можно использовать предложенную модель фазы для того, чтобы оценить пороговое отношение сигнал/шум, при котором возможно обнаружить вариации фазы с помощью индекса $d^2\varphi$. На рис. 2 представлены результаты расчета индекса $d^2\varphi$ для рядов модели фазы несущей трансionoсферного сигнала. Для сравнения на рис. 2а приведен ряд шумов измерений, который входит в модель фазы несущей. На рис. 2 также представлены значения индекса $d^2\varphi$, при отношении сигнал/шум: 0,1 (рис. 2б), 0,5 (рис. 3в) и 1,0 (рис. 4г). Под отношением сигнал/шум в данном случае понимается величина $\frac{\sigma(\varphi_N)}{\sigma(d^2\varphi)}$.

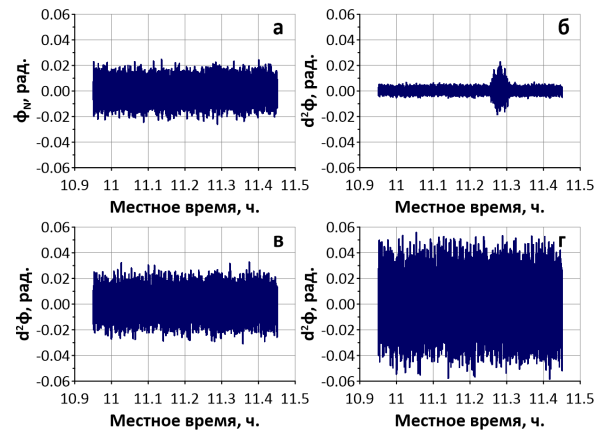


Рис. 2. Вторая производной фазы несущей при различном отношении сигнал/шум (б–г) и исходный ряд шума в составе модели (а)

Согласно рис. 2 вторая производная фазы позволяет извлечь из рядов модели фазы несущей трансionoсферного сигнала шумовую компоненту и вариации фазы, вызванные влиянием френелевских неоднородностей (рис. 2б). При этом не требуется прибегать к дополнительным процедурам удаления тренда и фильтрации. Однако вторая производная $d^2\varphi$ увеличивает шумовую компоненту в ~ 2 раза (рис. 2а и 2г). Таким образом, при отношении сигнал/шум $\frac{\sigma(\varphi_N)}{\sigma(d^2\varphi)} \geq 0.5$ слабые ионосферные мерцания фазы на уровне шума уже не обнаруживаются (рис. 2в и 2г). Следовательно, вторую производную фазы несущей $d^2\varphi$ можно использовать для обнаружения слабых вариаций фазы на фоне шумов, если используется приемная аппаратура с низким отношением сигнал/шум $\frac{\sigma(\varphi_N)}{\sigma(d^2\varphi)} < 0.5$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная модель фазы несущей позволяет определять оптимальные параметры процедур

фильтрации фазовых измерения и расчета индексов состояния ионосферы. Повышение частоты среза фильтра Баттерворта приводит к уменьшению амплитуды мерцаний, что в дальнейшем приводит к уменьшению расчетного значения индекса σ_φ . Кроме того, некорректно выбранное время усреднения может привести к завышению оценки индекса σ_φ . Установлено, что вторую производную фазы несущей $d^2\varphi$ можно использовать для обнаружения слабых вариаций фазы на фоне шумов, если используется приемная аппаратура с низким уровнем шума.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №23-17-00157, <https://rscf.ru/project/23-17-00157/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Bolla P., Borre K. Performance analysis of dual-frequency receiver using combinations of GPS L1, L5, and L2 civil signals // *J. Geodesy*. 2018. V. 93. P. 437–447. DOI: 10.1007/s00190-018-1172-9.
- Demyanov V.V., Yasyukevich Y.V., Jin S., Sergeeva M. A. The Second-Order Derivative of GPS Carrier Phase as a Promising Means for Ionospheric Scintillation Research // *Pure and Applied Geophysics*. 2019. V. 176. P. 4555–4573. DOI: 10.1007/s00024-019-02281-6.
- McCaffrey A.M., Jayachandran P.T. Spectral characteristics of auroral region scintillation using 100 Hz sampling // *GPS Solutions*. 2017. V. 21. P. 1883–1894. DOI: 10.1007/s10291-017-0664-z.
- Van Dierendonck A.J., Klobuchar J., Hua Q. Ionospheric Scintillation Monitoring Using Commercial Single Frequency C/A Code Receivers // *Proc. 6th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation*. 1993. P. 1333–1342.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОПИСАНИЯ НЕЙТРАЛЬНОЙ АТМОСФЕРЫ НА РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭФФЕКТОВ МАГНИТНОЙ БУРИ ФЕВРАЛЯ 2022 Г.

И.К. Едемский, А.В. Тащилин

Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия,
ilya@iszf.irk.ru

INFLUENCE OF DESCRIPTION OF THE NEUTRAL ATMOSPHERE ON MODELING RESULTS OF EFFECTS OF THE FEBRUARY 2022 MAGNETIC STORM

I.K. Edemskiy, A.V. Tashilin

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, ilya@iszf.irk.ru

Аннотация. Численная модель ионосферы и плазмосферы, разработанная в ИСЗФ СО РАН, позволяет определять температуру и состав ионосферных ионов. Между тем, необходимые для модельных расчетов параметры нейтральной атмосферы определяются по эмпирической модели MSIS, которая имеет известные недостатки при описании состояния атмосферы в возмущенные периоды. В настоящей работе мы делаем попытку уточнения результатов моделирования корректировкой входных параметров модели MSIS, так, чтобы она отражала состояние нейтральной атмосферы близкое к реальному.

Ключевые слова: GIPC, моделирование, ионосфера, MSIS

Abstract. The numerical model of the ionosphere and plasmasphere developed at ISTP SB RAS allows one to determine the temperature and composition of ionospheric ions. Meanwhile, the parameters of the neutral atmosphere required by the model are determined using the empirical MSIS model, which has been known for shortcomings in describing the state of the atmosphere during disturbed periods. In this work, we make an attempt to refine the modeling results by adjusting the input parameters of the MSIS model so that it reflects the actual state of the neutral atmosphere more accurately.

Keywords: GIPC, simulation, ionosphere, MSIS

ВВЕДЕНИЕ

Буря 2–4 февраля 2022 г., не являясь выдающимся геофизическим событием (14-ая по интенсивности за 2022 г.), запомнилась тем, что вызвала сход с орбиты 38 спутников системы StarLink. Анализу эффектов бури посвящено множество работ, в том числе представляющих результаты расчетов состояния ионосферы различными моделями [He et al., 2023]. В настоящей работе мы делаем попытку воспроизвести ионосферные эффекты, наблюдавшиеся другими авторами, в том числе на инструментах ИСЗФ СО РАН. Особенность бури, помимо прочего, заключается в значительных вариациях параметров нейтральной атмосферы, в частности, плотности, что и вызвало драматическое завершение запуска 80 спутников системы StarLink.

Разработанная в ИСЗФ СО РАН численная модель ионосферы и плазмосферы (GIPC) [Тащилин, Романова, 2013] основана на решении системы нестационарных уравнений баланса частиц и энергии тепловой плазмы в замкнутых геомагнитных силовых трубках, основания которых расположены на высоте 100 км. Состав ионосферной плазмы в модели включает электроны, атомные (O^+ , H^+ , N^+ , He^+) и молекулярные ионы (N_2^+ , O_2^+ , NO^+). Концентрации всех ионов (кроме N_2^+) рассчитываются с учетом процессов фотоионизации, рекомбинации и переноса вдоль геомагнитных силовых линий под действием амбиполярной диффузии и увлечения ионов горизонтальным нейтральным ветром. Расчет скоростей фотоионизации термосферных составляющих и энергетических спектров первичных фотоэлектронов основан на справочном спектре КУФ-излучения Солнца [Richards et al., 1994].

Описание пространственно-временных вариаций температуры и концентрации нейтральных компонентов O , O_2 , N_2 , H , N основано на данных эмпирической модели термосферы MSIS 2.1, скорости горизонтального ветра рассчитывались по модели HWM07.

Входными параметрами модели MSIS 2.1, определяющими состояние ОКП, выступают суточное и усредненное за 81 день значения индекса солнечной активности $F_{10.7}$ и среднесуточное значение планетарного индекса A_p . Модель позволяет учесть возмущенное состояние среды во время магнитных бурь установкой параметра SW(9) в -1 и в этом случае модель принимает 7 значений A_p : среднесуточный, 4 значения за последние 9 ч, 2 среднесуточных значения за последние два дня. Таким образом, в лучшем случае, модель MSIS 2.1 (как и использующая ее модель GIPC) может отражать изменения среды с характерным временем в три часа. Между тем, располагая данными измерений какого-либо из выходных параметров модели термосферы и минимизируя расхождения модели и измерений, можно наблюдать эффекты более коротких периодов.

Спутники миссии SWARM, среди прочего, определяют вариации собственных негравитационных ускорений, из которых можно восстановить оценку плотности D атмосферы на высоте орбиты [van den Ijssel et al., 2023]. Используя эти данные в качестве опорных, мы варьировали входное среднесуточное значение индекса $F_{10.7}$ так, чтобы разность ΔD между данными модели MSIS и измеренной плотностью была минимальной. Значение, дающее минимум обозначим как $F_{10.7}^m$. Для устранения вариаций $F_{10.7}^m$, вызванных орбитальным движением спутника, мы используем скользящее

медианное окно в 21 отсчет. На рис. 1а показаны актуальное $F_{10.7}$ (зеленым), минимизирующее $F_{10.7}^m$ (синим) и медианное значения $\langle F_{10.7}^m \rangle$ (оранжевым) с шагом по времени в 15 мин. Можно заключить, что наилучшее согласование дают значения, меньшие в сравнении с истинной величиной $F_{10.7}$. Рис. 1б показывает отклонение ΔD в процентах при использовании истинных (зеленым) и медианных значений

(красным). Отклонение в последнем случае не превышает 25 %, что значительно лучше использования истинных значений, где ошибка в среднем составляет 50 %, достигая значений в 120–150 %. Таким образом, мы ожидаем, что использование медианного значения позволит не только промоделировать процессы с характерным временем в 15 мин, но и даст более точные значения ионосферных параметров.

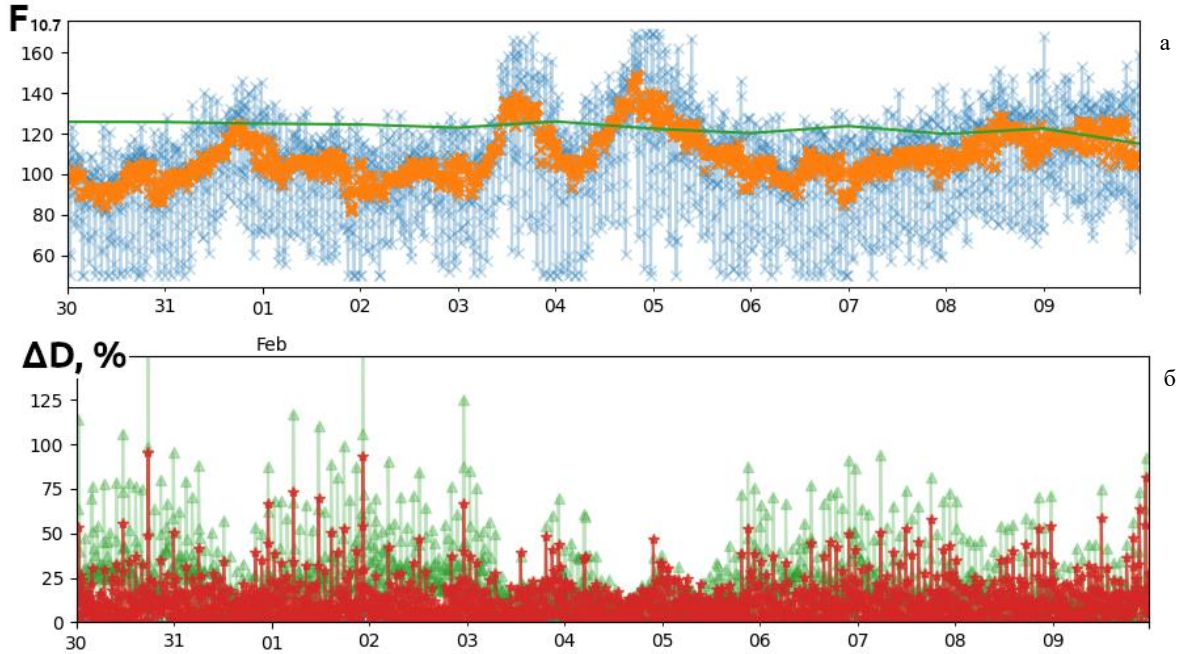


Рис. 1. а — Вариации значений $F_{10.7}^m$ обеспечивающие минимальное значение ΔD (синим) и медианного значения $\langle F_{10.7}^m \rangle$ (оранжевым) в сравнении с истинным значением $F_{10.7}$ (зеленым); б — нормированное отклонение ΔD при использовании истинных (зеленым) и медианных (красным) значений $F_{10.7}$

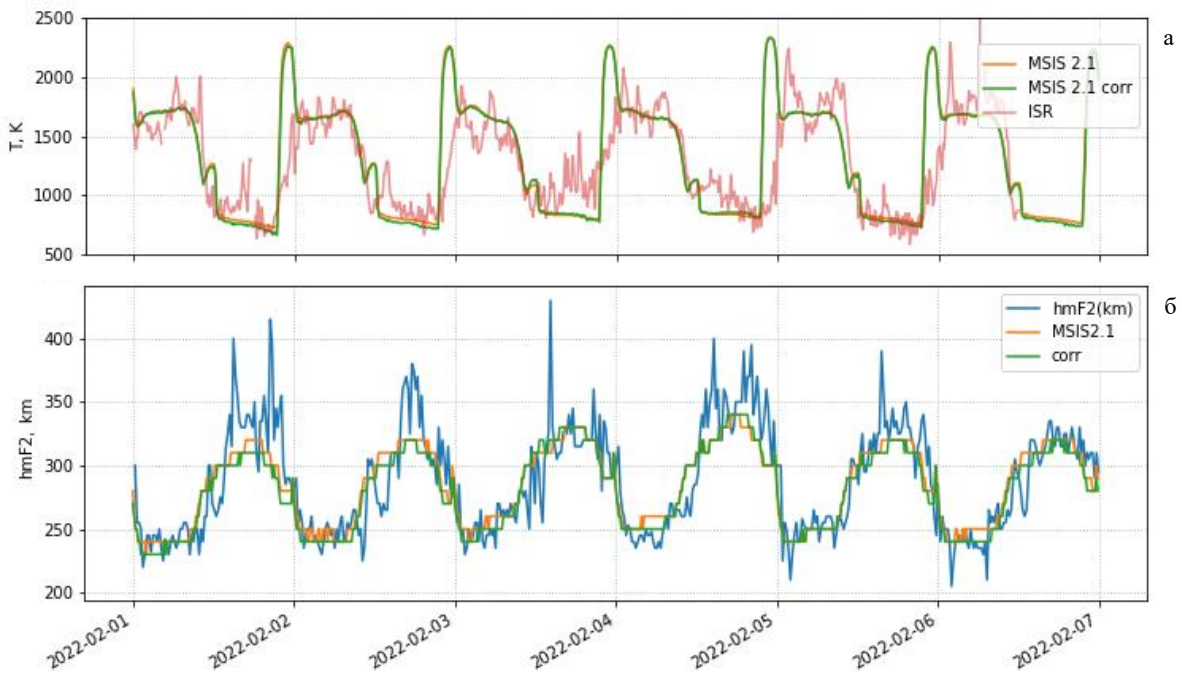


Рис. 2. Вариации электронной температуры на высоте 250 км (а, красным) и высоты максимума слоя F_2 (б, синим) по данным ИРНР в сравнении с одноименными параметрами по модели GIPC (MSIS 2.1) без коррекции $F_{10.7}$ (оранжевым) и с коррекцией (зеленым)

Мы выполнили моделирование параметров ионосферы для периода 1–7 февраля 2022 г. с использованием модели MSIS 2.1 с учетом возмущенной среды (SW (9) = -1) в двух режимах: применяя действительные значения и скорректированные значения F_{107} . На рис. 2 приведены вариации во времени электронной температуры на высоте 250 км (вверху) и высоты максимума слоя $F2$ (внизу) по данным Иркутского радара некогерентного рассеяния (ИРНР) и по результатам моделирования. Можно заключить, что вне зависимости от поправки F_{107} модель с использованием MSIS2.1 корректно воспроизводит суточный ход и восстанавливает предрассветный пик температуры (смещенный по времени, но согласующийся по амплитуде (для 5–6 февраля)). Высота максимума слоя $F2$ в возмущенный период оказываются ниже, чем предсказывает модель. Введение поправки дает более хорошее согласование высоты с наблюдениями в ночное время.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

He J., Astafyeva E., Yue X., Pedatella N.M. et al. Comparison of empirical and theoretical models of the thermospheric density enhancement during the 3–4 February 2022 geomagnetic storm // *Space Weather*. 2023. V. 21. e2023SW003521. DOI: 10.1029/2023SW003521.

Тацилин А.В., Романова Е.Б. Численное моделирование диффузии ионосферной плазмы в дипольном геомагнитном поле при наличии поперечного дрейфа // *Математическое моделирование*. 2013. Т. 25, № 1. С. 3–17.

Richards P.G., Fennelly J.A., Torr D.G. EUVAC: A solar EUV Flux Model for aeronomic calculations // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99. P. 8981–8992. DOI:10.1029/94JA00518.

Van den Ijssel J., Doornbos E., Iorfida E. et al. Thermosphere densities derived from Swarm GPS observations // *Adv. Space Res.* 2020. V. 65, iss. 7. P. 1758–1771. DOI: 10.1016/j.asr.2020.01.004.

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРАВЛЕННЫХ СВОЙСТВ КВ-АНТЕНН ПО ИЗМЕРЕНИЯМ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ, ПОЛУЧЕННЫМ С ПРИВЛЕЧЕНИЕМ БПЛА

В.Ю. Ермаков, В.П. Лебедев

Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия,
ermakov@iszf.irk.ru

STUDY OF E DIRECTIONAL PROPERTIES OF HF ANTENNAS BASED ON NEAR-FIELD MEASUREMENTS OBTAINED USING A UAV

V.Yu. Ermakov, V.P. Lebedev

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, ermakov@iszf.irk.ru

Аннотация. Для определения коэффициента поглощения электромагнитных волн, построения частотного профиля, определения электронной концентрации и др. и в целом для изучения атмосферы Земли используют радиотехнические устройства. Основным элементом таких устройств — антенная система, основные характеристики которой: диаграмма направленности основных поляризаций, коэффициент усиления и т.д., которые необходимо знать как можно точнее. Из-за различных факторов требуется проводить натурные измерения параметров антенных систем. В работе представлены результаты измерения направленных свойств антенн, развернутых в наблюдательном пункте Торы, при помощи беспилотного летательного аппарата DJI Matrice 100. Проведен сравнительный анализ измеренных и расчетных направленных свойств антенн в ближней зоне для основных поляризаций. Для расчета направленных свойств антенн в ближней зоне разработан соответствующий программный комплекс.

Ключевые слова: антенные системы, КВ антенны, ближняя и дальняя зоны антенны, измерение и моделирование диаграммы направленности, поляризация, беспилотный летательный аппарат.

Abstract. To determine the absorption coefficient of electromagnetic waves, construct a frequency profile, determine the electron concentration, etc., and to study the Earth's atmosphere in general, radio engineering devices are used. The main element of such devices is an antenna system, the main characteristics (directional patterns of the main polarizations, gain, etc.) of which must be known as accurately as possible. Due to various factors, it is necessary to carry out in-kind measurements of the parameters of antenna systems. The paper presents the results of measuring the directional properties of antennas deployed at the Tory observation point using the DJI Matrice 100 unmanned aerial vehicle. A comparative analysis of the measured and calculated directional properties of antennas in the near zone for the main polarizations is carried out. A corresponding software package has been developed to calculate the directional properties of antennas in the near zone.

Keywords: antenna systems, HF antennas, near and far antenna zones, radiation pattern measurement and modeling, polarization, unmanned aerial vehicle

ВВЕДЕНИЕ

Важными характеристиками антенных систем входящих в состав измерительных радиотехнических устройств является диаграмма направленности (ДН), поляризация, фазовый центр (ФЦ) антенны. ДН напрямую зависит от конфигурации антенной системы. Более того, ДН может меняться из-за стоящих рядом объектов, подстилающей поверхности, электрических параметров среды распространения и др. По этим причинам калибровка антенных систем всегда актуальна.

Калибровку антенных систем осуществляли путём облёта на вертолёте или аэростате. Последним на смену пришли беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Главными преимуществами БПЛА являются относительная дешевизна, быстрота облёта, относительно небольшие затраты на обслуживание. Недостатками являются относительно небольшая грузоподъёмность, сильно ограниченное время облёта, зависимость от погодных условий. Полёты осуществляются по заранее заданной траектории, с учётом поляризации антенн в канале связи, для этого в плане полёта задают тангаж, крен и рысканье БПЛА. На БПЛА, как правило, устанавливают дипольную антенну, так как проста в изготовлении, установке, настройке, имеет известные направленные свойства. Положение БПЛА надёжно фиксируется с помощью ГНСС, что крайне важно для калибровочных

измерений. Результаты калибровочных измерений необходимо сопоставлять с расчетной моделью антенной системы. В совокупности эти два подхода позволяют с одной стороны, проверить правильность модели, а с другой удостовериться, что измерение ДН антенны было выполнено корректно в соответствии с полетным заданием [Giuseppe et al., 2014; Bolli et al., 2016; de Lera Acedo et al., 2018].

Поставленные задачи: построить зависимость амплитуды несущего сигнала от угла места, сравнить результаты измерения антенн с результатами моделирования поля в ближней зоне. На основании сравнительного анализа сделать выводы.

КОНСТРУКЦИЯ ИЗМЕРЯЕМОЙ АНТЕННЫ И ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Проводилась калибровка КВ антенн типа «Дельта», развернутых в наблюдательном пункте Торы, расположенном на территории республика Бурятия в 152 км от Иркутска. Измерения КВ антенн выполнялись методом облёта с привлечением БПЛА DJI Matrice 100, с закрепленным на корпусе БПЛА передатчиком и антенной (электрический диполь). Измерения проводились на частотах 2, 3, 4, 5.5, 7 МГц для основной поляризации электромагнитного поля, и в двух плоскостях параллельно и перпендикулярно плоскости антенн [Лебедев и др., 2022].

Конструкция и размеры приёмной и передающей антенн «Дельта» представлены на рис. 1а и 1б, соответственно. В центре основания через согласующий трансформатор происходит запитка антенны, а на вершине над основанием подключена резистивная нагрузка номиналом 900 Ом.

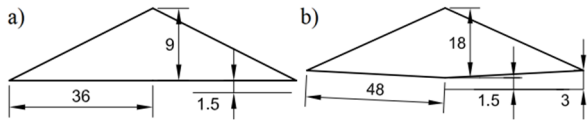


Рис. 1. Конструкция измеряемых антенн: а) Приёмная антенна типа «Дельта»; б) Передающая антенна типа «Дельта»

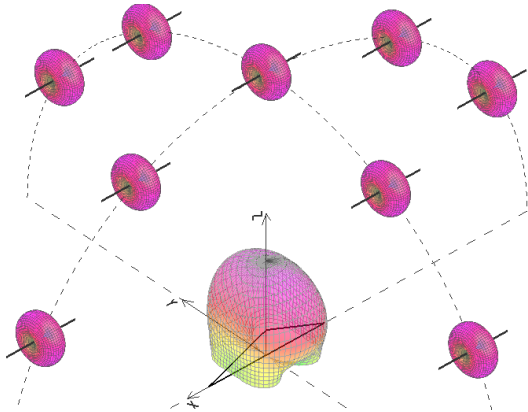


Рис. 2. Схема облёта исследуемых антенн типа «Дельта»

Траектория облёта представляет собой полуокружность с радиусом 250 м (рис. 2). Пунктирной линией нанесены траектории, в плоскости XZ в плоскости антенны, в плоскости YZ перпендикулярно плоскости антенны. На траекториях нанесены, чёрной жирной прямой — передающая антенна квадрокоптера, и её тороидальная ДН.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ АНТЕНН

На рис. 3–4 и 5–6 продемонстрированы ближнее поле антенны (чёрным цветом), полученное при параллельном/перпендикулярном облётах в поляризации, на частотах 4, 5.5 и 7 МГц. Результаты моделирования ближнего поля антенны (синим цветом), полученные нашей программой моделирования антенн. Результаты моделирования ДН (зелёным цветом), получены в специализированной программе моделирования антенн MMANA-GAL. Отметим, что MMANA-GAL не позволяет посчитать поле в ближней зоне, в нашем сравнении позволяет увидеть ДН антенн.

На рис. 3 и 4 видим, что моделирование описывает форму реального измерения. Расхождения по амплитуде связаны с тем, что в программах моделирования учитывалась лишь идеальная подстилающая поверхность и не учитывались стоящие рядом с антенной конструкции.

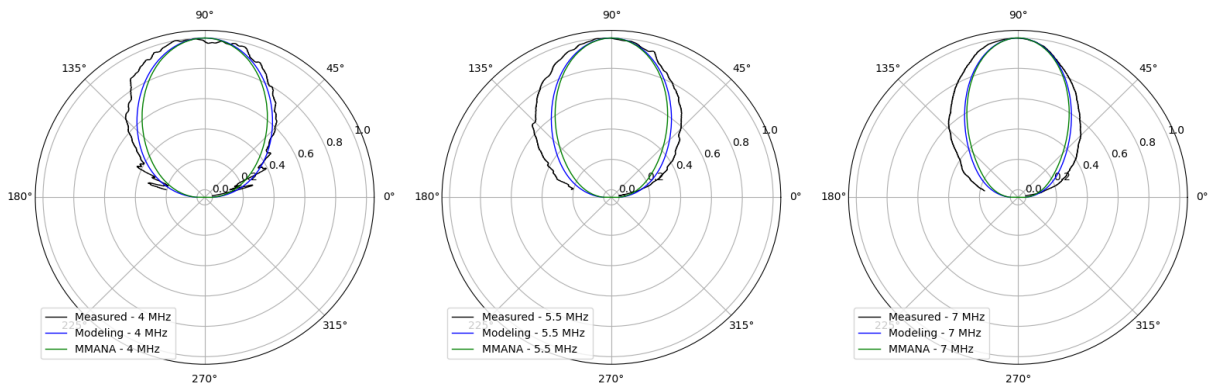


Рис. 3. Пролёт параллельно плоскости приёмной антенны «Дельта»

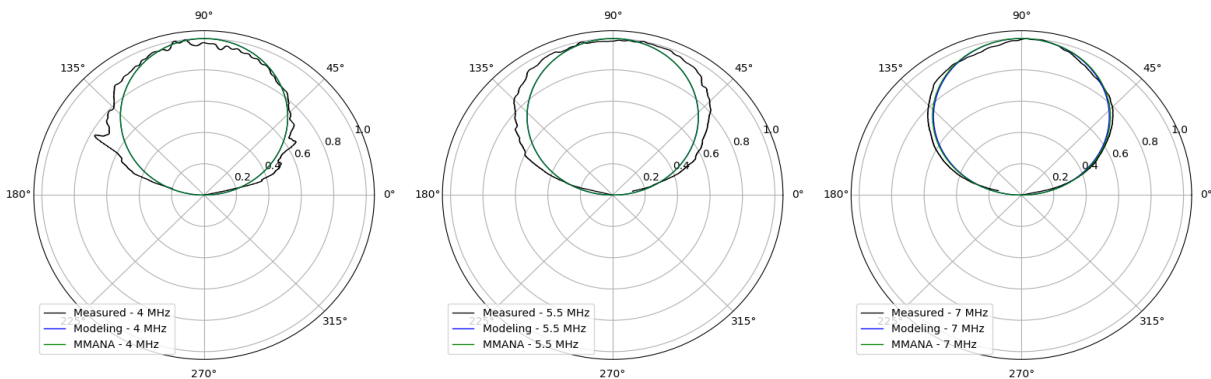


Рис. 4. Пролёт перпендикулярно плоскости приёмной антенны «Дельта»

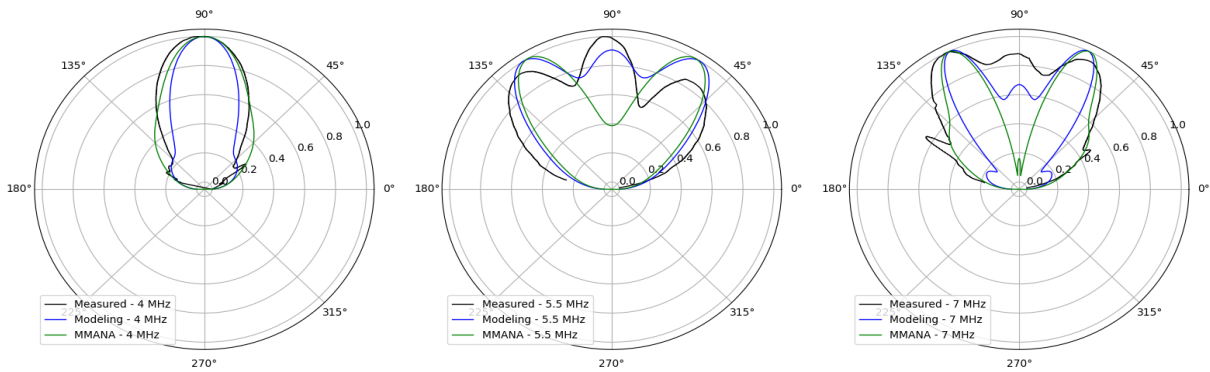


Рис. 5. Облёт параллельно плоскости передающей антенны «Дельта»

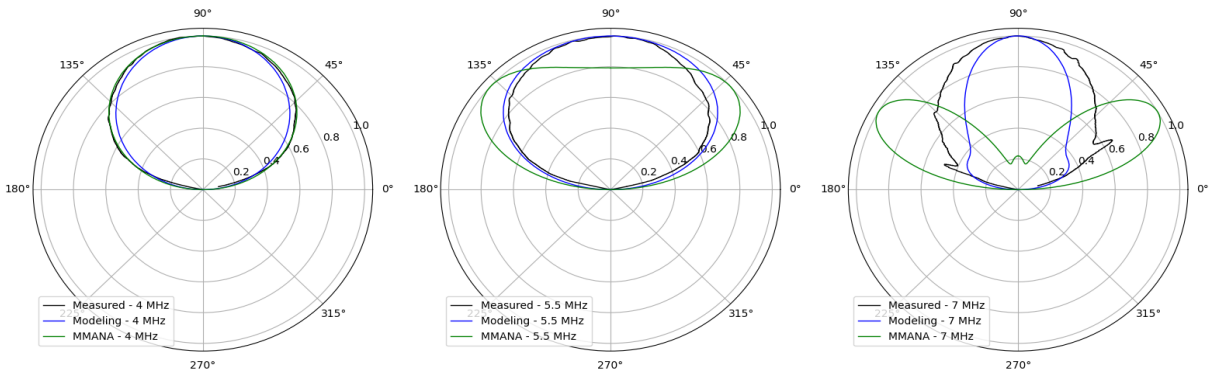


Рис. 6. Облёт перпендикулярно плоскости передающей антенны «Дельта»

В плоскости передающей антенны «Дельта» (рис. 5) с увеличением частоты направленные свойства антенны ухудшаются. На частоте 4 МГц в измерениях и модели, появляются боковые лепестки на низких углах места. На частоте 5.5 МГц, величина боковых лепестков значительно увеличивается. MMANA показывает, что усиление вверх значительно уменьшится. На 7 МГц амплитуда боковых лепестков становится больше, чем центральный лепесток, на низких углах места появляются дополнительные боковые лепестки. MMANA показывает, что усиление вверх будет минимальным.

В перпендикулярной плоскости (рис. 6) на частоте 4 МГц, моделирование хорошо описывает кривую реальных измерений. На частоте 5.5 МГц MMANA показывает, что максимальное усиление ДН направлено в стороны. На частоте 7.7 МГц на низких углах места появляются боковые лепестки, а ДН состоит из 2 лепестков с максимальным усилением и минимальным усилением вверх.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании сравнительного анализа можем заключить, что наша программа моделирования позволяет получить поле в ближней зоне с расхождениями по амплитуде, но близкое по форме

кривой реальных измерений. Для минимизации расхождений и определения реальной ДН антенн необходимо учитывать параметры подстилающей поверхности, стоящие рядом с антенной конструкцией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Лебедев В.П., Подлесный А.В., Цедрик М.В., Куркин В.И. Измерение диаграммы направленности КВ антенн методом облета с привлечением беспилотного летательного аппарата DJI Matrice 100 // Всероссийская открытая научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн». Муром, 2022. DOI: 10.24412/2304-0297-2022-1-538-545.

Virone G., Lingua A.M., Piras M. et al. Antenna Pattern Verification System Based on a Micro Unmanned Aerial Vehicle (UAV) // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2014. V. 13. P. 169–172.

Bolli P., Paonessab F., Pupillo G. et al. Antenna pattern characterization of the low-frequency receptor of LOFAR by means of an UAV-mounted artificial test source // Proc. SPIE. 2016. V. 9906 99063V-11. DOI:10.1117/12.2232419.

E. de Lera Acedo, P. Bolli, F. Paonessa, G. Virone, E. Colin-Beltran, N. Razavi-Ghods, I. Aicardi, A. Lingua, P. Maschio, J. Monari, G. Naldi, M. Piras, G. Pupillo. SKA aperture array verification system: electromagnetic modeling and beam pattern measurements using a micro UAV // DOI 10.1007/s10686-017-9566-x, Exp Astron. 2018. P. 45:1–20.

МЕТОДЫ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОБРАБОТКИ ПОЛЯ В ЗАДАЧАХ ДИАГНОСТИКИ ИОНОСФЕРЫ

М.А. Зверев, С.И. Книжин, М.В. Тинин

Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия,
mikhail.zverev.90@mail.ru

METHODS OF SPATIAL FIELD PROCESSING FOR IONOSPHERIC DIAGNOSTICS PROBLEMS

M.A. Zverev, S.I. Knizhin, M.V. Tinin

Irkutsk State University, Irkutsk, Russia, mikhail.zverev.90@mail.ru

Аннотация. В данной работе исследуются возможности применения двукратной пространственной обработки поля на основе метода ДВФП для повышения разрешающей способности спутниковой диагностики неоднородной ионосферной плазмы. Рассматривается случай, когда линейка источников синтезируется низкоорбитальным спутником. Модель фоновой ионосферы выбрана в виде простого слоя Чепмена. В качестве модели вариации диэлектрической проницаемости используются горизонтально движущиеся неоднородности, имеющие гауссов профиль.

Ключевые слова: пространственная обработка поля, спутниковая диагностика, ионосферная плазма.

Abstract. We explore the possibilities of double spatial field processing based on DWFT to increase the resolution of satellite diagnostics of inhomogeneous ionospheric plasma. In this case, a line of sources is synthesized by a low-orbit satellite. The model of the background ionosphere is chosen in the form of a simple Chapman layer. Horizontally moving inhomogeneities with a Gaussian profile are used as a model of dielectric permittivity variation.

Keywords: spatial field processing, satellite diagnostics, ionospheric plasma.

ВВЕДЕНИЕ

Для космической радиофизики одним из основных интересов является задача диагностики ионосферы Земли [Дэвис, 1973]. С развитием спутниковых технологий появились новые перспективные методы исследования ионосферы такие как спутниковая диагностика и радиозатменные измерения. С помощью радиозатменных измерений исследуются атмосфера и ионосфера планет. Спутниковую диагностику разделяют на лучевую и дифракционную [Куницын, Терещенко, 1991]. При помощи лучевой диагностики исследуются крупномасштабные ионосферные неоднородности. При этом в основном используется приближение геометрической оптики, поэтому в данном методе не учитываются дифракционные эффекты. Задача данного метода состоит в получении линейных интегралов, которые необходимы для восстановления физических характеристик среды [Куницын, Терещенко, 1991]. В дифракционной диагностике исследуют объекты, размеры которых не превышают радиуса Френеля, в рамках данного метода используют приближения фазового экрана, Борна, Рытова и двойного взвешенного Фурье преобразования (ДВФП). Значительную трудность при исследовании неоднородных объектов в плазме, масштабы которых не превосходят радиуса Френеля, представляют дифракция и многолучевость. Устранение влияния указанных эффектов на результаты измерений возможно при применении дополнительной пространственной обработки поля [Tinin, Kravtsov, 2008].

В данной работе мы исследуем возможности двукратной пространственной обработки поля на основе метода ДВФП для повышения разрешающей способности спутниковой дифракционной диагностики ионосферы с учетом горизонтальной скорости дрейфа плазменных неоднородностей.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть линейка источников синтезируется радиопередатчиком, расположенным на борту движущегося по орбите низкоорбитального спутника, а на земле располагается стационарная линейка приемников, регистрирующих поле радиоволн, прошедших через неоднородную среду. Будем считать, что спутник пролетает в зените над установкой, тогда можно рассматривать задачу в сечении плоскостью (x, z) (ось x направлена вдоль линейки приемников, а ось z — вертикально вверх).

Как известно, диэлектрическую проницаемость неоднородной ионосферной плазмы $\varepsilon(r)$ можно представить в вид суммы ее невозмущенного (фонового) значения $\underline{\varepsilon}(r)$ и флуктуаций (вариаций) относительно него $\tilde{\varepsilon}(r)$. Так как протяженность линейки источников и приемников невелика, то горизонтальный градиент в модели фоновой среды можно не учитывать, поэтому для нее используется выражение в виде простого слоя Чепмена [Дэвис, 1973].

В качестве модели вариации диэлектрической проницаемости возьмем две горизонтально движущиеся неоднородности, имеющие гауссов профиль:

$$\tilde{\varepsilon}(x, z, t) = \sum_{i=1}^2 \tilde{\varepsilon}_{mi} \exp \left[- \left(\frac{(x - x_{mi}(t))^2}{2l_{1i}^2} + \frac{(z - z_{mi}(t))^2}{2l_{2i}^2} \right) \right], \quad (1)$$

здесь для i -ой неоднородности $\tilde{\varepsilon}_{mi}$ — максимальное значение вариации диэлектрической проницаемости, l_{1i} и l_{2i} — характерные поперечные и продольные размеры, а положение центра $x_{mi}(t) = x_{mi} + v_{xi}t$ и $z_{mi}(t) = z_{mi}$, где v_{xi} — скорость горизонтального дрейфа.

Для модели поля зондирующей радиоволны воспользуемся выражением в приближении

фазового экрана [Knizhin, 2020]. Фаза рассеянного поля без применения дополнительной пространственной обработки поля определяется как:

$$k\Phi(x(t), x_0) = \text{Arg}[U(x(t), x_0)]. \quad (2)$$

Для повышения разрешающей способности диагностики неоднородной плазмы, масштабы которой меньше радиуса Френеля, воспользуемся пространственной обработкой поля на основе метода ДВФП, выполненного относительно координат источников и приемников [Tinin, Kravtsov, 2008]:

$$U^*(x^*, x_0^*) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} dx dx_0 U(x, x_0) \exp \left[ik \left(\frac{2(x^*x_0 + x_0^*x)}{Z} - \frac{(x + x_0)^2}{2Z} - Z \right) \right]. \quad (3)$$

Тогда, изменение фазы волны рассеянного поля после применения двукратной пространственной обработки поля:

$$k\Phi^*(x^*, x_0^*) = \text{Arg} \left[U^*(x^*, x_0^*) \exp \left(-\frac{2ikx^*x_0^*}{Z} \right) \right]. \quad (4)$$

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

За время синтеза спутником линейки источников физические параметры неоднородной среды претерпевают изменения: в данном случае исследуемые неоднородности перемещаются со скоростью дрейфа. Поэтому, когда физические параметры среды превышают определенные значения, являющиеся предельными в этом смысле, двукратная пространственная обработка поля на основе метода ДВФП может оказаться неприменимой. В связи с чем, рассмотрим изменение фазы рассеянного поля без дополнительной обработки поля и после применения двукратной пространственной обработки поля на основе метода ДВФП для различных значений скорости горизонтального дрейфа плазменных неоднородностей.

При численных расчетах используются следующие параметры. Высота орбиты низкоорбитального спутника 860 км, рабочая частота 150 МГц и скорость движения 7.5 км/с. В модели фоновой среды критическая частота 5 МГц, высота максимума ионосферной ионизации 300 км и характерная полутолщина слоя 150 км. Параметры исследуемых неоднородностей: $\tilde{\epsilon}_{m1} = \tilde{\epsilon}_{m2} = 0.002$, $l_{11} = l_{21} = 0.04$ км, $l_{12} = l_{22} = 0.04$ км, $x_{m2} = -x_{m1} = 0.11$ км и $z_{m1} = z_{m2} = 400$ км. Радиус Френеля $a_F \approx 0.64$ км превышает размеры неоднородностей.

Так как протяженность линейки приемников конечна и ее элементы расположены не непрерывно, то интеграл, входящий в обработку (3), был рассчитан в дискретной форме, когда количество элементов в приемной и передающей системах составляет $N_x = 200$ и $N_{x_0} = 200$, а расстояние между приемниками и источниками равняется $\Delta x = 40$ м и $\Delta x_0 = 40$ м. Для того чтобы синтезировать линейку источников, спутнику понадобится 1.1 с, при этом каждый отсчет должен вестись раз в 0.0055 с.

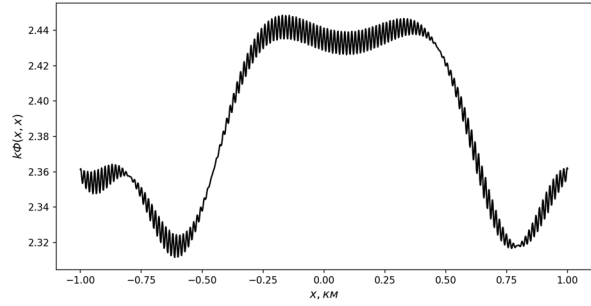


Рис. 1. Изменение фазы волны $k\Phi(x, x_0)$ до обработки (3) при $v_{x1} = v_{x2} = 170$ м/с

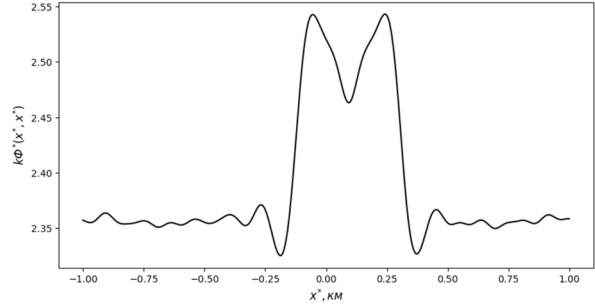


Рис. 2. Изменение фазы волны $k\Phi^*(x^*, x_0^*)$ после обработки (3) при $v_{x1} = v_{x2} = 170$ м/с

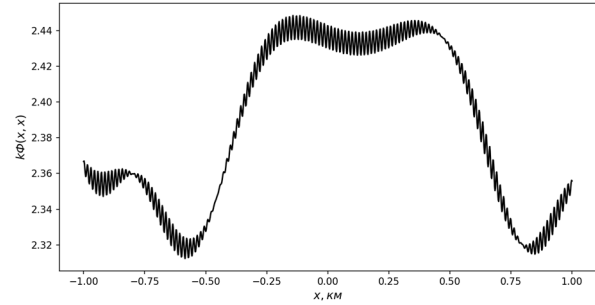


Рис. 3. Изменение фазы волны $k\Phi(x, x_0)$ до обработки (3) при $v_{x1} = v_{x2} = 230$ м/с

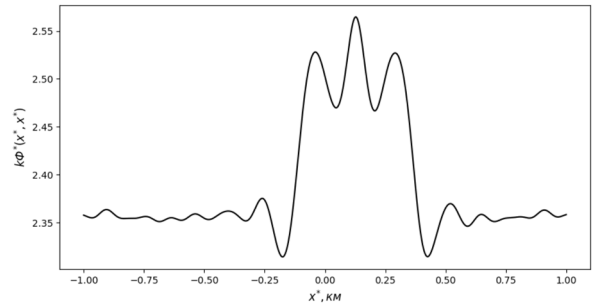


Рис. 4. Изменение фазы волны $k\Phi^*(x^*, x_0^*)$ после обработки (3) при $v_{x1} = v_{x2} = 230$ м/с

Из фазовых проекций $k\Phi(x, x_0)$ необработанного поля $U(x, x_0)$ при $x = x_0$ (рис. 1 и 3) видно, что из-за влияния дифракционных эффектов извлечь какую-либо информацию об исследуемой среде не представляется возможным. Применение двукратной пространственной обработки поля на основе метода ДВФП при скорости горизонтального дрейфа 170 м/с позволило устранить влияние дифракционных эффектов и выделить две гауссовы кривые в фазовой проекции $k\Phi^*(x^*, x_0^*)$ обработанного поля при $x^* = x_0^*$ (рис. 2), которые предельно различимы по критерию Рэлея. При дальнейшем

увеличении скорости горизонтального дрейфа, как это видно из рис. 4, применение дополнительной обработки поля не приводит к повышению разрешающей способности диагностики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты численных расчетов для выбранных параметров показали, что двукратная пространственная обработка поля на основе метода ДВФП позволяет повышать разрешающую способность спутниковой диагностики с помощью низкоорбитального спутника для близкорасположенных плазменных неоднородностей с масштабами меньше радиуса Френеля,двигающихся со скоростью горизонтального дрейфа меньшей 170 м/с.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (Задание № FZZE-2023-0004).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. М.: Мир, 1973. 504 с.
- Куницын В.Е., Терещенко Е.Д. Томография ионосферы. М.: Наука, 1991. 176 с.
- Knizhin S.I. Using spatial radio wave field processing for diagnostics of inhomogeneous plasma // *Waves in Random and Complex Media*. 2020. P. 1–21.
- Tinin M.V., Kravtsov Y.A. Super – Fresnel resolution of plasma in homogeneities by electromagnetic sounding // *Plasma Phys. Control. Fusion*. 2008. V. 50. P. 1–12.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ С РЕЖИМОМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ШИРОКОПОЛОСНЫХ РАДИОКАНАЛОВ ПО ДАННЫМ ПАССИВНЫХ РАДИОСЕНСОРОВ

А.А. Кислицын, Н.В. Рябова, М.А. Кислицына, Н.А. Конкин

Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола, Россия,
KislitsinAA@volgatech.net

INTELLIGENT DIAGNOSTIC SYSTEM WITH A MODE FOR PREDICTING THE PARAMETERS OF BROADBAND RADIO CHANNELS BASED ON DATA FROM GNSS PASSIVE RADIO SENSORS

A.A. Kislitsin, N.V. Ryabova, M.A. Kislitsina, N.A. Konkin

Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia, KislitsinAA@volgatech.net

Аннотация. Решается задача диагностики параметров широкополосных радиоканалов с режимом прогнозирования на основе методов интеллектуального анализа данных пассивных радиосенсоров глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Для задачи прогнозирования параметров широкополосных радиоканалов применена специальная рекуррентная нейронная RNN LSTM-сеть. Экспериментально показано, что достигается высокая точность прогноза: средняя абсолютная процентная ошибка составила менее 5 % при коэффициенте детерминации более 89 %.

Ключевые слова: пассивный радиосенсор ГНСС, нейронная сеть, полное электронное содержание, полоса когерентности, внутримодовая дисперсия.

Abstract. The problem of diagnosing the parameters of broadband radio channels in forecasting mode is addressed using intelligent data analysis methods from passive radio sensors of global navigation satellite systems (GNSS). A specialized recurrent neural network (RNN LSTM) was used to predict the parameters of broadband radio channels. Experimentally, it has been shown that high forecast accuracy is achieved, with an average absolute percentage error of less than 5% and a coefficient of determination greater than 89%.

Keywords: passive GNSS radio sensor, neural network, total electron content, coherence band, intra-mode dispersion.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время трансионосферная радиосвязь играет ведущую роль при организации инфокоммуникационной структуры страны и относится к одному из основных видов связи, способной обеспечить передачу больших объёмов информации на дальние расстояния. Спутниковая связь обеспечивается за счёт распространения волновых пакетов через изменчивые слои атмосферы и ионосферу [Иванов и др., 2023]. Стоит отметить, что в условиях переменного и непредсказуемого влияния ионосферы эффективная реализация широкополосных систем WGS (Wideband Global Satcom) и систем с высокой пропускной способностью HTS (High Throughput Satellites) затруднена из-за негативного влияния внутримодовой дисперсии групповой задержки в канале [Иванов и др., 2023]. В связи с этим проблема исследования и прогнозирования параметров широкополосных радиоканалов трансформируется в задачу влияния изменчивости геофизических факторов и в первую очередь – полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы [Yasyukevich et al., 2020]. Таким образом, существует неотложная потребность в надежных методах диагностики и прогнозирования ПЭС, а также системных параметров для обеспечения стабильной радиосвязи. В настоящее время актуальными инструментами прогнозирования параметров канала, в том числе геофизических — ПЭС, являются интеллектуальные системы на основе нейронных сетей [Shenvi, Virani 2023; Ruwali et al. 2020]. Дальнейшее развитие подхода с применением нейронных сетей позволит адаптировать широкополосную систему связи к сложным

и непредсказуемым условиям с эффективным частотно-энергетическим ресурсом канала.

Цель работы — развитие интеллектуальных методов исследования и диагностики параметров широкополосных трансионосферных радиоканалов с режимом прогнозирования на основе искусственных нейронных сетей.

МЕТОД ДИАГНОСТИКИ ПАРАМЕТРОВ ШИРОКОПОЛОСНЫХ КАНАЛОВ ПО ДАННЫМ ПАССИВНЫХ РАДИОСЕНСОРОВ ГНСС С РАЗВИТЫМ АЛГОРИТМОМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Диагностика параметров широкополосных радиоканалов ССС базируется на данных пассивных радиосенсоров, работающих в диапазоне частот 1100...1610 МГц. Созданные алгоритмы и программное обеспечение позволяют обрабатывать большой объём данных со спутников в формате RINEX, трансформируемых в текущие значения ПЭС ионосферы. Получаемые средние значения ПЭС по фазовым и кодовым измерениям используются для определения суточных вариаций параметра дисперсии групповой задержки GDD и текущей полосы когерентности канала [Кислицын А.А., 2019].

Была установлена связь между ПЭС и коэффициентом дисперсии групповой задержки GDD [Иванов и др., 2023]:

$$GDD = -\frac{1}{2\pi} \frac{kTEC}{c\bar{f}^3} = -\frac{1}{2\pi} \frac{kTEC}{c\bar{f}_r^3} \left(\frac{\bar{f}}{f_r}\right)^{-3} = |GDD_r| RF^{-3}, \quad (1)$$

где TEC — ПЭС в TECU, ($1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ м}^{-2}$), $k = 80,5 [m^3/c^2]$; c — скорость света; \bar{f} —

относительная частота; f_r – опорная частота; $RF = \bar{f}/f_r$ – относительная частота (Relative Frequency); GDD_r — коэффициент дисперсии групповой задержки на опорной частоте.

Осуществляя переход от полосы когерентности в угловых частотах $\Omega_c = \sqrt{8/|GDD|}$ к обычной частоте f , выражение для полосы когерентности будет иметь следующий вид:

$$B_c = \Omega_c/2\pi = 4\pi \sqrt{\frac{cf^3}{kTEC}} = 4 \sqrt{\frac{\pi cf_r^3}{kTEC}} RF^{\frac{3}{2}} = B_{cr} RF^{\frac{3}{2}}, \quad (2)$$

где Ω_{cr} — полоса когерентности на опорной частоте.

Для общности сомножители в выражениях (1), (2) были разделены на геофизическую и частотную составляющие. Изменение от геофизических факторов через ПЭС на опорной частоте характеризуют сомножители GDD_{cr} и B_{cr} . Второй сомножитель RF позволяет пересчитать параметры, полученные для канала на опорной частоте, на их значения для каналов на любой другой рабочей частоте \bar{f} .

Структурная схема, реализующая алгоритм работы рассмотренного метода с применением сети пассивных сенсоров ГНСС, представлена на рис. 1. Интеллектуальная система обеспечивает работу в двух основных режимах: режим анализа — осуществляется методом диагностики параметров трансionoсферного канала и адаптации в геофизическом времени предельной полосы частот канала до максимально возможной; режим прогнозирования значений предельных параметров радиоканала с применением специализированной нейронной

сети. Реализация обработки данных ПЭС и обучения моделей нейронной сети осуществляется на языке программирования Python с использованием фреймворка Keras, библиотеки Tensorflow. Для задачи прогнозирования полосы когерентности трансionoсферных радиоканалов используется специальная рекуррентная нейронная RNN LSTM-сеть.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ДИАГНОСТИКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЮ ПОЛОСЫ КОГЕРЕНТНОСТИ

Апробация интеллектуальной системы диагностики с режимом прогнозирования проводилась на основе данных натуральных экспериментов на трансionoсферных радиолиниях. В качестве исходных параметров использовались данные фазовых и кодовых измерений пассивных радиосенсоров ГНСС за 261 день. В рамках тестовой выборки достигнутые значения MAE, R2 и MAPE выступают ключевыми метриками, которые определяют уровень точности прогнозирования параметров радиолинии. Результаты обучения и валидации по метрике средней абсолютной процентной ошибки синтезированной рекуррентной нейронной сети прогнозировались от одного до семи дней. Было установлено, что для обучения нейронной сети необходимо 20 эпох.

На рис. 2 приведен полученный временной ход полосы когерентности для случая обучения, валидации и прогноза синтезированной рекуррентной нейронной сети.

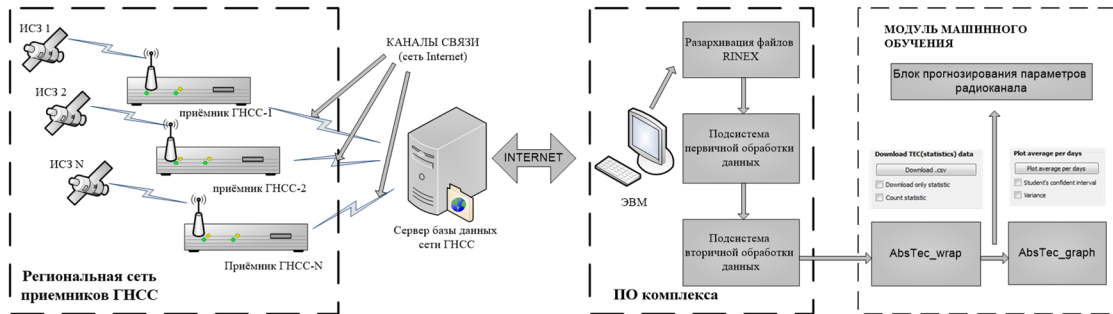


Рис. 1. Структурная схема работы пассивных сенсоров трансionoсферных радиоканалов

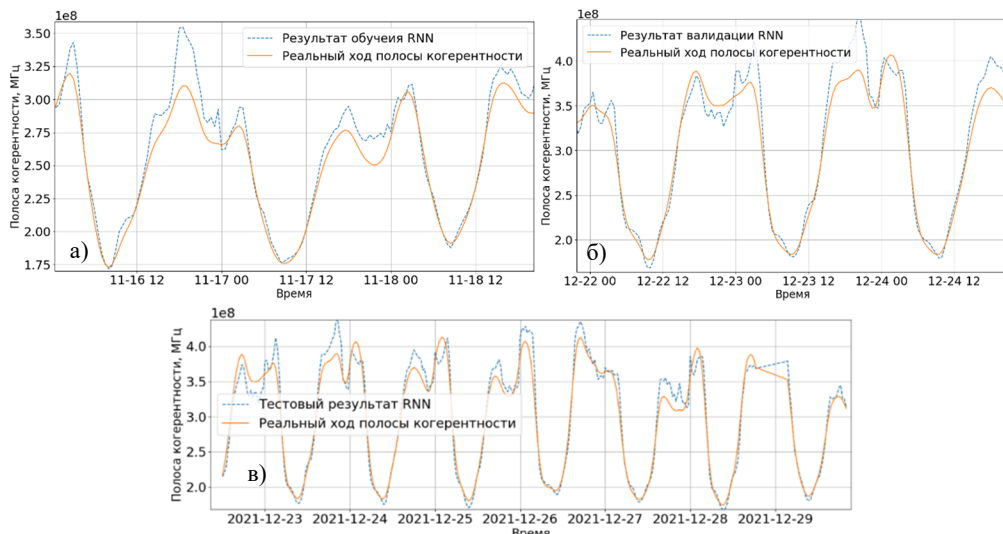


Рис. 2. Результаты обучения (а), валидации (б) и прогноза (в) синтезированной рекуррентной нейронной сети

В результате анализа полученных результатов, установлено, что интеллектуальная система обеспечивает высокую точность и адекватность в прогнозировании полосы когерентности, демонстрируя среднюю абсолютную процентную ошибку MAPE менее 5 % и коэффициент детерминации R2 более 89 %. Это говорит о высокой эффективности этого подхода для задачи прогнозирования полосы радиоканала в максимально приближенных к реальным условиям функционирования систем связи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развит метод диагностики и прогнозирования параметров широкополосных трансionoсферных радиоканалов на основе интеллектуальной системы в составе пассивных радиосенсоров ГНСС. Метод позволяет обрабатывать большой объём данных со спутников, трансформируемых по фазовым и кодовым измерениям в текущие значения ПЭС ионосферы с дальнейшим пересчётом в суточные вариации параметра дисперсии групповой задержки GDD и текущей полосы когерентности трансionoсферного радиоканала. Для задачи прогнозирования полосы когерентности в интеллектуальную систему интегрирована специальная рекуррентная нейронная RNN LSTM-сеть. Способность обучения нейронной сети на основе экспериментальных данных и адаптации системных параметров канала к реальным условиям эксплуатации делает новый подход ключевым элементом оптимизации работы инфокоммуникационных систем и повышает их эффективность.

В целом интеллектуальная система продемонстрировала высокую точность для задачи

прогнозирования с эффективными метриками средней абсолютной процентной ошибки менее 5 % при коэффициенте детерминации более 89 %.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда, проект № 23-19-00145.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Иванов Д.В., Иванов В.А., Рябова Н.В. и др. Обеспечение предельной широкополосности систем спутниковой радиосвязи в условиях внутримодовой дисперсии трансionoсферных радиоканалов // Радиотехника и электроника. 2023. Т. 68, № 6. С. 571–578. DOI 10.31857/S0033849423060049, EDN XLUNDS.

Yasyukevich Y., Mylnikova A., Vesnin A. GNSS-based non-negative absolute ionosphere total electron content, its spatial gradients, time derivatives and differential code biases: Bounded-variable least-squares and Taylor series // Sensors. 2020. V. 20, N. 19. P. 1–20. DOI 10.3390/s20195702.

Shenvi N., Virani H. Forecasting of Ionospheric Total Electron Content Data Using Multivariate Deep LSTM Model for Different Latitudes and Solar Activity // J. Electrical and Computer Engineering. 2023. V. 2023. P. 1–13. DOI: <https://doi.org/10.1155/2023/2855762>.

Ruwali A., Kumar A.J.S., Prakash K.B. et al. Implementation of Hybrid Deep Learning Model (LSTM-CNN) for Ionospheric TEC Forecasting Using GPS Data // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2021. V. 18, N 6. P. 1004–1008. DOI:10.1109/LGRS.2020.2992633.

Кислицын А.А. Комплексный подход к адаптивной компенсации дисперсионных искажений системных характеристик широкополосных трансionoсферных радиоканалов // Вестник ПГТУ Серия Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2019. № 3(43). С. 6–21.

СЕНСОРНАЯ ДИАГНОСТИКА ПРЕДЕЛЬНОЙ ПОЛОСЫ ЧАСТОТ ТРАНСИОНОСФЕРНОГО КАНАЛА В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ ИОНОСФЕРЫ

М.А. Кислицына, А.А. Кислицын

Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола, Россия,
KislitsinAA@volgatech.net

SENSORY DIAGNOSTICS OF THE LIMITING FREQUENCY BAND OF TRANSIONOSPHERIC CHANNEL UNDER THE INFLUENCE OF DESTABILIZING FACTORS OF THE IONOSPHERE

M.A. Kislitsina, A.A. Kislitsin

Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia,
KislitsinAA@volgatech.net

Аннотация. Решается задача сенсорной диагностики предельной полосы частот транссионосферного канала в условиях изменчивой внутримодовой дисперсии групповой задержки, приводящей к сложным дисперсионным искажениям волновых пакетов. Математическое обеспечение технических средств основано на применении методов интеллектуального анализа данных экспериментальной диагностики транссионосферной линии связи. Установлено, что без адаптации удается создать радиоканалы неискаженной передачи с полосой 70 МГц. Адаптация к изменчивости дисперсии позволяет увеличить полосу канала в среднем до 2.5 раза.

Ключевые слова: транссионосферный радиоканал, полоса когерентности, полное электронное содержание, сенсорная диагностика, внутримодовая дисперсия.

Abstract. The problem of sensor diagnostics for the limiting frequency band of a transionospheric channel is addressed under conditions of variable intra-mode group delay dispersion, which causes complex dispersion distortions in wave packets. The technical approach is supported by intelligent data analysis methods from experimental diagnostics of a transionospheric communication line. It has been established that, without adaptation, it is possible to create radio channels with an undistorted transmission bandwidth of 70 MHz. Adapting to dispersion variability can increase the channel bandwidth by an average of 2.5 times.

Keywords: transionospheric radio channel, coherence band, total electron content, sensor diagnostics, intramode dispersion.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время спутниковая связь является приоритетной широкополосной технологией для обеспечения территорий мультимедийной связью и создания корпоративных высокоскоростных интернет-сетей [Пантелеймонов и др., 2022]. Распространение радиосигналов осуществляется по транссионосферным радиоканалам (ТРК), обеспечивающих передачу или приём информации между промежуточным спутниковым ретранслятором и наземными инфокоммуникационными системами через всю толщу ионосферы на рабочих частотах из диапазона 0,1...30 ГГц.

Так как большая часть канала находится в ионосфере, то существенное влияние на прохождение радиосигнала оказывают факторы, сказывающиеся на возмущенные процессы в ней [Armand, 2003]. Значительным является ограничение полосы частот каналов, не позволяющее осуществлять передачу информации по каналам с высокой пропускной способностью. С ростом полосы после некоторого её значения, называемого полосой когерентности, возникают искажения, связанные с изменчивой дисперсией групповой задержки в ТРК [Иванов и др., 2021]. При этом ключевым параметром, отвечающим за искажение радиосигнала, является полное электронное содержание (ПЭС) ионосферы [Yasyukevich et al., 2020]. Таким образом,

актуальной является проблема диагностики предельно возможной полосы канала, для решения которой существует необходимость в использовании интеллектуального анализа большого объёма данных от радиосенсоров сети ГНСС.

Цель работы – развитие интеллектуального метода и комплекса средств для сенсорной диагностики предельной полосы частот в транссионосферных радиоканалах связи.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И СРЕДСТВА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕДЕЛЬНОЙ ПОЛОСЫ ЧАСТОТ

Для транссионосферных систем рабочие частоты значительно превышают критическую частоту глобального максимума ионосферы $\bar{f}/f_0 F2 = \bar{\omega}/\omega_0 F2 > 10$ ($f_0 F2$ — критическая частота F2-слоя), что согласно [Иванов и др., 2023] позволяет для физической модели канала распространения установить связь между ПЭС, полосой когерентности и коэффициентом дисперсии групповой задержки GDD .

Так, физическая модель дает следующие выражения для набега фазы и задержки группы частот [Кислицын, 2019]:

$$\phi(\omega, t) = \frac{1}{c} \int_S [\omega \cdot n(\omega, t, z)] dz \approx \omega \int_S \frac{dz}{c} - \frac{1}{f} \frac{d\phi}{dt} \int_S N_e(z, t) dz = \omega \int_S \frac{dz}{c} - \frac{\alpha_1(t)}{f}, \quad (1)$$

$$\tau_g(f, t) = \frac{d\phi}{d\omega}(f, t) = \frac{1}{2\pi} \left[2\pi \int_S \frac{dz}{c} + \frac{\alpha_1(t)}{f^2} + \dots \right]. \quad (2)$$

где $n(\omega, t, z)$ — показатель преломления, $\alpha_1(t) = 8,43 \cdot 10^{-7} \cdot \int_S N_e(t, z) dz, N_t(t) = \int_S N_e(z, t) dz$ — ТЕС ионосферы (при больших значениях z).

Если группу частот компактно расположить вокруг частоты $\bar{\omega}$, то набег фазы и задержку группы можно разложить в ряд Тейлора по разностным частотам $\Omega = \omega - \bar{\omega}$:

$$\phi(\bar{\omega} + \Omega, t) = \phi(\bar{\omega}, t) + \phi'_\omega(\bar{\omega}, t) \cdot \Omega + \frac{\phi''_\omega(\bar{\omega}, t)}{2} \cdot \Omega^2 + \dots, \quad (3)$$

$$\tau_g(\bar{\omega} + \Omega, t) = d\phi(\bar{\omega} + \Omega, t) / d\omega \approx \tau_g(\bar{\omega}, t) + \phi''_\omega(\bar{\omega}, t) \cdot \Omega + \dots, \quad (4)$$

где ϕ''_ω — дисперсия групповой задержки.

Известно [Кислицын и др., 2019], что огибающая группы начинает испытывать искажения, если ее полоса частот превысит некоторую предельную полосу частот, называемую полосой когерентного распространения B_k . Тогда для дисперсии второго порядка характерно следующее выражение:

$$\frac{\phi''_\omega(\bar{\omega}, t)}{2} \cdot \left(\frac{\Omega_k}{2}\right)^2 = \frac{GDD}{2} \cdot \left(\frac{\Omega_k}{2}\right)^2 = 1. \quad (5)$$

С учётом (5) для трансионосферного распространения получим выражение полосы когерентности через геофизические характеристики среды в виде:

$$B_k = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{8}{GDD}} = \sqrt{(c \cdot \hat{f}^3) / (\pi k N_t)} = \frac{\hat{f}^{-1,5}}{\sqrt{\alpha_1}} = \frac{f_r^{1,5}}{\sqrt{\alpha_1}} \hat{f}^{1,5} = B_{kr} \cdot \hat{f}^{1,5}, \quad (6)$$

где $\hat{f} = \bar{f} / f_r$ — относительная частота; f_r — опорная частота; B_{kr} — полоса когерентности для группы на опорной частоте.

Диагностика предельной полосы частот по полученной математической модели основывается на данных ГНСС-радиосенсоров (рис. 1). Радиосенсоры обеспечивают приёмный терминал информацией со спутников в формате *RINEX*. Программная часть сенсорной системы позволяет обрабатывать большой объём данных формата *RINEX* с целью получения для выбранного времени наблюдений суточных вариаций ПЭС ионосферы по результатам фазовых и кодовых измерений, с дальнейшим пересчётом на значения полос когерентности.

Представленный комплекс позволяет проводить сенсорную диагностику для трёх случаев: 1) определение предельной полосы канала при условии отсутствия ее адаптации к суточным изменениям ПЭС; 2) нахождение предельной полосы с учётом адаптации к вариациям параметра дисперсии; 3) оценка предельной широкополосности при адаптивной коррекции дисперсии методом инверсной фильтрации.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СУТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПРЕДЕЛЬНОЙ ПОЛОСЫ ЧАСТОТ РАДИОКАНАЛА

Для верификации достижения поставленной цели в Поволжском государственном технологическом университете, ПГТУ (г. Йошкар-Ола) в декабре, марте, июне и сентябре 2022 г. в условиях невозмущенной среднеширотной ионосферы были проведены соответствующие эксперименты. На рис. 2 представлен суточный ход диапазонов изменения предельной полосы частот ТРК с опорной частотой 1 ГГц для различных сезонов года.

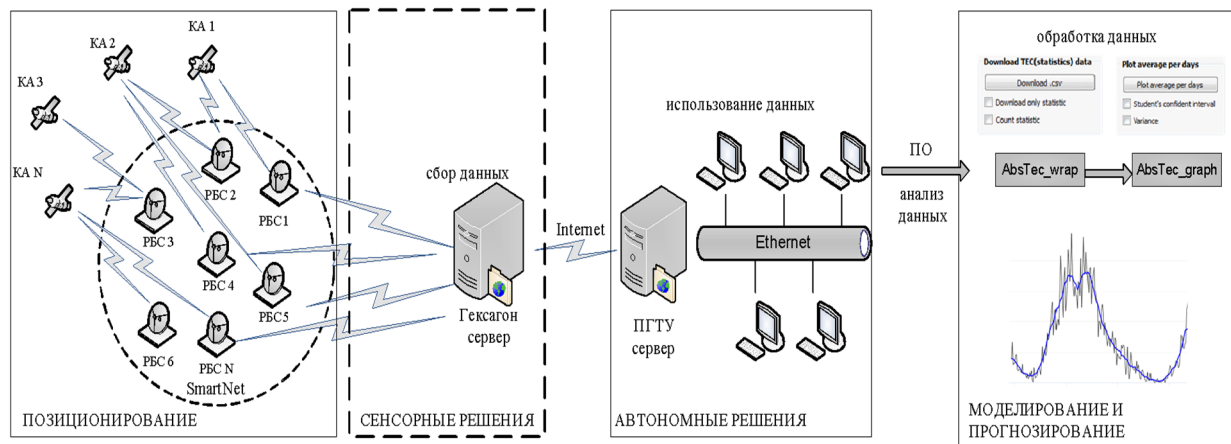


Рис. 1. Структурная схема аппаратно-программного комплекса сенсорной диагностики: КА — космический аппарат систем ГНСС; РБС — референсная базовая станции сети

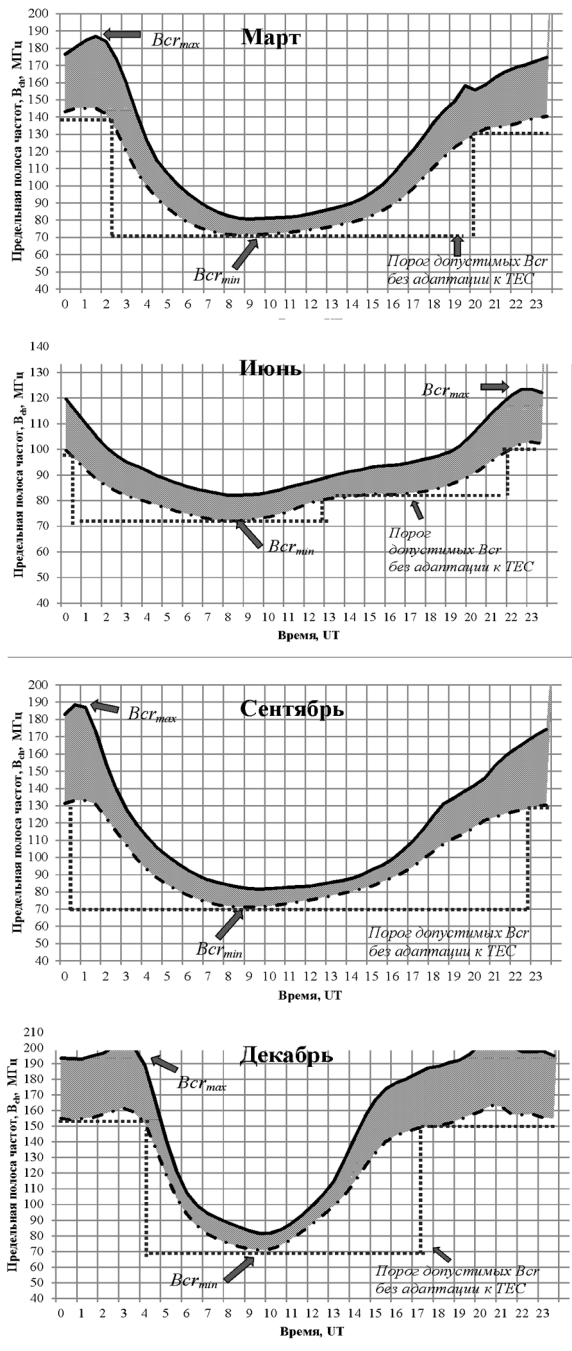


Рис. 2. Суточные ходы полос когерентности ТРК для различных сезонов

Текстура на рисунке характеризует диапазон наблюдавшихся за указанный период значений предельной полосы частот. Так, в марте диапазон вариаций полосы составил 71...187 МГц; в июне 72...123 МГц; в сентябре 71...188 МГц и в декабре 70...202 МГц. Видно, что для всех сезонов значения полосы в дневное время меньше, чем в ночное. Пунктиром показаны значения и интервалы времени для ночных и дневных полос, когда алгоритм их выбора не является адаптивным. При этом

дневные полосы являются предельными за сутки, если в алгоритме не учитывать переходы от дня к ночи. Поэтому для всех сезонов предельная полоса по данным 2022 г. не должна превышать 70 МГц.

При адаптации предельная полоса опорного канала может достигать: в марте 145 и 187 МГц, в июне 102 и 123 МГц, в сентябре 133 и 188 МГц, в декабре 163 и 202 МГц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развит метод и комплекс средств для сенсорной диагностики предельной полосы ТРК с дальнейшей её адаптацией к условиям воздействия дестабилизирующих факторов ионосферы при функционировании систем спутниковой связи. Для экспериментальных исследований развит программно-аппаратный комплекс, включающий интеллектуальные пассивные радиосенсоры ГНСС и программное обеспечение, реализующее режимы анализа, машинного обучения и инверсной фильтрации. Метод прошел экспериментальную верификацию в части решения задачи обеспечения предельной полосой частот ТРК. Экспериментально установлено, что на опорной частоте без адаптации можно получить каналы с полосой канала не превышающие 70 МГц. Адаптация к суточным вариациям параметров дисперсии позволяет увеличить полосу когерентности в среднем до 2.5 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Иванов Д.В., Иванов В.А., Кислицын А.А. и др. Адаптивное управление предельной полосой частот систем спутниковой связи в трансionoсферных радиоканалах в условиях частотной дисперсии среды // Вестник ПГТУ. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2021. № 3(51). С. 14–30. DOI 10.25686/2306-2819.2021.3.14. EDN UQKLTO
- Иванов Д.В., Иванов В.А., Рябова Н.В. и др. Обеспечение предельной широкополосности систем спутниковой радиосвязи в условиях внутримодовой дисперсии трансionoсферных радиоканалов // Радиотехника и электроника. 2023. Т. 68, № 6. С. 571–578. DOI 10.31857/S0033849423060049, EDN XLUNDS.
- Кислицын А.А. Комплексный подход к адаптивной компенсации дисперсионных искажений системных характеристик широкополосных трансionoсферных радиоканалов // Вестник ПГТУ. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2019. № 3(43). С. 6–21.
- Пантелеймонов И.Н., Мырова Л.О., Яхин И.Х. и др. Основные перспективные направления системного проектирования сетей и систем спутниковой связи // Электросвязь. 2022. № 8. С. 8–17.
- Yasyukevich Y., Mylnikova A., Vesnin A. GNSS-based non-negative absolute ionosphere total electron content, its spatial gradients, time derivatives and differential code biases: Bounded-variable least-squares and Taylor series // Sensors. 2020. V. 20, N 19. P. 1–20. Doi 10.3390/s20195702.
- Armand N.A. Propagation of broadband signals in dispersive media // J. Communications Technology and Electronics. 2003. V. 48, N 9. P. 1045–1057.

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АВРОРАЛЬНОГО КИЛОМЕТРОВОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

В.И. Колпак^{1,2}, М.М. Могилевский¹, Д.В. Чугунин¹, А.А. Чернышов¹,
И.Л. Моисеенко¹, М.О. Рязанцева¹

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия,
lera.kolpak@yandex.ru

²Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН, Троицк, Москва, Россия

ON POSSIBILITY OF USING AURORAL KILOMETRIC RADIATION TO DETERMINE SOME CHARACTERISTICS OF SOLAR WIND

V.I. Kolpak^{1,2}, M.M. Mogilevsky¹, D.V. Chugunin¹, A.A. Chernyshov¹,
I.L. Moiseenko¹, M.O. Riazantseva¹

¹Space Research Institute of RAS, Moscow, Russia,
lera.kolpak@yandex.ru

²Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences,
Troitsk, Moscow, Russia

Аннотация. Представлены результаты статистической обработки измерений аврорального километрового радиоизлучения (АКР), зарегистрированного на спутнике WIND вблизи точки либрации L1. Показано, что частота регистрации АКР изменяется в противофазе с вариациями солнечной активности. Сделано предположение, что такое изменение частоты регистрации АКР связано с особенностью распространения радиоизлучения в неоднородной плазме солнечного ветра.

Ключевые слова: авроральное километровое радиоизлучение, солнечный ветер, плазменные неоднородности, распространение радиоволн.

Abstract. The results of statistical processing of measurements of auroral kilometric radiation (AKR) detected on the WIND satellite near the libration point L1 are presented. It is shown that the frequency of AKR registration varies in antiphase with variations in solar activity. It is assumed that such a change in the frequency of AKR registration is due to the peculiarity of propagation of radio emission in the inhomogeneous plasma of the solar wind.

Keywords: auroral kilometric radio emission, solar wind, plasma inhomogeneities, propagation of radio waves.

Авроральное километровой радиоизлучение (АКР) получило название по расположению источника и характерной длине волны [Бенедиктов и др., 1965; Gurnett, 1974; Kurth et al., 1975]. Источником энергии АКР являются потоки сверхтепловых электронов (1–10 кэВ), инжектируемых из хвоста магнитосферы Земли во внутренние области во время геомагнитных возмущений. Механизм генерации АКР — циклотронная мазерная неустойчивость (ЦМН) [Wu, Lee, 1979; Louarn, Le Quéau, 1996], развивающаяся в областях с пониженной плотностью плазмы (кавернах Кальверта) [Benson, Calvert, 1979], где выполняется условие

$$f_{pe} < f_{Be},$$

где $f_{pe} = \left(\frac{4\pi 2N}{m}\right)^{\frac{1}{2}}$ — плазменная электронная частота; e — заряд электрона; N — плотность плазмы, m — масса электрона; $f_{Be} = \frac{Be}{mc}$ — гирочастота электронов, B — магнитное поле, c — постоянная скорости света. При развитии ЦМН все частицы плазмы резонансно передают энергию электромагнитному излучению, что приводит к высокой интенсивности АКР. При сильных геомагнитных возмущениях до 10 % энергии частиц переходит в электромагнитное излучение и интегральная интенсивность АКР может достигать 10^7 – 10^9 Вт. Вытянутые воль магнитного поля каверны Кальверта формируют диаграмму направленности АКР. Типичные значения раскрытия конуса излучения

составляет 25–35° от направления магнитного поля в источнике излучения [Могилевский и др., 2007]. Частотный диапазон АКР составляет 30–900 кГц и его направление распространения — от Земли. Поэтому, в обычных условиях, регистрация АКР возможна только приемниками, установленными на борту космических аппаратов.

Полученные на сегодняшний день данные о свойствах АКР и о характере распространения этого излучения в различных плазменных средах позволяют его использовать для диагностики свойств плазмы, в которой оно распространяется [Calvert, 1982; Могилевский и др., 2022; Колпак и др., 2024]. Для исследования некоторых свойств солнечного ветра мы использовали результаты измерений электромагнитного поля в диапазоне частот 4–1000 кГц, выполненных на борту спутника WIND [Bougeret et al., 1993]. Спутник WIND был запущен 1 ноября 1994 г. и на первом этапе измерения проводились на орбите Земли в рамках программы координированных измерений ISTP (International Solar Terrestrial Physics) совместно со спутниками POLAR, GEOTAIL, Интербол-1 и Интербол-2. С июня 2004 г. спутник WIND был переведен в область точки Лагранжа L1, где измерения проводятся по настоящее время.

Для анализа мы выбрали интервал с 06.2004 г. по 08.2020 г. Шестнадцатилетние однородные измерения позволяют провести статистический анализ при различных уровнях солнечной активности.

Анализ параметров плазмы и электромагнитных полей на спутнике WIND на расстоянии $\sim 200R_e$ от Земли позволяют выявить зависимость частоты появления АКР от солнечной активности.

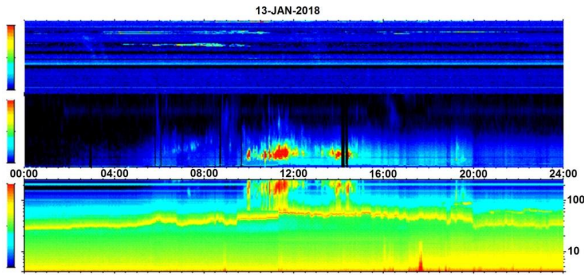


Рис. 1. Спектрограмма электрической компоненты поля, зарегистрированной на спутнике WIND 13 января 2018 г. в диапазонах частот: 4–245 кГц (нижняя панель), 20–1040 кГц (средняя панель), 10–14 МГц (верхняя панель)

Пример электрических сигналов, зарегистрированных на спутнике WIND, приведен на рис. 1. В нижнем диапазоне частот, на частотах 30–60 кГц во всем интервале наблюдений регистрируются колебания на частоте верхнего гибридного резонанса:

$$f_{UH} = (f_{pe}^2 - f_{Ve}^2)^{\frac{1}{2}}.$$

Поскольку в солнечном ветре $f_{pe} \gg f_{Ve}$, то в первом приближении можно считать, что вариации f_{UH} связаны с изменением плотности плазмы. Отсюда следует, что в период наблюдений плотность плазмы изменялась от 10 до 40 частиц/см³. В интервале времени ~ 10 –20 UT было зарегистрировано АКР, всплески которого наблюдаются в диапазоне частот 100–400 кГц в нижнем и среднем диапазонах. 13 января АКР наблюдалось при повышении плотности плазмы, т.е. в плазменном канале, что бывает не всегда.

Для выявления закономерностей изменения АКР было проведено усреднение количества дней в месяц, в которые наблюдались излучения. Для сравнения с активностью Солнца были использованы наблюдения чисел Вольфа (ЧВ), а для геомагнитной активности использовался Kp индекс. Все три параметра приведены на графиках рис. 2. Зависимость частоты появления АКР от ЧВ представляется парадоксальным. Еще в первых работах по АКР было замечено, что появление АКР зависит от геомагнитной активности [Бенедиктов и др., 1965; Gurnett, 1974; Kurth et al., 1975] — АКР появляется при геомагнитных возмущениях. Механизм генерации АКР объясняет эту зависимость [Wu, Lee, 1979; Louarn, Le Quéau, 1996]. Но нами получена обратная зависимость — частота появления АКР и солнечная активность находятся в противофазе. Следует отметить, что на анализируемом интервале зависимость Kp от солнечной активности не всегда хорошо просматривается, но сравнение Kp и частоты появления АКР также похоже на противофазное.

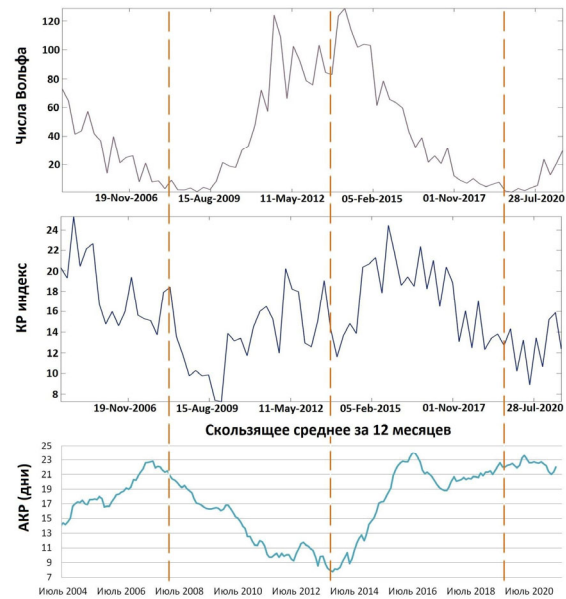


Рис. 2. Усредненные значения чисел Вольфа (верхняя панель), индекса геомагнитной активности Kp (средняя панель) и частота появления АКР — количество «активных» дней в месяц (нижняя панель)

Мы предполагаем, что такая зависимость частоты появления АКР от солнечной активности связана не с генерацией АКР в магнитосфере Земли, а особенностями распространения АКР в солнечном ветре. В работах [Calvert, 1982; Могилевский и др., 2022; Колпак и др., 2024] на основе измерений в магнитосфере Земли было показано, что АКР может захватываться в плазменные каналы — вытянутые вдоль магнитного поля неоднородности плазмы. Такой захват может происходить даже при условии, когда частота излучения больше плазменной частоты. Для этого необходимо выполнение определенного соотношения между направлением оси канала и углом распространения излучения [Колпак и др., 2024]. Неоднородности плотности плазмы наблюдаются и в солнечном ветре (рис. 1) — т.н. «лапша Застенкера» [Застенкер и др., 2013]. Мы предполагаем, что неоднородности солнечного ветра в спокойных условиях более протяженные, чем в возмущенных условиях. Таким образом, «длинные» каналы могут переносить АКР до спутника WIND (1,5 млн км) в спокойных условиях. В возмущенных условиях источники инжекции плазмы меняются быстрее, что приводит к формированию «коротких» каналов, которые не могут «донести» АКР до орбиты спутника WIND, т.е. каналы становятся существенно меньше 1,5 млн. км.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бенедиктов Е.А., Гетманцев Г.Г., Митяков Н.А. и др. Результаты измерений интенсивности радиоизлучения на частотах 725 и 1525 кГц при помощи аппаратуры, установленной на спутнике «ЭЛЕКТРОН-2» / Исследование космического пространства. М.: Наука, 1965. С. 581–606.

Застенкер Г.Н., Шафранкова Я., Немечек З. и др. Быстрые измерения параметров солнечного ветра с помощью прибора БМСВ // *Космич. исслед.* 2013. Т. 51, № 2. С. 88–99.

Колпак В.И., Могилевский М.М., Чугунин Д.В. и др. Перенос аврорального километрового радиоизлучения посредством каналов с пониженной плотностью на границе плазмы // *Солнечно-земная физика.* 2024. Т. 10, № 1. С. 21–30.

Могилевский М.М., Романцова Т.В., Ханаш Я. и др. Об источнике аврорального километрового излучения // *Письма в ЖЭТФ.* 2007. Т. 86, Вып. 11. С. 819–821.

Могилевский М.М., Чугунин Д.В., Чернышов А.А. и др. Канализация аврорального километрового радиоизлучения при геомагнитных возмущениях // *Письма в ЖЭТФ.* 2022. Т. 115, № 10. С. 636–641.

Benson R.F., Calvert W. ISIS-1 observations of the source of AKR // *Geophys. Res. Lett.* 1979. V. 6. P. 479.

Bougeret J.-L., Kaiser M.L., Kellogg P.J. et al. Waves: The Radio and Plasma Wave Investigation on the Wind Spacecraft // *Space Sci. Rev.* 1993. V. 71. P. 231–263.

Calvert W. Ducted Auroral Kilometric Radiation // *Geophys. Res. Lett.* 1982. V. 9, N 1. P. 56–59.

Gurnett D.A. The Earth as a radio source: Terrestrial kilometric radiation // *J. Geophys. Res.* 1974. V. 79, N 28. P. 4227.

Kurth W.S., Baumbach M.M., Gurnett D.A. Direction finding measurements of auroral kilometric radiation // *J. Geophys. Res.* 1975. V. 80. P. 2764.

Louarn P., Le Quéau D. Generation of the auroral kilometric radiation in plasma cavities-II. The cyclotron maser instability in small size sources // *Planet. Space Sci.* 1996. V. 44, N 3. P. 211.

Wu C.S., Lee L.C. A theory of the terrestrial kilometric radiation // *Astrophys. J.* 1979. V. 230. P. 621.

АСТРОКЛИМАТ ОБСЕРВАТОРИИ ПИК ТЕРСКОЛ

Е.А. Копылов¹, Л.А. Больбасова², А.Ю. Шиховцев³, С.А. Потанин^{1,4}, А.М. Сачков¹

¹Институт астрономии РАН, Москва, Россия,
kopylov@inasan.ru

²Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия

³Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, Россия

⁴Физический факультет Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

ASTROCLIMATE OF THE TERSKOL PEAK OBSERVATORY

Е.А. Kopylov¹, L.A. Bolbasova², A.Yu. Shikhovtsev³, S.A. Potanin^{1,4}, A.M. Sachkov¹

¹Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia,
kopylov@inasan.ru

²V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of SB RAS, Tomsk, Russia

³Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia

⁴Moscow State University Faculty of Physics, Moscow, Russia

Аннотация. Характеристики атмосферной турбулентности имеют важное значение для определения качества астрономического видения изображений и внедрения адаптивных систем. В работе исследуются вертикальные распределения оптической турбулентности в обсерватории Пик Терскол (43.27472° N 42.50083° E, 3127 м над у.м.) с использованием повторного реанализа Era-5, оптических сцинтилляционных измерений и данных ультразвуковой станции «Метео-2». Представлены результаты сезонных изменений параметров астроклимата для обсерватории Терскол. Рассчитанные вертикальные профили $C_n^2(z)$ сравниваются с распределением интенсивности турбулентности по вертикали, полученным из томографических измерений с помощью датчика Шака-Гартмана.

Ключевые слова: атмосферная турбулентность, Era-5, Метео-2, обсерватория Терскол

Abstract. Atmospheric turbulence characteristics are important for determining the quality of astronomical imaging and implementing adaptive systems. The paper studies the vertical distributions of optical turbulence at the Terskol Peak Observatory (43.27472° N 42.50083° E, 3127 m above sea level) using the Era-5 reanalysis, optical scintillation measurements and the Meteo-2 ultrasound station data. The results of seasonal changes in astroclimate parameters for the Terskol Observatory are presented. The calculated vertical profiles of $C_n^2(z)$ are compared with the vertical turbulence intensity distribution obtained from tomographic measurements using the Shack-Hartmann sensor.

Keywords: atmospheric turbulence, Era-5, Meteo-2, Terskol Observatory

Целью данного исследования является оценка качественных характеристик ночных изображений в обсерватории пика Терскол, где проводился оптический мониторинг турбулентности. Используя дистанционные оптические измерения, мы определили вертикальные распределения интенсивности оптической турбулентности над обсерваторией Пик Терскол. Вертикальные распределения интенсивности турбулентности были получены в условиях хорошего и посредственного качества изображения. Во-вторых, для оценки вертикальных профилей структурной постоянной турбулентных колебаний показателя преломления воздуха C_n^2 мы использовали градиентный метод, основы которого были созданы Татарским.

Для моделирования вертикальных профилей $C_n^2(z)$ мы использовали пятый набор данных повторного анализа Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (Era-5) [Hersbach et al., 2020]. Era-5 содержит данные наблюдений со всего мира с 1940 г. по

настоящее время. По сравнению с предыдущими базами данных Era-5 демонстрирует значительные улучшения как в пространственном разрешении, так и в точности характеристик атмосферы [Rao et al., 2024]. Повторный анализ содержит усвоенные метеорологические характеристики, включая компоненты температуры и скорости ветра при различных уровнях давления. Временное разрешение данных составляет 1 ч, пространственное по горизонтали — около 30 км. В частности, для ближайшего к обсерватории узла сетки использовались почасовые значения температуры воздуха и горизонтальных составляющих скорости ветра на различных поверхностях давления.

Для оценки вертикального распределения оптической турбулентности использовались данные оптических измерений, выполненных с использованием датчика Шака-Гартмана [Potanin et al., 2022]. Данные были получены в ночь с 18 на 19 марта 2023 г. (рис. 1).

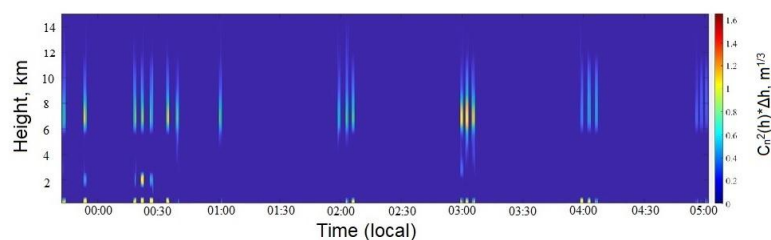


Рис. 1. Вертикальные распределения оптической турбулентности в ночное время на обсерватории пик Терскол 18–19 марта 2023 г.

Анализируя эти цифры, мы видим, что ярко выраженные турбулентные слои образуются на высотах 7–8 км и 2–2.5 км над землей. Турбулентный слой на этих высотах приводит к значительному снижению качества изображения. Например, параметр β , определяемый интегралом C_n^2 по высоте, увеличивается с 0.63 до 1.68". Эти изменения обусловлены, главным образом, возникновением интенсивных турбулентных колебаний показателя преломления воздуха в этих слоях.

Известно, что нижняя часть пограничного слоя атмосферы вносит основной вклад в формирование интегральной оптической турбулентности (вдоль линии видимости) и, как следствие, в разрешающую способность наземного телескопа. В пределах этого слоя вариации интенсивности оптической турбулентности наиболее плохо описаны, как по времени, так и по высоте. По крайней мере, точность оценки и прогнозирования оптической турбулентности на основе стандартных атмосферных моделей или небольшого объема данных оптических дистанционных измерений недостаточна для планирования времени наблюдения. Для получения правильной формы профилей оптической турбулентности в нижних слоях атмосферы при различных атмосферных условиях мы проанализировали данные измерений, выполненных с помощью ультразвукового анемометра «Метео-2», который был установлен на метеорологической мачте на площадке обсерватории Пик Терскол. Ниже для расчетов характеристик атмосферной турбулентности мы использовали данные квазинепрерывных измерений ультразвукового анемометра за длительный период (с 01.01 2023 г. по 31.12.2023 г.). Благодаря высокочастотным измерениям (10 Гц) поля ветра и температуры мы рассчитали ряд характеристик турбулентности, включая вертикальные профили C_n^2 (рис. 2).

Для сравнения мы также сравниваем вариации параметра Фрида r_0 в месте расположения пика Терскол. Для оценки r_0 использовались климатическая модель Хафнагеля–Валли (HV). Среднемесячные значения высотного профиля скорости ветра,

применяемые в модели HV, получены из базы данных реанализа ECMWF ERA5 (рис. 3).

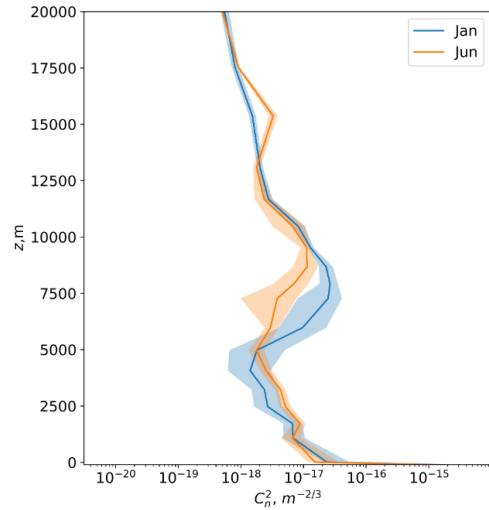


Рис. 2. Ночные вертикальные профили C_n^2 над обсерваторией Пик Терскол, 2023 г. Синяя линия соответствует январю, оранжевая линия — июню

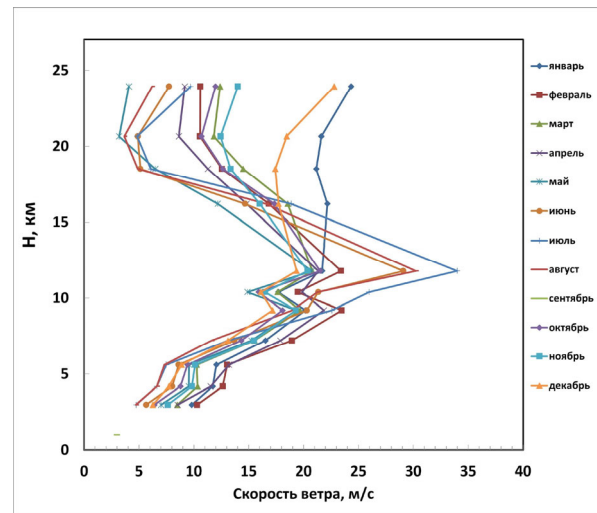


Рис. 3. Высотный профиль скорости ветра, усредненный за 3 года (2020–2022 гг.) для обсерватории Терскол для каждого месяца года по данным реанализа ERA5

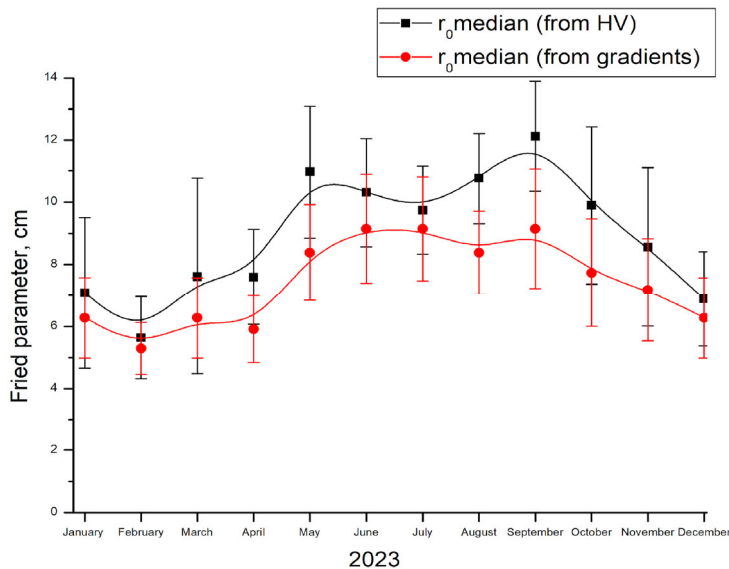


Рис. 4. Вариация радиуса Фрида r_0 за 2023 г. для обсерватории Пик Терскол

На рис. 4 показаны изменения параметра Фрида r_0 в обсерватории пика Терскол. Как вы можете видеть из рисунка, участок пика Терскол имеет высокое качество изображения, близкое к лучшим местам в мире. В частности, летом β составляет около 1.0–1.2 угловой секунды, в пересчете на r_0 эти значения соответствуют 8.3–10.0 см.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Hersbach H., Bell B. et al. The ERA5 global reanalysis // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2020. V. 146. P. 730, 384. <https://doi.org/10.1002/qj.38031>.

Potarin S.A. et al. A Facility for the Study of Atmospheric Parameters Based on the Shack–Hartmann Sensor // Astrophysical Bulletin. 2022. V. 77. P. 214–221. <https://doi.org/10.1134/S1990341322020067>.

Rao P., Wang F., Yuah X. et al. Evaluation and comparison of 11 sets of gridded precipitation products over the Qinghai-Tibet Plateau // Atmospheric Res. 2024. V. 302. P 10731. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2024.107315>.

СТРУКТУРИРОВАННАЯ ФИЛАМЕНТАЦИЯ МОЩНЫХ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ В ВОЗДУХЕ. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Ю.Э. Гейнц, О.В. Минина

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Россия, mov@iao.ru

STRUCTURED FILAMENTATION OF HIGH-POWER FEMTOSECOND LASER PULSES IN AIR. NUMERICAL SIMULATION

Yu.E. Geints, O.V. Minina

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Tomsk, Russia, mov@iao.ru

Аннотация. Представлены результаты численного моделирования распространения структурированного мощного фемтосекундного лазерного излучения в режиме самофокусировки и филаментации в воздухе. Элементом, формирующим мульти-модальную структуру излучения, являлась металлическая сетчатая маска. Показано, что координатой начала филаментации можно управлять в широких пределах за счет варьирования размера ячеек сетки и смещения перекрестий относительно центра лазерного пучка. При использовании сетчатых масок, в целом, сокращается общая длина области филаментации. Модуляция всего пучка (а не только его центральной части) приводит к увеличению длины области филаментации.

Ключевые слова: численное моделирование, фемтосекундное лазерное излучение, амплитудная модуляция, сетчатая маска, самофокусировка, лазерная филаментация, постфиламент.

Abstract. The results of numerical simulation of the propagation of structured high-power femtosecond laser radiation in the self-focusing and filamentation mode in air are presented. The multimodal radiation structure is formed by a metal mesh mask. It is shown that the filamentation start coordinate can be controlled over a wide range by varying the mesh cells size and the displacement of the crosshairs relative to the laser beam center. In general, the total length of the filamentation region decreases when mesh masks are used. Modulation of the entire beam (not just its central part) provides an increase in the filamentation length.

Keywords: numerical simulation, femtosecond laser radiation, amplitude modulation, mesh mask, self-focusing, laser filamentation, post-filament.

ВВЕДЕНИЕ

По мере внедрения фемтосекундных лазерных технологий в научные исследования возрастает число новых достижений и прорывных результатов в разных направлениях. Одно из таких направлений — атмосферная оптика [Багаев, Матвиенко, 2010]. К настоящему времени в ее рамках рассматриваются фундаментальные и прикладные аспекты распространения мощных фемтосекундных лазерных импульсов (МФЛИ) на протяженных горизонтальных и вертикальных трассах, а также способы управления характеристиками излучения в этих случаях.

Перечисленные аспекты влияют на эффективность использования МФЛИ для решения прикладных задач, например, для генерации терагерцового излучения, зондирования атмосферы и направленной передачи энергии [Багаев, Матвиенко, 2010]. Один из перспективных методов решения этих задач — это использование структурированного МФЛИ [Shroeder, Chin, 2004; Kandidov et al., 2005; Апексимов и др., 2021]. Проведенные ранее исследования [Geints et al., 2022; Гейнц, Минина, 2024] показали, что этот метод минимизирует нежелательные эффекты и обеспечивает более контролируемую филаментацию.

1. АМПЛИТУДНАЯ МОДУЛЯЦИЯ МОЩНОГО ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СЕТЧАТОЙ МАСКОЙ. РЕДУЦИРОВАННАЯ ВЕРСИЯ НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ШРЕДИНГЕРА

В текущей работе модуляционным элементом являлись амплитудные сетчатые маски, которые разделяют изначально унимодальный (в рассматриваемом

случае гауссовский) лазерный пучок на пространственно обособленные субпучки. Это приводит к увеличению дифракционного взаимодействия между различными частями пучка, а степень этого взаимодействия контролируется путем изменения числа n и размеров d ячеек сетчатой маски. Изменение параметра n по одной из координатных осей обеспечивает смещение перекрестия маски относительно центра лазерного пучка. Так перекрестие может перекрывать центр, разбивая исходный пучок на 4 менее мощных субпучка, или выделять квазисупергауссов пучок. Далее для обозначения этих случаев будут использоваться символы "+" и "#" соответственно.

Численные исследования распространения мощных фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе проводились на основе (3D+1) нелинейного уравнения Шредингера (НУШ) [Self-focusing: Past and Present, 2009]. Для сокращения требуемых вычислительных ресурсов и времени проведения расчетов использовалась его редуцированная 3D версии [Berge et al., 2004], получаемая после интегрирования исходного уравнения по времени. Достоинства этого подхода и точность получаемых в его рамках результатов рассматривались в [Geints, Zemlyanov, 2021]. Детали математической модели и задания сеток представлены в [Гейнц, Минина, 2024].

2. УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СТРУКТУРИРОВАННОГО МОЩНОГО ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ВОЗДУХЕ

Численное моделирование филаментации МФЛИ выполнялось для коллимированного

излучения с несущей длиной волны $\lambda = 744$ нм. Моделью среды распространения была смесь кислорода и азота (20% + 80%). Начальный радиус пучка по уровню e^{-1} составлял $R_0 = 1$ и 4 мм. Расчеты при $R_0 = 1$ мм выполнялись для детального исследования формирования постфиламентов (см. раздел 2.2). Для рассмотрения различных сценариев филаментации моделирование проводилось для значительной относительной пиковой мощности в импульсе $\eta = P_0/P_{cr}$, варьируемых от 5 до 15. Здесь P_0 – пиковая мощность в импульсе, $P_{cr} = 3.2$ ГВт [Boyd et al., 2009] — критическая мощность самофокусировки.

2.1 КООРДИНАТА НАЧАЛА ФИЛАМЕНТАЦИИ

Первая из рассматриваемых характеристик — координата нелинейного фокуса z_{fil} при самофокусировке, которая определяет начало филаментации. Зависимость этой величины от размера ячеек сетки представлена на рис. 1.

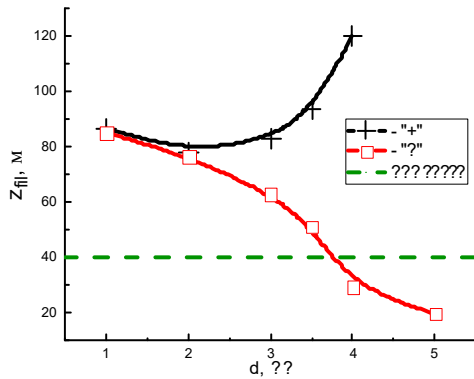


Рис. 1. Зависимость координата начала филаментации z_{fil} от размера ячейки d сетки «+»- и «#»-типов

Из рис. 1 видно, что при распространении МФЛИ через сетки «+»-типа характерна последовательная конструктивная интерференция 4 субпучков небольшой мощности. Для сеток «#»-типа преобладает дифракция излучения на резких границах апертуры для одного мощного субпучка. Это изменяет характер филаментации МФЛИ тем сильнее, чем больше параметр d . Для мелкоячеистых сеток отдельных субапертур становится слишком много, чтобы их распределение по энергии было чувствительным к конкретному положению перекрестия сетки, поэтому черная и красная кривые на рис. 1 для $d/R_0 \leq 0.5$ практически совпадают. Крупноячеистая сетка ($d/R_0 > 1$) в свою очередь сокращает z_{fil} .

2.2 ДЛИНА ОБЛАСТИ ФИЛАМЕНТАЦИИ И ПРОСТРАНСТВЕННОЕ ПОЛОЖЕНИЕ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ СВЕТОВЫХ КАНАЛОВ

Рассмотрим закономерности распространения МФЛИ через сетчатые маски, связанные с длиной области филаментации L_{fil} , в рамках анализа трассовых зависимостей пиковой интенсивности. При малой мощности излучения (рис. 2а) величина L_{fil}

уменьшается при использовании сетчатой маски. Это происходит из-за сокращения числа последовательных рефокусировок вдоль трассы, которым соответствуют максимумы интенсивности.

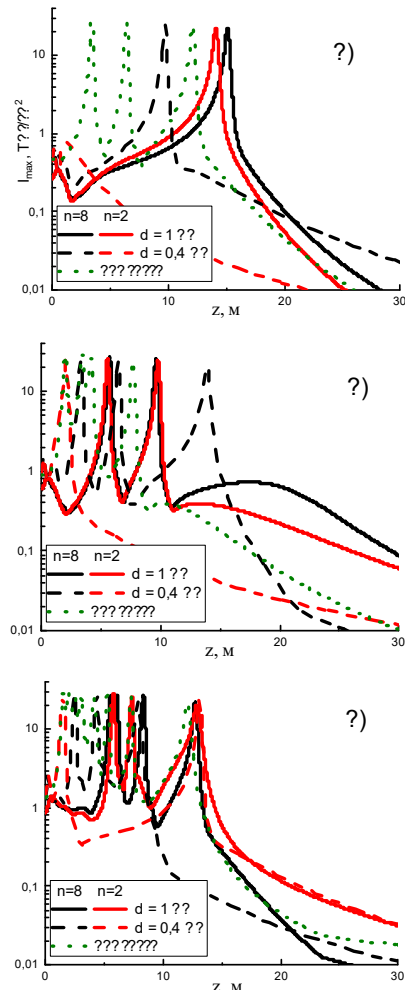


Рис. 2. Зависимость пиковой интенсивности I_{max} от дистанции распространения z для импульсов с $\eta = 5$ (а), 10 (б), 15 (в) для сеток «+»-типа с размером ячейки $d = 1$ и 0.4 мм, а также без сетки

Управление филаментацией также реализуется при изменении площади перекрытия лазерного пучка сетчатой маской. Так увеличение z_{fil} происходит для масок с большим размером ячеек, перекрывающих весь пучок (сплошные кривые на рис. 2). Когда общий размер маски оказывается меньше размера пучка (штриховые кривые на рис. 2), реализуется частичная модуляция излучения. В этом случае для маломощного излучения ($\eta = 5$) филаментация может не реализоваться (черная штриховая кривая на рис. 2а).

Уменьшение влияния стохастического характера множественной филаментации иллюстрирует рис.3, на котором построены поперечные сечения лазерного пучка, полученные без сетки (рис. 3а, г) и для сеток при $d = 0,2$ (рис. 3б, д) и 1 (рис. 3в, е) на расстояниях $z = 5$ и 20 м, когда формировались филаменты (рис. 3а–в) и постфиламенты (рис. 3г–е), соответственно.

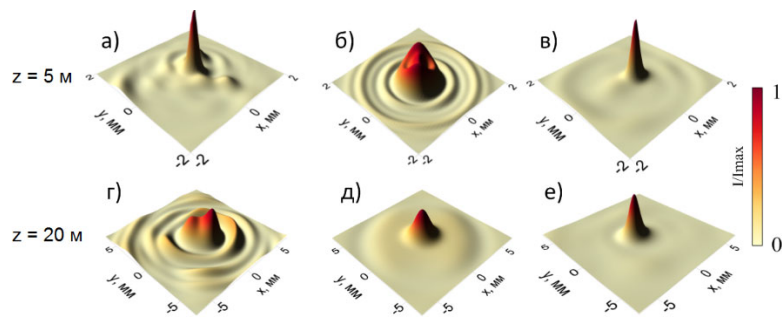


Рис. 3. Поперечные сечения лазерного пучка, полученные без использования сетки (а, г) и для сеток «□»-типа с размером ячейки $d = 0.2$ (б, д) и 1 (в, е) мм при $\eta = 15$

Свидетельством этого уменьшения является наличие симметричной дифракционной кольцевой структуры на рис. 3б, в и рис. 3д, е вокруг центрального максимума.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрено распространение МФЛИ в воздухе при использовании амплитудных сетчатых масок. Такой тип наложенной модуляции амплитуды волны обеспечивает контроль за филаментами и постфиламентами за счет разделения исходного лазерного пучка на отдельные субпучки с меньшей энергии. Это приводит к сокращению длины области филаментации для структурированного излучения в общем случае. Наибольшая длина области филаментации обеспечивается при полной модуляции лазерного пучка. Минимизировать стохастический характер рассматриваемых процессов удастся при использовании мелкоячеистых сеток.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (№ 24-12-00056).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Апексимов Д.В., Бабушкин П.А., Гейнц Ю.Э. и др. Закономерности распространения амплитудно-

модулированного мощного фемтосекундного лазерного излучения в воздухе // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34, № 11. С. 837–841.

Гейнц Ю.Э., Минина О.В. Структурированная филаментация мощного фемтосекундного лазерного излучения при модуляции амплитудными сетчатыми масками // Оптика атмосферы и океана. 2024. Т. 37, № 1. С. 32–40.

Фемтосекундная атмосферная оптика / ред. Багаев С.Н., Матвиенко Г.Г. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010. 238 с.

Berge L., Skupin S., Lederer F. et al. Multiple filamentation of terawatt laser pulses in air // Phys. Rev. Lett. 2004. V. 92. P. 225002.

Geints Yu.E., Minina O.V., Geints I.Yu. et al. Nonlinear propagation and filamentation on 100 meter air path of femtosecond beam partitioned by wire mesh // Sensors. 2022. V. 22, N 17. P. 1–13.

Geints Y.E., Zemlyanov A.A. Dynamics of femtosecond synthesized coronary profile laser beam filamentation in air // J. Optics. 2021. V. 23, N 10. P. 105502.

Kandidov V.P., Aközbek N., Scalora M. et al. Towards a control of multiple filamentation by spatial regularization of a high-power femtosecond laser pulse // App. Phys. B. 2005. V. 80. P. 267–275.

Self-focusing: Past and Present. Fundamentals and Prospects / (eds.) Boyd R.W., Lukishova S.G., Shen Y.R. Berlin: Springer, 2009. 605 p.

Shroeder H., Chin S.L. Visualization of the evolution of multiple filaments in methanol // Optics Communications. 2004. V. 234. P. 399–406.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗНАЧЕНИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ МОЛЕКУЛ ОКСИДА ФОСФОРА

С.М. Бобровников^{1,2}, Е.В. Горлов^{1,2}, В.И. Жарков¹, С.Н. Мурашко^{1,2}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Россия, msn_17@mail.ru

²Томский государственный университет, Томск, Россия

DETERMINING THE ENERGY AND TIME PARAMETERS OF LASER RADIATION FOR EFFECTIVE EXCITATION OF PHOSPHORUS OXIDE MOLECULES

S.M. Bobrovnikov^{1,2}, E.V. Gorlov^{1,2}, V.I. Zharkov¹, S.N. Murashko^{1,2}

¹V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia, msn_17@mail.ru

²Tomsk State University, Tomsk, Russia

Аннотация. Представлены результаты математического моделирования процесса лазерного возбуждения молекулы оксида фосфора (PO) в электронные состояния $A^2\Sigma^+$ и $B^2\Sigma^+$ с последующей релаксацией с учетом взаимодействия PO с молекулами газовых составляющих реальной атмосферы. Получены зависимости интенсивности γ - и β -систем полос флуоресценции оксида фосфора от энергетических и временных параметров возбуждающего лазерного излучения. Показано, что с увеличением плотности энергии возбуждающего излучения происходит увеличение оптимальной длительности импульсов.

Ключевые слова: оксид фосфора, лазерно-индуцированная флуоресценция, длительность импульса, плотность энергии.

Abstract. This paper presents the results of mathematical modeling of the process of laser excitation of a phosphorus oxide (PO) molecule into the electronic states $A^2\Sigma^+$ and $B^2\Sigma^+$ with subsequent relaxation, taking account of the PO interaction with molecules of gas components of the real atmosphere. Dependences of intensity of the γ - and β -systems of phosphorus oxide fluorescence bands on the energy and time parameters of exciting laser radiation are obtained. The optimal pulse duration is shown to increase with increasing energy density of the exciting radiation.

Keywords: phosphorus oxide, laser-induced fluorescence, pulse duration, energy density.

На (рис. 1) схематически представлен процесс лазерного возбуждения PO в состояние $B^2\Sigma^+$ на условной диаграмме энергетических уровней оксида фосфора. Излучательные переходы – сплошные линии. Имеют место безызлучательные релаксация возбужденных состояний и колебательная релаксация – волнистые линии. Пунктирные стрелки – бимолекулярные реакции молекул PO с атмосферным кислородом.

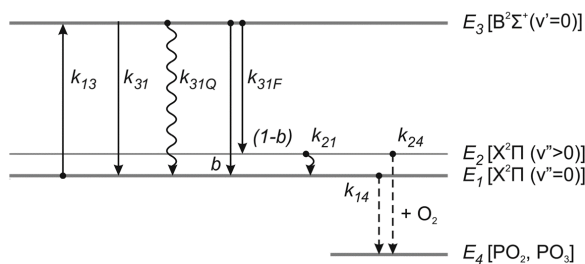


Рис. 1. Четырехуровневая схема лазерного возбуждения молекулы PO в состояние $B^2\Sigma^+$

Рассматриваемый процесс можно представить в виде математической модели, описываемой следующей системой кинетических уравнений:

$$\frac{\partial N_1(t, r, z)}{\partial t} = -(k_{13}(t, r, z) + k_{14})N_1(t, r, z) + k_{21}N_2(t, r, z) + (k_{31Q} + bk_{31F} + k_{31})N_3(t, r, z), \#(1)$$

$$\frac{\partial N_2(t, r, z)}{\partial t} = -(k_{24} + k_{21})N_2(t, r, z) + (1 - b)k_{31F}N_3(t, r, z), \#(2)$$

$$\frac{\partial N_3(t, r, z)}{\partial t} = k_{13}(t, r, z)N_1(t, r, z) - (k_{31Q} + bk_{31F} + k_{31}(t, r, z) + (1 - b)k_{31F})N_3(t, r, z), \#(3)$$

$$\frac{\partial N_4(t, r, z)}{\partial t} = k_{14}N_1(t, r, z) + k_{24}N_2(t, r, z), \#(4)$$

$$N_1 + N_2 + N_3 + N_4 = N_0. \#(5)$$

где t — время, z — координата вдоль направления распространения лазерного излучения, $r = \{x, y\}$ — координата в плоскости поперечного сечения пучка; N_i — населенность уровня E_i ; k — скорости рассматриваемых переходов и реакций; a — весовой коэффициент. Первый индекс при k обозначает начальное энергетическое состояние, второй — конечное. Скорости k с добавочными индексами F и Q соответствуют обратным величинам радиационного времени жизни электронного состояния и его времени жизни в процессе столкновения с другими молекулами. Значения коэффициентов, входящих в систему уравнений, приведены в (табл. 1).

Таблица 1.

Значения коэффициентов, входящих в кинетическую модель процесса ЛИФ РО

Параметр	Значение	Ссылка
$k_{13}(t)$	$\sigma_{13}F(t)$	
σ_{13}	$2 \cdot 10^{-17} \text{ см}^2$	[Бобровников и др., 2022]
$k_{31}(t)$	$k_{13}(t)/0,5$	
k_{31F}	$(3,77 \pm 0,06) \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$	[Sausa et al., 1986]
k_{31Q}	$(1,00 \pm 0,09) \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$	[Sausa et al., 1986]
k_{14}, k_{24}	$(6,77 \pm 2,82) \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$	[Wong et al., 1985]
k_{21}	$(8,46 \pm 1,13) \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$	[Shu et al., 2000]
b	0,98	[Long et al., 1985; Smyth, Mallard, 1982]

Здесь σ_{13} — сечение поглощения; $F(t)$ — плотность потока фотонов;

В расчетах длина волны возбуждающего излучения соответствует максимуму поглощения молекулы РО в области расположения канта ветви ($Q_{11} + P_{21}$) (324,61 нм) [Бобровников и др., 2022].

Решение системы уравнений было выполнено численно с помощью пакета прикладных программ *Matlab*. Аналогичная работа проделана для перехода $A^2\Sigma^+(v'=0) - X^2\Pi(v''=0)$. Результаты вычислений лазерного возбуждения оксида фосфора в состоянии $B^2\Sigma^+$ и $A^2\Sigma^+$ представлен ниже (рис. 2, рис. 3).

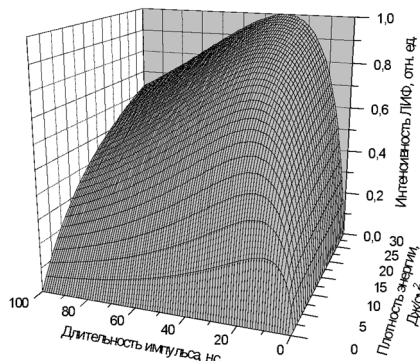


Рис. 2. Зависимость интенсивности флуоресценции молекул РО от длительности импульса и плотности энергии лазерного излучения, переход $B^2\Sigma^+(v'=0) - X^2\Pi(v''=0)$

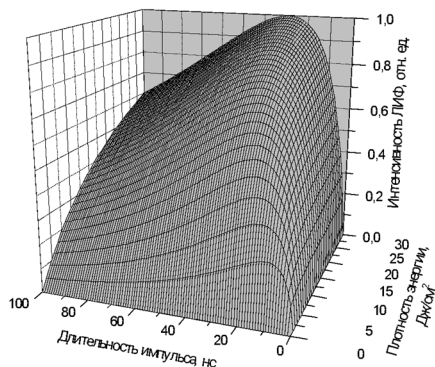


Рис. 3. Зависимость интенсивности флуоресценции молекул РО от длительности импульса и плотности энергии лазерного излучения, переход $A^2\Sigma^+(v'=0) - X^2\Pi(v''=0)$

Можно заметить, что зависимость сигнала флуоресценции от плотности энергии монотонно растет, стремясь к насыщению. Зависимость от длительности импульса имеет локальный максимум, ввиду взаимодействия РО с кислородом. Из результатов видно, что свойства переходов похожи, однако при сравнении не нормированных значений ожидаемых сигналов ЛИФ интенсивность флуоресценции при возбуждении перехода $A^2\Sigma^+(v'=0) - X^2\Pi(v''=0)$ оказывается более, чем на два порядка выше, нежели при возбуждении $B^2\Sigma^+(v'=0) - X^2\Pi(v''=0)$. Ввиду полученных результатов переход $A^2\Sigma^+(v'=0) - X^2\Pi(v''=0)$ был выбран в качестве основного рабочего при проведении экспериментов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 20-79-10297, <https://rscf.ru/project/20-79-10297/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бобровников С.М., Горлов Е.В., Жарков В.И. Эффективность лазерного возбуждения РО-фотофрагментов органофосфатов // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 35, № 3. С. 175–185.

Бобровников С.М., Горлов Е.В., Жарков В.И. и др. Оценка эффективности лазерного возбуждения перехода $B^2\Sigma^+(v'=0) - X^2\Pi(v''=0)$ оксида фосфора // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35, №5. С. 361–368.

Long S.R., Christesen S.D., Force A.P. Rate constant for the reaction of PO radical with oxygen // Chem. Phys. Lett. 1985. V. 84, N 10. P. 5965–5966.

Sankaranarayanan S. γ -Centroids and Franck-Condon factors for the bands of $A^2\Sigma-X^2\Pi$ system of PO molecule // Indian J. Phys. 1966. V. 40. P. 678–680.

Sausa T., Andrzej W., Long S. State distributions, quenching, and reaction of the PO radical generated in excimer laser photofragmentation of dimethyl methylphosphonate // J. Phys. Chemistry. 1986. V. 90, N 17. P. 3994–3998.

Shu J., Bar I., Rosenwaks S. NO and PO photofragments as trace analyte indicators of nitrocompounds and organophosphonates // App. Phys. B. 2000. V. 71, N 5. P. 665–672.

Smyth K.C., Mallard W.G. Two-photon ionization processes of PO in a C2H2/air flame // J. Chem. Phys. 1982. V. 77, N 4. P. 1779–1787.

Wong K.N., Anderson W.R., Kotlar A.J. et al. Lifetimes and quenching of $B^2\Sigma^+$ PO by atmospheric gases // J. Chem. Phys. 1985. V. 84, N 1. P. 81–90.

Yin Y., Shi D., Sun J. et al. Transition Probabilities of Emissions and Rotationless Radiative Lifetimes of Vibrational Levels for the PO Radical // Astrophys. J. Suppl. Ser. 2018. V. 236, N 34.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ ДЕТРЕНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ЭФФЕКТОВ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК В ВАРИАЦИЯХ АМПЛИТУДЫ СДВ РАДИОСИГНАЛОВ

Х.Х.З. Нгуен, А.С. Полегаев

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия,
hd04011996@gmail.com

APPLYING DETRENDING METHODS FOR DETECTING THE SOLAR FLARE EFFECTS IN AMPLITUDE VARIATIONS OF VLF SIGNALS

K.H.D. Nguyen, A.S. Poletaev

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia, hd04011996@gmail.com

Аннотация. Исследование направлено на анализ влияния солнечных вспышек на распространение СДВ сигналов в волноводе Земля — ионосфера. В работе предложены методы детрендинга для выявления и анализа проявления эффектов солнечных вспышек в вариациях амплитуды СДВ сигналов. В ходе исследования было проведено сравнение трех методов детрендинга: фильтрации низких частот (ФНЧ), нелинейной регрессии и использования нейросети автоэнкодера. Каждый метод был применен для анализа временных рядов амплитуды СДВ сигнала 22.2 кГц с целью выявления аномальных изменений. Полученные результаты демонстрируют эффективность работы нейросети автоэнкодера в сравнении с традиционными методами детрендинга, что подчеркивает потенциал использования современных методов машинного обучения в анализе больших массивов данных по распространению СДВ радиоволн в условиях возмущений ионосферы из-за воздействия солнечных вспышек.

Ключевые слова: сверхдлинные волны, автоэнкодер, солнечные вспышки, аномалия, нейронная сеть, ионосфера, нелинейная регрессия

Abstract. This study focuses on analyzing the impact of solar flares on the propagation of VLF signals in the Earth-ionosphere waveguide. The paper proposes detrending methods for detecting and analyzing the effects of solar flares on variations in VLF signal amplitude. The study compares three detrending methods: low-pass filtering (LPF), nonlinear regression, and the use of a neural network autoencoder. Each method was applied to analyze time series of VLF signal amplitude at 22.2 kHz to detect anomalous changes. The obtained results demonstrate effectiveness of the neural network autoencoder compared to traditional detrending methods. This result shows high potential of modern machine learning methods in analyzing large datasets on VLF signal propagation under the influence of solar flare disturbances.

Keywords: Very Low Frequency (VLF) signal, autoencoder, solar flares, anomaly, neural network, ionosphere, nonlinear regression.

ВВЕДЕНИЕ

Сверхдлинноволновые (СДВ) сигналы являются важным источником информации о солнечной активности и воздействии излучения на нижнюю ионосферу. Измерения амплитуды и фазы СДВ сигналов предоставляют ценные данные для исследования солнечно-земных взаимодействий и их влияния на системы радиосвязи и навигации. Солнечные вспышки [Сыроватский и др., 2018], как один из основных проявлений солнечной активности, могут приводить к значительным возмущениям в ионосфере, вызывая изменения условий распространения радиоволн. Обнаружение этих эффектов в СДВ сигналах является важным шагом для понимания и прогнозирования потенциальных воздействий солнечных вспышек на распространение СДВ сигналов. Одной из сопутствующих задач является исследование эффективности различных методов устранения (детрендинга) дневного суточного хода амплитуды СДВ сигналов для обнаружения на его фоне эффектов солнечных вспышек. Необходимо выполнить сравнение эффективности классических методов, таких как нелинейная регрессия и низкочастотная фильтрация, и современных подходов с использованием нейросетевых алгоритмов, а именно сети автоэнкодера. Основным предъявляемым к применяемым методам ограничением является использование в расчетах выборки для поиска аномалий длительностью менее суток с целью исключения влияния на результат соседних дней, как это может происходить в методе

построения среднемесячного хода амплитуды [Wayne, Thomson, 2000].

АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ АНОМАЛЬНЫХ СИГНАЛОВ

Исходные данные представляют собой суточный ход амплитуды сверхдлинноволнового сигнала, который характеризуется изменениями интенсивности в течение суток [Yadrennikova et al., 2018]. Амплитуда сигнала может быть подвержена значительным отклонениям в результате солнечных вспышек. На рис. 1 приведен пример вариаций амплитуды сигнала 22.2 кГц (JL, Япония). Первый день является примером хода в невозмущенных условиях, второй и третий содержат всплески (отмечены стрелками) вследствие воздействия вспышек на ионосферу. Для расчетов только используются дневные интервалы.



Рис. 1. Фрагмент СДВ сигнала JL, записанный с 1–3 апреля 2017 г., трасса Япония – Иркутск

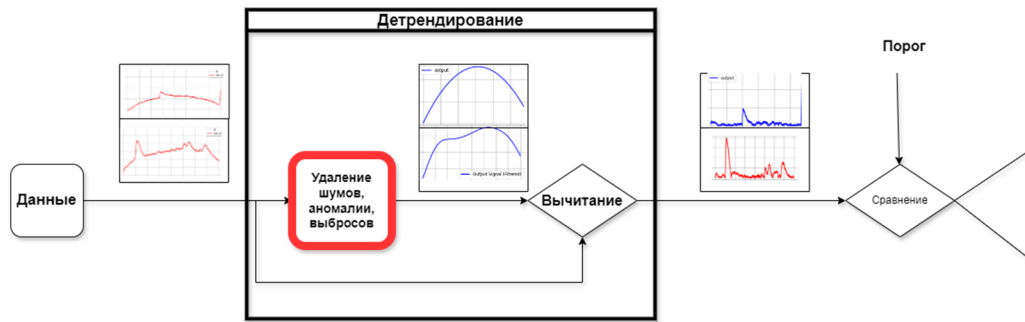


Рис. 2. Алгоритм обнаружения аномальных сигналов

Алгоритм обнаружения аномальных сигналов (рис. 2) заключается в подборе функции, которая наилучшим образом аппроксимирует общие трендовые компоненты в сигнале для последующего вычитания этой функции из исходного сигнала. В результате остаются только аномальные отклонения. Аномалии обнаруживаются путем сравнения с определенным порогом, что позволяет обнаружить отклонения от нормы в сигнале. Этот процесс позволяет выявить и, что самое главное, выделить аномалии, которые применяются в дальнейшем для анализа и интерпретации данных, а также моделирования ионосферы.

Существует ряд классических методов, широко применяемых для детрендирования сигналов. Рассмотрим основные из них, выделим преимущества и их ограничения.

Нелинейная регрессия [Пчелинцев и др., 2014] — это метод поиска модели нелинейной взаимосвязи между зависимой переменной и набором независимых переменных. В отличие от традиционной линейной регрессии, которая ограничена оценкой линейных моделей, нелинейная регрессия позволяет оценить модели с произвольными взаимосвязями между независимыми и зависимыми переменными. Однако исследуемые вариации амплитуды сигналов представлены в виде полупериода синусоидальной функции, что эквивалентно простой полиномиальной модели вида $y = a + b \cdot x^2$. Если мы определим новую переменную $w = x^2$, то получим простую линейную модель вида $y = a + b \cdot w$, которую можно оценить с использованием традиционных методов, таких как процедура линейной регрессии.

Фильтр нижних частот (ФНЧ) представляет собой цифровое устройство, целью которого является подавление составляющих сигнала, частота которых превышает определенное значение, известное как частота среза. В рамках нашей работы ФНЧ применяется с целью извлечения основной компоненты тренда СДВ сигнала, содержащей в себе низкочастотные составляющие.

Автоэнкодер [Трыков и др., 2020; Qu C. et al., 2022] — тип искусственной нейронной сети, которая переводит входные данные в сжатое представление, а затем восстанавливает исходные данные на основе этого представления. Цель автоэнкодера — минимизировать разницу (или ошибку) между исходным входным и восстановленным выходным данными, тем самым изучая наиболее важные особенности данных. Автоэнкодер состоит из трёх частей (рис. 3): кодировщик, скрытый слой, декодер. Кодировщик сжимает входное

изображение в представление скрытого пространства и кодирует его в более низком измерении в виде сжатого представления. Скрытый слой хранит сокращённое представление входных данных, поступающих в декодер. Декодер отвечает за повторную сборку передаваемого кода до его исходных размеров.

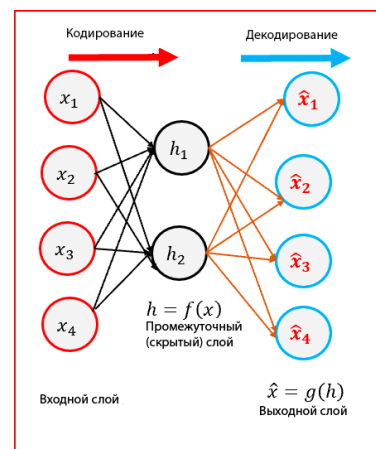


Рис. 3. Модель автоэнкодера

ЭКСПЕРИМЕНТЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В данном исследовании были использованы данные за первые 4 месяца 2017 г. для СДВ сигнала 22.2 кГц, распространяющегося по трассе Япония – Иркутск. Перед применением методов детрендирования к данным была проведена предварительная обработка временного ряда, включающая удаление шума, выбросов и заполнение пропусков.

Методы детрендирования были реализованы с использованием стандартных инструментов нейронных сетей и обработки сигналов, таких как библиотеки sklearn, keras и scipy. Для оценки качества моделей были использованы данные, содержащие информацию о 20 днях наблюдений, включая как обычные дни, так и дни с солнечными вспышками.

Все образцы данных прошли через цифровой фильтр нижних частот (ФНЧ), модель нелинейной регрессии и автоэнкодер, после чего были вычислены среднеквадратичные ошибки (СКО) реконструкции и времени реконструкции для каждого сигнала. Сигналы с СКО реконструкции, превышающим пороговое значение, считаются аномальными. Пороговое значение определяется как среднее значение ошибки реконструкции по всему набору данных. Для определения эффективности методов детрендирования проводилась оценка ошибки реконструкции, времени реконструкции по всему набору данных.

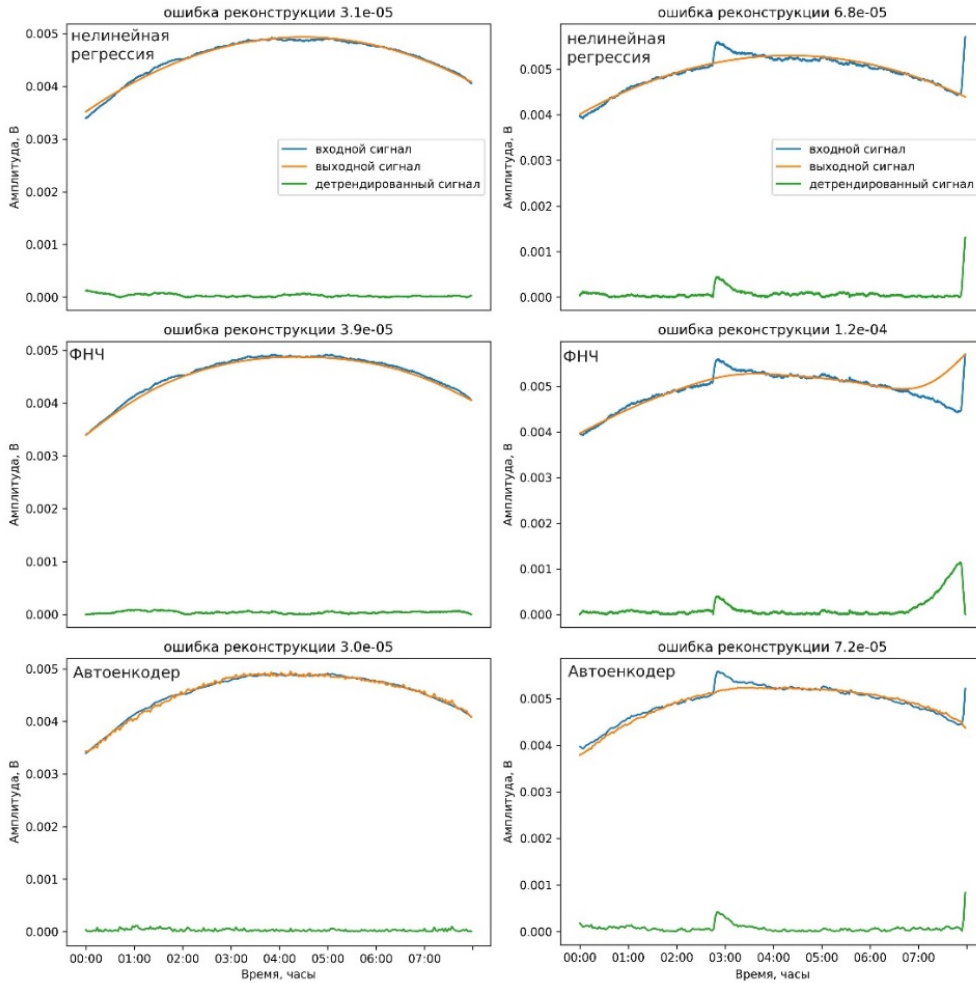


Рис. 4. Детрендированные сигналы для трёх методов

На рис. 4 представлены типичные сигналы до и после детрендирования для трех методов: нелинейная регрессия (первый ряд), ФНЧ (второй ряд) и автоэнкодер (третий ряд). Синим цветом обозначен входной сигнал, оранжевым — выходной сигнал, зеленым — детрендированный сигнал. Левый столбец иллюстрирует сигналы в спокойный день (0–8 ч 1 апреля 2017 г.,

рис. 1), правый столбец — сигналы в день с аномальной активностью (0–8 ч 2 апреля 2017 г., рис. 1). Применение ФНЧ и автоэнкодера дает принципиально схожие результаты. Однако применение ФНЧ не всегда позволяет корректно выделить временные интервалы расположения всплесков, что может приводить к пропуску всплесков или ложному срабатыванию.

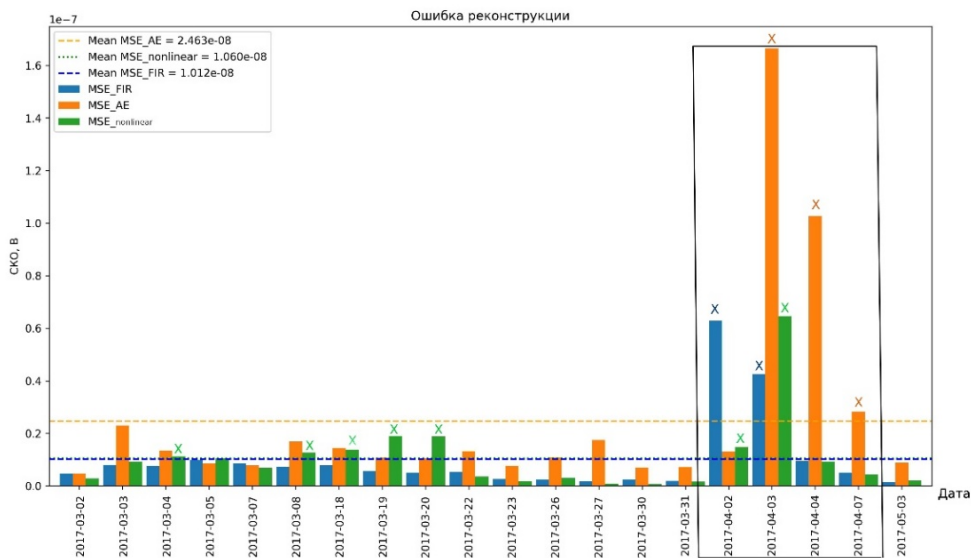


Рис. 5. SKO ошибки реконструкций для 3 методов: зелёный — нелинейная регрессия, синий — ФНЧ, оранжевый — автоэнкодер

На рис. 5 представлена гистограмма значений среднеквадратичной ошибки реконструкции для каждого сигнала. Горизонтальные линии соответствуют пороговым значениям каждого метода. Столбцы, находящиеся внутри рамки, соответствуют аномальным сигналам, а остальные соответствуют нормальным сигналам. Столбцы с крестиком соответствуют обнаруженным аномальным сигналам.

Из рисунка следует, что для ФНЧ и метода нелинейной регрессии были обнаружены 2 из 4 аномальных сигналов (4 дня в черной рамке). Кроме того, для метода нелинейной регрессии неправильно были обнаружены 5 сигналов (5 нормальных сигналов были неправильно классифицированы как аномальные). А для метода автоэнкодера были обнаружены 3 из 4 аномальных сигналов.

В табл. 1 приведены дополнительные числовые показатели эффективности для применяемых методов детрендирования. Время реконструкции при применении ФНЧ и линейной регрессии намного больше, чем при применении нейросети автоэнкодера.

Таблица 1.

Результаты для разных применяемых методов детрендирования

Метод	Порог	Среднее время реконструкции, мс
ФНЧ	2.463E-08	7.200E+03
Линейная регрессия	1.060E-08	4.000E+00
Автоэнкодер	1.012E-08	4.400E-01

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение ФНЧ и автоэнкодера для детрендирования приводит к схожим результатам, однако

ФНЧ не всегда точно отображает места возникновения вспышек, что может приводить к пропускам или ложным срабатываниям. Время реконструкции при использовании ФНЧ и линейной регрессии значительно больше по сравнению с применением нейросетевого автоэнкодера. Результаты исследования продемонстрировали, что нейросетевой автоэнкодер оказался наиболее эффективным среди рассмотренных методов детрендирования. Его использование позволило более точно выявлять аномальные изменения амплитуды СДВ сигнала при воздействии солнечных вспышек, что подчеркивает значительный потенциал современных методов машинного обучения в анализе сигналов радиосистем дальней связи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Сыроватский С.В., Веснин А.М., Едемский И.К. и др. Влияние солнечных вспышек на ионосферу земли в 24-м цикле солнечной активности // Современные проблемы физики и технологий. 2018. Т. 2. С. 294–296.

Пчелинцев И.А., Наев О.А., Гарькина И.А. Нелинейная регрессия в практических задачах // Вестник магистратуры. 2014. №4(31). Т. 1. С. 36–39.

Трыков Е.Л., Трыкова И. В., Коцюев К. И. Обнаружение аномалий в работе реакторного оборудования с помощью нейросетевых алгоритмов // Известия вузов «Ядерная энергетика». 2020. №3. С. 136–147.

McRae W.M., Thomson N.R. VLF phase and amplitude: daytime ionospheric parameters // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Phys. 2000. N. 62. P. 609–618.

Yadrennikova O.V., Poletaev A.S., Chensky A.G. Influence of Solar Flares on VLF Radio Waves Propagation over JJI – Irkutsk Path // APEIE-2018. Novosibirsk, October 2–6. 2018. V. 1. P. 137–140.

Qu C. et al. Predictive anomaly detection for marine diesel engine based on echo state network and autoencoder // Energy Reports. Elsevier Ltd. 2022. V. 8. P. 998–1003.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИОНОГРАММ НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ МЕТОДОМ ОБОБЩЕННОЙ СИЛЫ В ТРЕХМЕРНОЙ АНИЗОТРОПНОЙ ИОНОСФЕРЕ

И.А. Носиков¹, М.В.Клименко¹, А.М. Падохин^{2,3}, И.В. Крашенинников², П.Ф. Бессараб⁴

¹Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН, г. Калининград, Россия, ianosikov@wdizmiran.ru

²Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН, г. Москва, Россия

³Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия

⁴Университет Исландии, Рейкьявик, Исландия

OBLIQUE SOUNDING IONOGRAM SIMULATION BY THE GENERALIZED FORCE METHOD

I.A. Nosikov¹, M.V. Klimenko¹, A.M. Padokhin^{2,3}, I.V. Krasheninnikov², P.F. Bessarab⁴

¹West Department of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences, Kaliningrad, Russia

²Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS, Moscow, Russia

³Lomonosov Moscow State University, Skobel'syn Institute of Nuclear Physics, Moscow, Russia

⁴Reykjavik University, Reykjavik, Iceland

Аннотация. В работе представлена анизотропная реализация метода обобщенной силы, наилучшим образом подходящая для расчета радиолучей в неоднородной ионосфере с заданными положениями передатчика и приёмника. Расчет лучевой траектории основан на оптимизации расширенного функционала фазового пути радиолуча, учитывающего как пространственное положение луча, так и направление вектора импульса. В работе задача оптимизации, как и в изотропном случае, сводится к определению совокупности экстремумов целевой функции: как правило, минимумов для верхних лучей и седловых точек для нижних лучей. Метод обобщенной силы, реализованный в виде программной модели, апробирован и применен для решения задач наклонного зондирования, с использованием моделей NeQuick2 и IGRF13.

Ключевые слова: принцип Ферма, граничная задача, радиоволны.

Abstract. An implementation of the generalized force method, which is best suited for ray tracing in an anisotropic ionosphere with given positions of the transmitter and receiver, is presented. The ray search is based on the optimization of the extended functional of the phase path, taking into account both the spatial position of the ray and the direction of the wave front. Note that, regardless of the chosen mode configuration, the optimization problem, as in the isotropic case, comes down to determining the set of extrema of the objective function: as a rule, minima for the high rays and saddle points for the low rays. The generalized force method, implemented as a software model, has been tested and applied to solve oblique sounding problems in a realistic ionosphere using the NeQuick2 and IGRF13 models.

Keywords: Fermat's principle, boundary problem, radio waves

ВВЕДЕНИЕ

Развитие методов моделирования распространения радиоволн в атмосфере представляет собой одно из актуальных направлений геофизических исследований. Это направление является неотъемлемой частью работы систем спутниковой навигации, беспроводной связи, включая сотовые сети, спутниковую связь и радиовещание. Процесс моделирования включает использование математических и вычислительных методов для моделирования поведения радиоволн в различных геофизических средах.

Современные программные комплексы, основанные на приближении геометрической оптики, позволяют осуществлять прогнозы характеристик радиоканала [Krasheninnikov, Shubin., 2023; Pietrella et al., 2023]. При решении прикладных задач отдельный интерес представляет расчет лучей между двумя заданными положениями передатчика и приемника. Математически данная задача формулируется как краевая и традиционным подходом к ее решению является метод пристрелки [Падохин др., 2019]. Перспективным подходом для решения двухточечной задачи является прямой вариационный метод, позволяющий определять искомые

лучевые траектории в соответствии с принципом Ферма. В ионосферном распространении радиоволн весомый вклад в развитие данного подхода был внесен в работах [Воронков, Данилкин, 1985; Карпенко, Попов, 1986], а также [Coleman, 2011].

Дальнейшее развитие прямого вариационного метода было представлено в работе [Nosikov et al., 2020]. Применение подхода, получившего название метод «обобщенной силы», позволило создать эффективный инструмент, как для решения двухточечной траекторной задачи, так и для синтеза ионограмм наклонного зондирования. В работе учет магнито-ионных эффектов осуществляется рассмотрением функционала с расширенным набором переменных, включающего как положение луча, так и направление фронта волны [Nosikov et al., 2022]. Реализация усовершенствованного метода обобщенной силы представлена в виде программного комплекса расчета лучевых траекторий и ионограмм наклонного зондирования в трехмерной анизотропной ионосферной плазме. Программный комплекс представляет собой объединение метода расчета радиотрасс и современных эмпирических моделей среды распространения радиоволн.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Рассмотрим среднеширотную радиотрассу Кипр (34.96° с.ш., 34.08° в.д.) — ИЗМИРАН (55.38° с.ш., 37.32° в.д.). Результаты синтеза ионограмм на основе расчетов лучевых траекторий выполнено для 03.03.2023 г. и величины потока радиоизлучения F10.7 = 175 представлены на рис. 1. Построение ионограмм осуществлялось на основе расчетов значений группового пути и времени прихода вдоль лучевых траекторий O и X мод методом обобщенной силы.

Для построения ионограмм использовалась схема, состоящая из двух этапов. На первом этапе осуществлялось построение нижней части следа ионограммы — определялось все множество нижних лучей. Поиск нижних лучей осуществляется в диапазоне от наименьшей применимой частоты (НПЧ) до максимально применимой частоты (МПЧ) с заданным шагом 0.25 МГц. На втором этапе определялась верхняя часть следа ионограммы на основе расчета верхних лучей. Поиск верхних лучей осуществляется в обратном направлении от МПЧ до НПЧ.

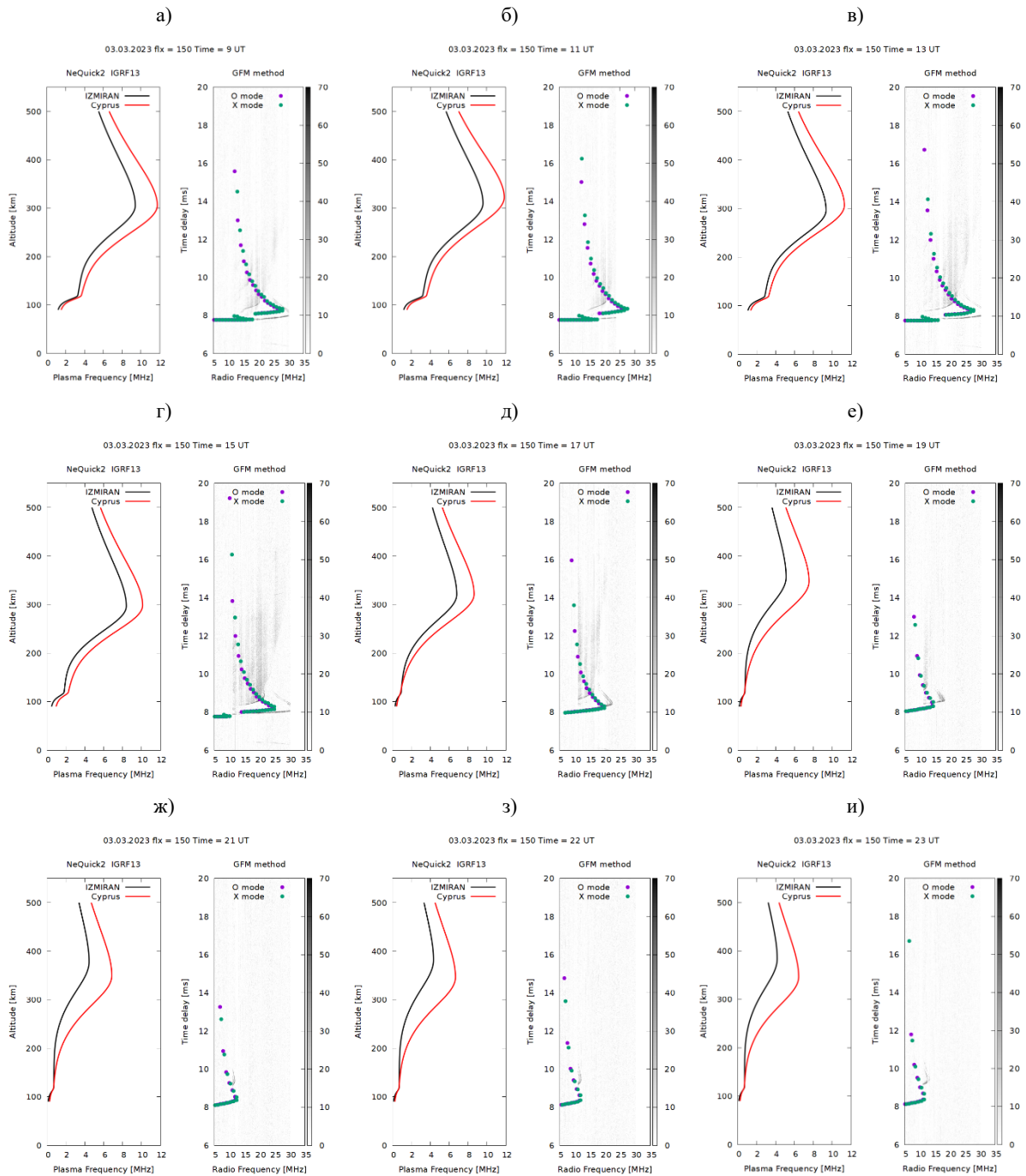


Рис. 1. Ионограммы наклонного зондирования на трассе Кипр – ИЗМИРАН для 3.03.2023 г. Данные наблюдений представлены черными точками. Результаты расчетов, полученные методом обобщенной силы с использованием моделей NeQuick2 и IGRF13, представлены цветными обозначениями

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты модельных расчетов показали, что метод обобщенной силы может использоваться для рутинных операций в задаче моделирования ионограмм наклонного зондирования. Представленный алгоритм показал свою работоспособность и достаточно высокую скорость вычислений на типовом персональном компьютере. При этом предложенный подход имеет большие возможности для дальнейшего развития. Например, использование алгоритмов с адаптивным шагом по частоте может снизить вычислительные нагрузки в простых линейных областях ионограмм и улучшить детализацию в области максимально применимой частоты. Скорость расчета как ионограмм в целом, так и лучевых траекторий в частности, также может быть значительно увеличена при использовании технологий параллельных вычислений на компьютерах с большой мощностью.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 23-77-10004).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Воронков В.А., Данилкин И.П. Простой практический метод расчета радиотрасс в ионосфере между

фиксированными точками вариационным способом // Калинингр. Гос.универс., деп. 29.07.85. 1985. Т. 5545–85 ДЕП.

Карпенко А.Л., Попов А.В. Метод установления для решения двухточечной траекторной задачи / В кн. Распространение радиоволн в ионосфере. 1986. С. 51.

Падохин А.М. и др. Моделирование лучевых траекторий КВ-радиоволн и ионограмм вертикального и наклонного зондирования в искусственно возмущенной ионосфере на основе данных радиотомографии // Вестник МГУ. 2019, №. 3. С. 57–64.

Coleman C.J. Point-to-point ionospheric ray tracing by a direct variational method // Radio Sci. 2011. V. 46, N 5. RS5016.

Krashennnikov I.V., Shubin V.N. Features of Forecasting the Operation of Ionospheric Radio Lines in Upper Rays Modes // Geomagn. Aeron. 2023. V. 63, N 4. P. 426–433.

Nosikov I.A. et al. Generalized force approach to point-to-point ionospheric ray tracing and systematic identification of high and low rays // IEEE Trans Antennas Propag. 2020. V. 68, N 1. P. 455–467.

Nosikov I.A. et al. An effective ray-tracing by homing-in method and direct approach in anisotropic inhomogeneous ionosphere // URSI AT-AP-RASC. IEEE, 2022. P. 1–4.

Pietrella M. et al. An Updating of the IONORT Tool to Perform a High-Frequency Ionospheric Ray Tracing // Remote Sens. 2023. V. 15, N 21. P. 5111.

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ОТРАЖЕННЫХ И РАССЕЯННЫХ ВОЛН ПО МЕТОДУ ГРАНИЧНОГО УПРАВЛЕНИЯ, ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

В.В. Носикова^{1,2}, Л.Н. Пестов¹

¹ Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия,
vnosikova@kantiana.ru

² Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН, Калининград, Россия

REFLECTED AND SCATTERED WAVE IMAGING BY THE BOUNDARY CONTROL METHOD, NUMERICAL EXPERIMENT

V.V. Nosikova^{1,2}, L.N. Pestov¹

¹ Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia,
vnosikova@kantiana.ru

² West Department of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of RAS,
Kaliningrad, Russia

Аннотация. В работе приводятся результаты численного эксперимента по визуализации распространения отраженных и рассеянных волн на основе метода граничного управления. Визуализация выполняется в полугеодезических координатах и основана на треугольной факторизации связывающего оператора – симметричной положительной матрицы C . В силу плохой обусловленности матрицы C для факторизации по методу Холецкого необходимо выполнять регуляризацию, которая приводит к сильному искажению фронта прямой волны, при этом фронты рассеянных и отраженных волн искажаются слабо. После удаления прямой волны с помощью F-K-фильтрации удается получить визуализацию отраженных и рассеянных волн для симулированных данных для двух акустических моделей.

Ключевые слова: метод граничного управления, визуализация волн, численный эксперимент.

Abstract. The paper presents the results of a numerical experiment to visualize the propagation of reflected and scattered waves based on the boundary control method. Visualization is performed in semi-geodesic coordinates and is based on the triangular factorization of the connecting operator – a symmetric positive matrix C . Due to the poor conditionality of the matrix C it is necessary to perform regularization for factorization using the Cholesky method, which leads to a strong distortion of the direct wave front. But the fronts of scattered and reflected waves are weakly distorted. After removing the direct wave F-K filtering provides visualization of reflected and scattered waves for the simulated data for two acoustic models.

Keywords: boundary control method, wave visualization, numerical experiment.

ВВЕДЕНИЕ

Задача визуализации волн в условиях обратной задачи на основе метода граничного управления впервые была рассмотрена Белишевым М.И. в [Belishev, 2002]. В данной работе, напротив, рассматривается упрощенная задача визуализации фронтов только отраженных и рассеянных волн. Визуализация выполняется в полугеодезических координатах и основана на треугольной факторизации связывающего оператора [Белишев, Пушницкий, 1997] — в данной работе это симметричная положительная матрица C .

Рассмотрим начально-краевую задачу для волнового уравнения в полуплоскости:

$$\frac{1}{c^2(x,y)} u_{tt} = u_{xx} + u_{yy}, y > 0, t > 0, \quad (1)$$

$$u|_{t=0} = 0, u_t|_{t=0} = 0, u|_{y=0} = f \delta_{x_\alpha}, \quad (2)$$

где $f(t)$ — импульс, $\delta_{x_\alpha}(x) = \delta(x - x_\alpha)$ — функция Дирака, точка x_α пробегает отрезок $\Gamma_0 \subset \Gamma = \{y = 0\}$. Пусть $\Omega^T = \cup_{x_\alpha \in \Gamma_0} B(x_\alpha, T)$ — область, захваченная волнами к моменту T , где $B(x_\alpha, T)$ — риманов полушар с центром в точке $(x_\alpha, 0)$ радиуса T с конформно-евклидовой метрикой, определяемой скоростью c . Обратная задача состоит в восстановлении скорости c в Ω^T по измерениям $g(x, t; x_\alpha) := u_y(x, 0, t; x_\alpha)$, $x \in \Gamma_0$, $t \in [0, 2T]$. Явную линейную процедуру решения этой задачи дает метод граничного управления [Belishev, 1988,

2007], но в силу ее некорректности имеются трудности с реализацией. Некоторые результаты численной реализации представлены в [Belishev, Gotlib, 1999; Belishev et al., 2016].

ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

В данной работе без решения обратной задачи были построены фронты отраженных и рассеянных волн в лучевых (полугеодезических) координатах, используя подход, основанный на формуле Благовещенского, которая выражает скалярное произведение волн в $L_2(\Omega^T)$ через данные обратной задачи.

В основе эксперимента лежит формула вычисления $C_{\alpha\beta}$ по данным обратной задачи:

$$C_{\alpha\beta} := \int_{\Omega^T} u_t(x, y, t_\alpha; x_\alpha) u_t(x, y, t_\beta; x_\beta) \frac{dx dy}{c^2(x, y)} = \frac{1}{2} \int_0^{t_\alpha} f'(t + t_\alpha) [g(x_\alpha, t_\beta - t; x_\beta) - g(x_\alpha, t + t_\beta; x_\beta)] dt - \frac{1}{2} \int_0^{t_\alpha} g(x_\beta, t + t_\alpha; x_\alpha) [f'(t + t_\beta) + f'(t_\beta - t)] dt. \quad (3)$$

В силу того, что матрица C плохо обусловлена, невозможно непосредственно выполнить факторизацию, например, по методу Холецкого. Но после регуляризации путем замены C на $C + aI$, $a > 0$ и треугольной факторизации визуализация распространения волн становится возможной. Однако регуляризация приводит к сильному искажению

фронта прямой волны, хотя при этом фронты рассеянных и отраженных волн искажаются слабо.

В качестве данных использовались симулированные данные для двух акустических моделей (рис. 1, 2), одна из которых содержит дифракторы.

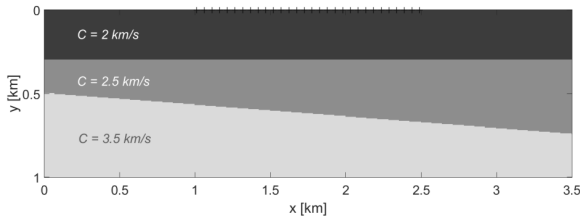


Рис. 1. Скоростная модель с двумя границами

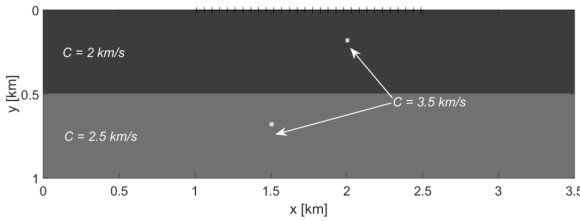


Рис. 2. Скоростная модель с границей и двумя дифракторами

Множество $\Sigma := \Gamma_0 \times [0, T]$, следуя Белишеву М.И., будем называть экраном. В работе была проведена визуализация распространения волн на экране от фиксированного (центрального) источника для обеих моделей. По сути, мы видим $v(x_\sigma, \tau_\sigma; x_\alpha, t_\alpha)$ в точках экрана в разные моменты времени t_α (источник x_α фиксирован). В левых частях рис. 3, 4 располагаются необработанные кадры распространения волн на экране, не подвергнутые фильтрации, на которых видны искаженные фронты прямой волны.

ОБСУЖДЕНИЕ

Характер искажений можно объяснить вкладом регуляризующей добавки αI . При этом отраженные волны от границ и дифракторов не искажаются (или мало искажаются). С целью выделения только отраженных и рассеянных волн была применена F-K-фильтрация волн, распространяющихся вверх по экрану с целью удаления прямой волны. В качестве продолжения данной работы может выступить восстановление скоростной функции, поскольку наличие фронтов волн от различных источников на экране позволяет найти метрику в полугеодезических координатах. Решение задачи возвращения к

исходной конформно-евклидовой метрике, основанное на конформных векторных полях Киллинга, приведено в [Pestov et al., 2015].

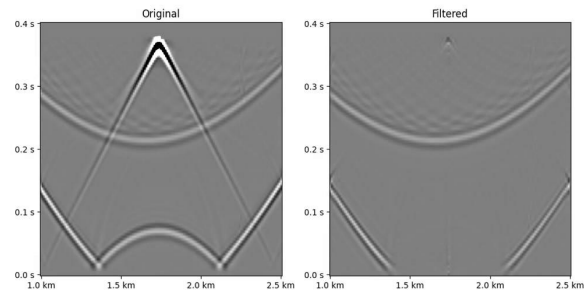


Рис. 3. Кадры до и после F-K-фильтрации для модели с двумя границами

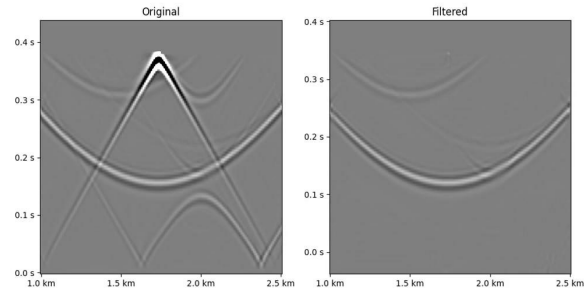


Рис. 4. Кадры до и после F-K-фильтрации для модели с границей и двумя дифракторами

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Belishev M.I. How to see waves under the Earth surface (the BC-method for geophysicists). III-Posed and Inverse Problems / (Eds.) Kabanikhin S.I., Romanov V.G. VSP, 2002. P. 67–84.

Белишев М.И., Пушницкий А.Б. К треугольной факторизации положительных операторов // Зап. научн. сем. 1997. ПОМИ 239. С. 45–60.

Belishev M.I. An approach to multidimensional inverse problems for the wave equation // Sov. Math. Dokl. 1988. V. 36. P. 481–484.

Belishev M.I. Recent progress in the boundary control method // Inverse Problems. 2007. V. 23. R1–R67.

Belishev M.I., Gotlib V.Y. Dynamical variant of the BC-method: theory and numerical testing // J. Inv. III-Posed Probl. 1999. V. 7. P. 221–240.

Belishev M.I., Ivanov I.B., Kubyshkin I.V., Semenov V.S. Numerical testing in determination of sound speed from a part of boundary by the BC-method // J. Inv. III-posed Probl. 2016. V. 23. N. 5.

Pestov L., Uhlmann G., Zhou H. An inverse kinematic problem with internal sources // Inverse Problems. 2015. V. 31. N. 5.

СЕНСОРНАЯ ДИАГНОСТИКА ШИРОКОПОЛОСНЫХ ИОНОСФЕРНЫХ КАНАЛОВ С ПОЛОСОЙ ДО 1 МГц ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ СКРЫТНОСТИ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ С ППРЧ ЗА СЧЁТ АДАПТИВНОГО ЭКВАЛАЙЗИРОВАНИЯ ВНУТРИМОДОВОЙ ДИСПЕРСИИ

В.В. Овчинников, Д.В. Иванов, В.А. Иванов, М.И. Рябова

Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола, Россия,
OvchinnikovVV@volgatch.net

SENSOR DIAGNOSTICS OF WIDEBAND IONOSPHERIC CHANNELS OF 1 MHz WIDTH TO INCREASE THE COVERTNESS OF FREQUENCY HOPPING DATA TRANSMISSION SYSTEMS BY MEANS OF ADAPTIVE EQUALIZATION OF INTRAMODE DISPERSION

V.V. Ovchinnikov, D.V. Ivanov, V.A. Ivanov, M.I. Ryabova

Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia, OvchinnikovVV@volgatch.net

Аннотация. В работе представлены методика сенсорной диагностики ионосферных широкополосных СВ каналов и результаты адаптивного эквалайзирования дисперсии на основе созданного SDR радио сенсора, позволяющего исследовать прикладные задачи ионосферного распространения волновых пакетов с полосой частот до 1 МГц в интересах широкополосной СВ связи. Проведены натурные эксперименты по сенсорной диагностике таких каналов на NVIS радиотрассе протяженностью 90 км. Экспериментально показано, что в результате адаптивного эквалайзирования с учетом данных сенсорной диагностики, энергетический выигрыш систем с быстрой ППРЧ, определяющий скрытность, в среднем составлял 10 дБ. Экспериментально установлено, что период адаптации эквалайзера для NVIS трасс не меньше 60 сек.

Ключевые слова: сенсорная диагностика, ионосферная СВ связь, широкополосный канал, внутримодовая дисперсия, адаптивное эквалайзирование.

Abstract. This paper presents a method for sensor diagnostics of wideband ionospheric HF channels and the outcomes of adaptive equalization by means of radio sensor developed using modern SDR technology. This sensor enables the study of applied problems in ionospheric propagation of wave packets with bandwidths of up to 1 MHz, aimed at enhancing wideband HF communications. Full-scale experiments on sensor diagnostics of wideband 1-MHz channels were carried out over a 90 km NVIS radio path. The experiments demonstrated that adaptive equalization based on sensor diagnostic data resulted in an average energy gain of 10 dB, significantly enhancing the covertness of systems with fast frequency hopping. It was also found that the equalizer adaptation period on NVIS paths can be at least 60 seconds.

Keywords: sensor diagnostics, ionospheric HF communication, wideband channel, intramode dispersion, adaptive equalization.

ВВЕДЕНИЕ

Основными существенными эффектами, препятствующими организации связи по ионосферному широкополосному каналу, являются частотная зависимость задержки каждой скачковой моды (внутримодовая дисперсия) и изменчивость в геофизическом времени среды распространения. Данные эффекты приводят к изменениям во времени структурных функций радиоканалов [Иванов и др., 2022; Арманд, 2003; Аджемов и др., 2021]. Обычно дисперсия групповой задержки достигает величины в несколько десятков микросекунд на Меггерц. Преодоление изменчивых в геофизическом времени негативных эффектов внутримодовой дисперсии требует развития методов адаптивного эквалайзирования и сенсорной диагностики для обучения эквалайзера. Последний вопрос к настоящему времени наименее изучен. Новые возможности в решении данной проблемы создает активно развивающаяся технология программно-конфигурируемого (определяемого) радио (SDR).

МЕТОДИКА СЕНСОРНОЙ ДИАГНОСТИКИ ДЛЯ ОЦЕНКИ СТРУКТУРНЫХ ФУНКЦИЙ ИОНОСФЕРНЫХ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СВ КАНАЛОВ

Сенсорная диагностика основана на применении канальной модели распространения в

ионосфере волновых пакетов с учетом согласованной обработки их сложного сигнала в частотной и временной областях. Известно [Иванов и др., 2022], что на выходе канала спектр полезного сигнала $U_R(j\omega, t)$, кроме спектра излучаемого сигнала $U_T(j\omega)$, содержит мультипликативную помеху вида частотной характеристики $H(j\omega, t)$ (ЧХ) канала:

$$U_R(j\omega, t) = U_T(j\omega) \cdot H(j\omega, t). \quad (1)$$

ЧХ из-за дисперсии групповой задержки приводит к искажениям сжатых сигналов. В нашем случае таких сигналов два. Первый диагностирующий, а второй — связной.

Рассмотрим в начале задачу сенсорной диагностики. Методика работы сенсора направлена на оценку ЧХ канала, поскольку в ней содержится необходимая для адаптивного эквалайзирования информация. В рамках этой задачи, в выражение (1) мешающим является спектр излучаемого сенсором сигнала. Для удаления данной помехи применим метод согласованной фильтрации, тогда спектр сжатого сигнала можно представить в виде:

$$\hat{U}_R(j\omega, t) = U_R(j\omega, t) \cdot \hat{U}_T^*(j\omega) = H(j\omega, t) \cdot |U_T(\omega)|^2. \quad (2)$$

Спектральная плотность энергии $|U_T(\omega)|^2$ излучаемого сигнала является действительной функцией, определяющей пределы изменения частоты в его спектре и поэтому, в совокупности ЧХ, определяет частотный ионосферный канал, занимаемый сигналом сенсора.

Методика получения в эксперименте дискретных отсчетов широкополосной ЧХ $\{H_k(j\bar{\omega}_k, t)\}$ имеет свои особенности. Они сводятся к тому, что измерения отсчетов реализуются во временной области. С этой целью широкополосный канал декомпозируется по частоте на множество N парциальных примыкающих узкополосных ω_{ch} каналов, в которых внутримодовой дисперсией можно пренебречь. В таком случае структурная функция импульсной характеристики (ИХ) произвольного k -ого парциального подканала на рабочей частоте $\bar{\omega}_k = \frac{\omega_{k+1} + \omega_k}{2}$ с полосой частот $\omega_{ch} = \omega_{k+1} - \omega_k$ будет иметь вид [Ivanov et al., 2019]:

$$h_k(\bar{\omega}_k, t, \tau) = \frac{\omega_{ch}}{2\pi} H_k(\bar{\omega}_k, t) \cdot \exp[-j(\phi(\bar{\omega}_k, t))] \cdot \text{sinc}[\omega_{ch}(\tau - \phi'(\bar{\omega}_k, t))/2], \quad (3)$$

где $H_k(\omega, t) \approx H_k(\bar{\omega}, t)$ — АЧХ парциального канала, $\phi_k(\omega, t) \approx \phi_k(\bar{\omega}_k, t) + \phi'_k(\bar{\omega}_k, t) \cdot (\omega - \bar{\omega}_k)$ — его ФЧХ, $\phi'_k(\bar{\omega}_k, t) = \tau_{gk}(\bar{\omega}_k, t)$ — коэффициент фазовой дисперсии первого порядка, равный групповой задержке.

Видно, что значение ИХ в максимуме огибающей $\max |h(\bar{\omega}_k, \tau)|$, когда $\tau = \tau_{gk}$, даёт отсчёт комплексной ЧХ на частоте $\omega = \bar{\omega}_k$ парциала [Ivanov et al., 2019]:

$$h_k(\bar{\omega}_k, t, \tau = \tau_{gk}) = H_k(j\bar{\omega}_k, t) \cdot \frac{\omega_{ch}}{2\pi}. \quad (4)$$

Данная методика позволяет найти все множество отсчетов ЧХ широкополосного канала и записать их в виде:

$$H(j\omega, t) = \{H_1(j\bar{\omega}_1, t), H_2(j\bar{\omega}_2, t), \dots, H_{k-1}(j\bar{\omega}_{k-1}, t), H_k(j\bar{\omega}_k, t), \dots, H_{N-1}(j\bar{\omega}_{N-1}, t), H_N(j\bar{\omega}_N, t)\}. \quad (5)$$

Данный вектор является ключевым результатом сенсорной диагностики. Он позволяет, применив обратную фильтрацию реализовать метод адаптивного эквалайзирования для преодоления внутримодовой дисперсии в широкой полосе канала. Повторяя периодически в геофизическом времени данную процедуру реализуем метод адаптивного эквалайзирования. Очевидно, что за период сенсорной диагностики следует выбрать время стационарности канала [Ivanov et al., 2022; Ivanov et al., 2019].

МЕТОДИКА АДАПТИВНОГО ЭКВАЛАЙЗИРОВАНИЯ ДЛЯ ПРЕОДОЛЕНИЯ ВНУТРИМОДОВОЙ ДИСПЕРСИИ ПРИ РАСШИРЕНИИ ПОЛОСЫ КВ КАНАЛА

Методика адаптивного эквалайзирования [Ivanov et al., 2022] для преодоления внутримодовой дисперсии базируется на модели (1) в частотной области. Подход основан на деконволюции ЧХ

широкополосного канала методом инверсной фильтрации. Характеристику фильтра можно оценить по известной ЧХ канала, используя соотношение:

$$K(j\omega, t) = H^{-1}(j\omega, t) = \frac{H^*(j\omega, t)}{H^2(j\omega, t)} \Rightarrow U_R(j\omega, t) \cdot K(j\omega, t) = U_T(j\omega). \quad (6)$$

Алгоритм деконволюции представлен формулой (6). В результате применения данной процедуры широкополосный связной сигнал, поступающий на вход эквалайзера с характеристикой $K(j\omega, t)$, заданной своими отсчетами, декомпозируется банком N полосовых фильтров на парциальные каналы с характеристиками обратным ЧХ ионосферного канала.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА. РЕЗУЛЬТАТЫ АДАПТИВНОГО ЭКВАЛАЙЗИРОВАНИЯ ДИСПЕРСИИ В ПОЛОСЕ 1 МГЦ НА NVIS РАДИОТРАССЕ

Терминалы сенсора реализованы на базе современной технологии SDR (software-defined radio) [Ivanov et al., 2022]. В качестве основы использована платформа USRP N210. Синтез и обработка сигналов осуществляется на ПК. Передатчик реализован с использованием усилителя мощности типа LZU-22.

Эксперименты проводились в сентябре 2023 г. на NVIS радиотрассе г. Йошкар-Ола – оз. Яльчик, протяженностью 90 км. Сенсорная диагностика каналов моды 1F с полосой 1 МГц в из диапазона 2–12 МГц проводилась на интервалах геофизического времени в 60 с. Данные обрабатывались по рассмотренным методикам и далее на основе результатов диагностики реализовалось обучение эквалайзера, способствующего преодолению негативного эффекта дисперсии задержки.

На рис. 1 представлены примеры ИХ канала с полосой 1 МГц, до коррекции 1(а) и после коррекции 1(б) в течение первых 5 секунд сенсорной диагностики канала на средней частоте 5 МГц. Красным цветом на рис. 1(а, б) отображается ИХ, полученная на 1 секунде тестирования, определяющей корректирующие коэффициенты адаптивного эквалайзера. Рис. 1(в) демонстрирует достигаемый энергетический выигрыш ИХ, в различные моменты времени. Синий график соответствует случаю ИХ до процедуры адаптивного эквалайзирования, оранжевый — после эквалайзирования.

Полученные результаты демонстрируют достигаемый эффект адаптивного эквалайзирования по данным сенсорной диагностики, когда внутримодовая фазовая дисперсия уменьшается до приемлемых величин, т.е. преодолевается существенное по величине дрожание фазы для ППРЧ. Установлено, что в результате адаптивного эквалайзирования, энергетический выигрыш для системы с быстрой программной перестройкой рабочей частоты в полосе 1 МГц в среднем составлял 10 дБ, в течение всего сеанса диагностирования канала. Экспериментально показано, что период адаптации эквалайзера не менее 60 секунд.

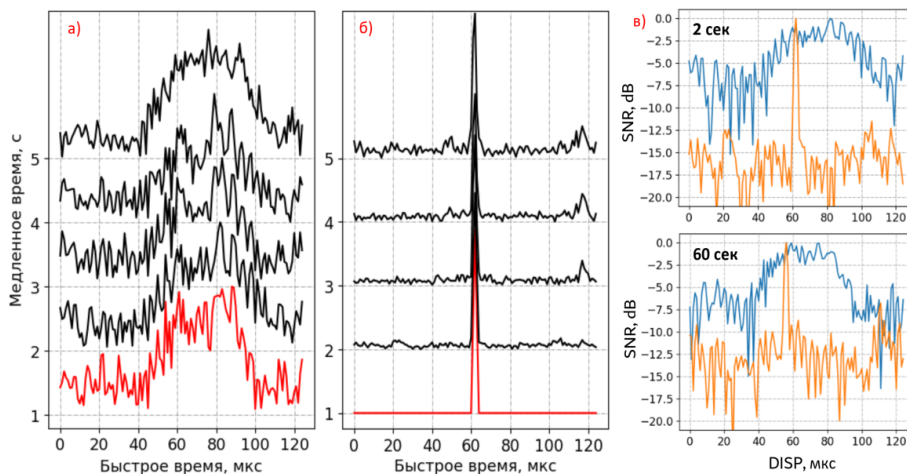


Рис. 1. Результаты сенсорной диагностики канала с полосой 1 МГц для одиночного сеанса: а) ИХ канала полученные сенсором; б) ИХ канала после адаптивного эквалайзирования; в) энергетический выигрыш в различные моменты времени

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен метод сенсорной диагностики для оценки структурных функций ионосферных широкополосных КВ каналов с внутримодовой дисперсией. Проведенные экспериментальные исследования с использованием созданного сенсора канала показали, что предложенный метод позволяет для систем широкополосной связи повысить энергетический выигрыш, определяющий дополнительную энергетическую скрытность, в среднем до 10 дБ. Преодолевается существенное по величине дрожание фазы, определяющее структурную скрытность. Дополнительно показано, что изменчивостью дисперсии в канале можно пренебречь на интервалах не менее 60 сек.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда, проект № 22-19-00073.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Иванов Д.В., Иванов В.А., Рябова Н.В. и др. Новые возможности систем широкополосной когнитивной связи, работающих в ионосферных КВ-радиоканалах с внутримодовой дисперсией // Радиотехника. 2022. Т. 86, № 11. С. 162–177.
- Арманд Н.А. Распространение широкополосных сигналов в дисперсных средах // Радиотехника и электроника. 2003. Т. 48, № 9. С. 1045–1057.
- Аджемов С.С., Лобов Е.М., Кандауров Н.А. и др. Алгоритмы оценки и компенсации дисперсионных искажений широкополосных сигналов ионосферных радиолиний связи // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2021. Т. 13, № 5. С. 57–74.
- Ivanov D.V., Ivanov V.A., Ovchinnikov V.V. et al. Method of Training Mode of Adaptive System for Frequency Dispersion Correction in Wideband Ionospheric HF Communication Channels // 2019 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF), St. Petersburg, Russia. 2019. P. 1–4.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО ВОЗМУЩЕНИЯ АТМОСФЕРЫ, ИНИЦИИРОВАННОГО ИМПУЛЬСОМ НА НИЖНЕЙ ГРАНИЦЕ

Е.С. Смирнова^{1,2}, С.Ю. Доброхотов¹

¹Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, Москва, Россия, smirnova.ekaterina.serg@gmail.com

²Балтийский Федеральный Университет им. И. Канта, Калининград, Россия

MODELING OF VERTICAL PROPAGATION OF ATMOSPHERIC ACOUSTIC DISTURBANCE INITIATED BY A PULSE AT THE LOWER BOUNDARY

E.S. Smirnova^{1,2}, S.Yu. Dobrokhотов¹

¹Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russia, smirnova.ekaterina.serg@gmail.com

²Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

Аннотация. Для моделирования вертикального распространения акустического возмущения атмосферного газа, инициированного некоторым импульсом на нижней границе области, в данной работе строятся как аналитические, так и асимптотические решения начально-краевой задачи для одномерного уравнения Клейна-Гордона, к которому может быть сведена одномерная система уравнений гидротермодинамики. В работе рассматриваются случаи постоянного и переменного значения высоты однородной атмосферы.

Ключевые слова: атмосфера, акустика, эволюция возмущения, начально-краевая задача.

Abstract. To simulate the vertical propagation of an acoustic disturbance of atmospheric gas initiated by a certain pulse at the lower boundary of the region, in this work, both analytical and asymptotic solutions of the initial boundary value problem are constructed for the one-dimensional Klein-Gordon equation, to which the one-dimensional system of hydrothermodynamics equations can be reduced. The work considers the cases of constant and variable values of the height of a homogeneous atmosphere.

Keywords: atmosphere, acoustics, evolution of disturbance, initial boundary value problem.

ВВЕДЕНИЕ

Для моделирования волновых возмущений в атмосферном газе ранее решалась начально-краевая задача для системы уравнений гидротермодинамики. Данный подход имел ряд недостатков: в одномерном случае такая система имеет 3 уравнения, в трехмерном — 5, что в свою очередь требует аналогичного количества начальных и краевых условий. В данной работе кратко изложен подход, основанный на редуцировании одномерной системы уравнений гидротермодинамики к одномерному уравнению Клейна-Гордона для вертикальной скорости акустического возмущения. Основным параметром в двух таких начально-краевых задачах является высота однородной атмосферы H . Фиксирование постоянного значения $H = H_0$ или же рассмотрение случая произвольной зависимости от высоты $H = H(z)$ определяет начально-краевую задачу для уравнения Клейна-Гордона с постоянными или переменным коэффициентами соответственно.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим систему уравнений гидротермодинамики, которая описывает поведение газа или жидкости как недиссипативной среды, что позволяет использовать её для моделирования эволюции движения, которое возможно в газовой среде [Брежнев и др., 1994]. В данной работе мы ограничиваемся рассмотрением одномерного случая, который позволит описать вертикальное распространение плоских акустических волн [Leble, Perelotova, 2013]:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\gamma-2}{2\gamma H(0)} - \frac{H(z)}{H(0)} \frac{\partial}{\partial z} \right) P + \frac{\Phi}{\gamma H(0) \rho_0}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -\gamma g \rho_0 H(0) \frac{\partial U}{\partial z} - g \rho_0 H(0) \frac{\gamma-2}{2H(z)} U, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = -\frac{g \rho_0 H(z)}{H(0)} \left(\gamma - 1 + \gamma \frac{dH(z)}{dz} \right) U. \quad (3)$$

Здесь P, Φ, U — функции, связанные с реальными значениями как

$$P = p' \cdot \exp \left(\int_0^z \frac{dz'}{2H(z')} \right),$$

$$\Phi = \varphi' \cdot \exp \left(\int_0^z \frac{dz'}{2H(z')} \right),$$

$$U = V \cdot \exp \left(- \int_0^z \frac{dz'}{2H(z')} \right),$$

где $p'(z)$ и $\rho'(z)$ — возмущение давления и плотности на фоне устойчивых стационарных функций $\bar{p}(z), \bar{\rho}(z)$, возмущение энтропии $\varphi' = p' - \gamma \rho' \bar{p} / \bar{\rho}$, $\gamma = C_p / C_v$, C_p, C_v — молярные теплоемкости при постоянном давлении и объеме соответственно, $g = g_z$ — вертикальная составляющая вектора поля ускорения силы тяжести \vec{g} , ρ_0 — плотность воздуха на нижней границе.

Система уравнений одномерной гидротермодинамики (1)–(3) простыми операциями сводится к уравнению Клейна-Гордона. Продифференцируем уравнение (1) по t и выразим производные $\partial P / \partial t$ и $\partial \Phi / \partial t$ из (2) и (3) как функцию U и ее производных. Наконец, получим:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} - \tilde{c}^2(z) \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + \tilde{a}(z)U = 0, \quad (4)$$

где $\tilde{c}(z) = \sqrt{\gamma g H(z)}$, $\tilde{a}(z) = \frac{\gamma g}{4H(z)} \left(1 + 2 \frac{dH(z)}{dz}\right)$.

Дополним последнее уравнение начальными и граничными условиями:

$$\begin{aligned} U(z, t = 0) &= U_t(z, t = 0) = 0, \\ U(0, t) &= F(t), \quad \text{при } t > 0, \\ U(0, t) &= 0, \quad \text{при } t \leq 0. \end{aligned} \quad (5)$$

В качестве конкретного примера граничного условия будем использовать функцию вида:

$$F(t) = A\lambda^2 t e^{-\lambda t}, \quad (6)$$

где λ — характеризует длительность импульса на границе, A — амплитуда возмущения скорости на нижней границе.

Последующее построение формальных асимптотик решения начально-краевой задачи (4)–(5) требует введения малого параметра. Такой может быть получен при переходе к безразмерным переменным таким, что $t = T\tau$, $z = Zy$, где Z — характерный размер области, а T — характерное время, в течение которого изучается процесс при соотношении $Z = c_0 T$, где $c_0 = \sqrt{\gamma g H_0}$ — скорость звука близ нижней границы. Тогда (4) принимает вид:

$$h^2 \left(\frac{\partial^2 U}{\partial \tau^2} - c(y) \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) + a(y)U = 0, \quad (7)$$

где $h = 1/\sqrt{a_0 T}$ — малый параметр, $a_0 = \gamma g/4H_0$, а функции коэффициентов:

$$\begin{aligned} c(y) &= \frac{\tilde{c}(z)}{c_0} = \sqrt{\frac{H(Zy)}{H_0}}, \\ a(y) &= \frac{\tilde{a}(z)}{a_0} = \frac{H_0}{H(Zy)} \left(1 + 2 \frac{dH(Zy)}{dy}\right). \end{aligned} \quad (8)$$

Дополним (7) аналогичными (5) начальными и краевыми условиями, а пример краевой функции (6) в таком случае имеет вид $F(\tau) = A\mu^2 \tau e^{-\mu \tau}$, $\mu = \lambda T$.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ДЛЯ ПОСТОЯННОГО ЗНАЧЕНИЯ $H=H_0$

Случай, когда рассматривается постоянное значение высоты однородной атмосферы $H = H_0$, соответствует уравнению (7) с постоянными коэффициентами. Выберем значение $H_0 = H(z = 0) = H(y = 0)$, тогда коэффициенты (8) принимают постоянное значение: $c(y) = 1$, $a(y) = 1$. Для начально-краевой задачи для уравнения Клейна-Гордона с постоянными коэффициентами найдено аналитическое решение имеющее вид [Смирнова, 2023]:

$$U(y, \tau) = U_1(y, \tau) + U_2(y, \tau), \quad (9)$$

$$U_1(y, \tau) = \frac{1}{\pi h} \operatorname{Re} \int_0^1 \mathcal{F}\left(\frac{i\eta}{h}\right) e^{\frac{i\eta\tau}{h} - \frac{y}{h}\sqrt{1-\eta^2}} d\eta, \quad (10)$$

$$U_2(y, \tau) = \frac{1}{\pi h} \operatorname{Re} \int_1^\infty \mathcal{F}\left(\frac{i\eta}{h}\right) e^{\frac{i\eta\tau}{h} - \frac{iy}{h}\sqrt{\eta^2-1}} d\eta, \quad (11)$$

где $\mathcal{F}(i\eta/h)$ — Лаплас-образ граничного условия в (5). Данное аналитическое решение состоит из двух слагаемых: погранслоного $U_1(y, \tau)$, которое быстро убывает при отдалении от точки $y = 0$, и осциллирующего $U_2(y, \tau)$, которое описывает распространяющуюся вверх волну. Для интервала $\tau > y > \delta > 0$ справедливы следующие асимптотики

[Смирнова, 2023]:

$$U_1(y, \tau) \approx \frac{e^{-y/h}}{\pi \tau} \operatorname{Re}(\mathcal{F}(0)), \quad (12)$$

$$U_2(y, \tau) \approx \sqrt{\frac{2}{\pi h}} \frac{y}{(\tau^2 - y^2)^{3/4}} \operatorname{Re} \left(e^{\frac{i}{h}\sqrt{\tau^2 - y^2}} e^{i\frac{\pi}{4}} \mathcal{F}\left(\frac{i}{h\sqrt{\tau^2 - y^2}}\right) \right). \quad (13)$$

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ДЛЯ ПЕРЕМЕННОГО ЗНАЧЕНИЯ $H=H(z)$

Известно, что высота однородной атмосферы имеет сложную зависимость от вертикальной координаты, однако решение поставленной задачи в случае переменного значения $H = H(z)$ требует некоторый явный вид такой функции. В данной работе используется аппроксимация следующего вида:

$$H(z) = 7000 + 0.135 \tanh^5 \frac{z}{120000}, \quad (14)$$

которая позволяет выбрать $Z = 217330$ м, соответствующее значению $y = 1$.

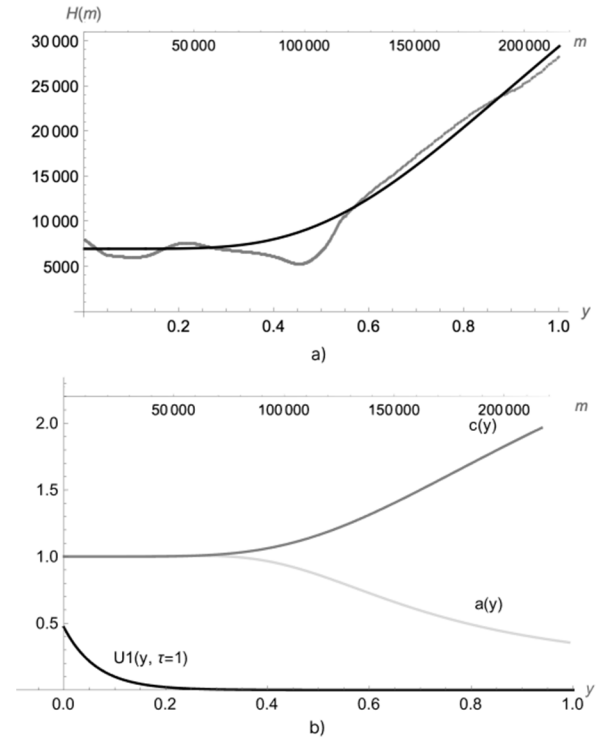


Рис. 1. (а) Высота однородной атмосферы $H(z)$, полученная из набора численных данных для температуры $H=N(T(z))$ (серый), и используемое приближение (14) (черный); (б) Функции $c(y)$ (темно-серый), $a(y)$ (светло-серый) (8), нормированная асимптотика U_1 (12)

На рис. 1 (б) видно, что вклад погранслоной части решения U_1 ограничен небольшой окрестностью $y = 0$, которая полностью покрывается областью, где функции $c(y)$, $a(y)$ принимают постоянное значение. Это даёт основание использовать уже существующее погранслоное решение (12), (14) в том числе и для случая переменных $c(y)$, $a(y)$, что эквивалентно постоянству значения высоты однородной атмосферы H при малых z . Для волновой части решения U_2 строится формальная асимптотика методом ВКБ с применением канонического оператора Маслова [Маслов, Федорюк, 1976], принимая

в качестве начального условия существующее аналитическое решение (9)–(11) [Dobrokhotov, Smirnova, 2024].

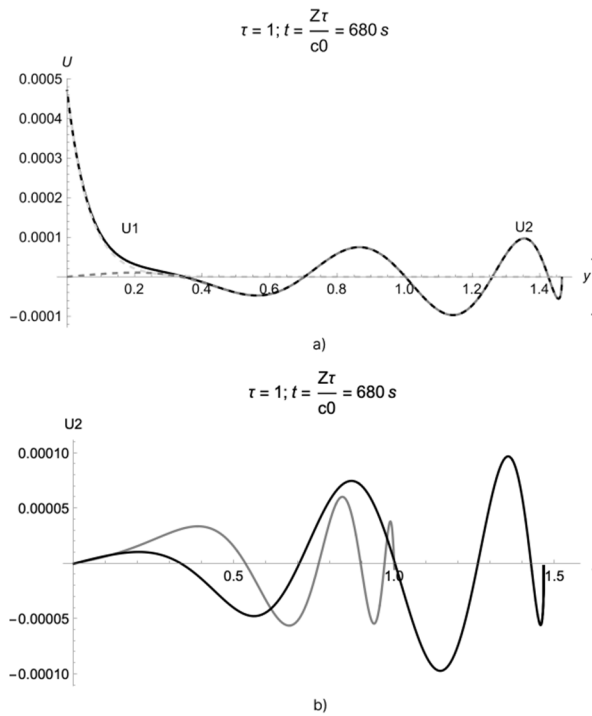


Рис. 2. а) Асимптотика решения начально-краевой задачи для граничного условия (6): светло-серый пунктир — U_1 , темно-серый пунктир — U_2 , черный — $U = U_1 + U_2$; б) Сравнение поведения асимптотик волновой части решения U_2 для случая постоянного (серый) и переменного (черный) значения высоты однородной атмосферы

Работа Смирновой Е.С. выполнена при финансовой поддержке БФУ им. Канта в рамках научного проекта №122051300013-8, работа Доброхотова С.Ю. выполнена при финансовой поддержке Госзадания № 123021700044-0.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Брежнев Ю.В., Кшевецкий С.П., Лебле С.Б. Линейная инициализация линейных полей // Известия АН. Физика атмосферы и океана. 1994. Е. 30(1). С. 86–90.

Маслов В.П., Федорюк М.В. Квазиклассическое приближение для уравнений квантовой механики. М. Наука, 1976. 296 с.

Смирнова Е.С. Асимптотика решения одной начально-краевой задачи для одномерного уравнения Клейна–Гордона на полуоси // Матем. заметки. 2023. Т. 114, № 4. С. 602–614.

Dobrokhotov S., Smirnova E. Asymptotics of the Solution of the Initial Boundary Value Problem for the One-Dimensional Klein–Gordon Equation with Variable Coefficients // Russian Journal of Mathematical Physics. 2024. V. 31, N 2 (принята к печати).

Leble S., Perelomova A. Problem of proper decomposition and initialization of acoustic and entropy modes in a gas affected by the mass force // Appl. Math. Model. 2013. V. 13. P. 629–635.

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ АТМОСФЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК В ПРИЛОЖЕНИИ К НАЗЕМНЫМ АСТРОНОМИЧЕСКИМ ТЕЛЕСКОПАМ

А.Ю. Шиховцев¹, П.Г. Ковadlo¹, А.В. Киселев¹, А.А. Леженин²

¹Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия,

Ashikhovtsev@iszf.irk.ru, kovadlo2006@rambler.ru, kiselev@iszf.irk.ru

²Институт вычислительной математики и математической геофизики

Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия,

lezhenin@ommfao.sccc.ru

METHODS FOR ESTIMATING ATMOSPHERIC CHARACTERISTICS AS APPLIED TO GROUND-BASED ASTRONOMICAL TELESCOPES

A.Yu. Shikhovtsev¹, P.G. Kovadlo¹, A.V. Kiselev¹, A.A. Lezhenin²

¹Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia,

Ashikhovtsev@iszf.irk.ru, kovadlo2006@rambler.ru, kiselev@iszf.irk.ru

²Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia,

lezhenin@ommfao.sccc.ru

Аннотация. В настоящем докладе обсуждаются методы, используемые для оценки ряда атмосферных характеристик релевантных для астрономических наблюдений. Рассматриваются возможности повышения временного и пространственного разрешений при восстановлении полей скорости ветра, температуры и влажности воздуха. Высокая пространственная и временная детализация в метеорологических данных дает возможность параметризовать атмосферную мелкомасштабную турбулентность также с более высоким разрешением. Приводятся некоторые результаты по адаптации и применению мезомасштабной модели WRF в пределах Байкальского региона (с центром над Байкальской Астрофизической Обсерваторией). Оценены вертикальные профили оптической турбулентности над Большим солнечным вакуумным телескопом, определяющие амплитуды оптических искажений, формируемых на разных высотах в атмосфере.

Ключевые слова: оптическая турбулентность, seeing, WRF, Era-5 реанализ

Abstract. This report discusses methods used to estimate atmospheric characteristics relevant to astronomical observations. The possibilities for increasing temporal and spatial resolutions when reconstructing fields of wind speed, temperature and air humidity are considered. High spatial and temporal resolution in meteorological data makes it possible to parameterize atmospheric small-scale turbulence with higher resolution too. We present some results on the adaptation and application of the mesoscale WRF model within the Baikal region (centered over the Baikal Astrophysical Observatory). We also estimate vertical profiles of optical turbulence over a Large Solar Vacuum Telescope, which determine the amplitudes of optical distortions formed at different atmospheric heights.

Keywords: optical turbulence, seeing, WRF, Era-5 reanalysis

ВВЕДЕНИЕ

Для планирования наблюдательного времени на астрономических телескопах наземного базирования одной из задач является развитие методов оценки атмосферных характеристик, определяющих возможности наблюдений [Ботыгина, 2013; Корнилов, 2009; Shikhovtsev, 2019]. К ключевым таким характеристикам относят вертикальные профили оптической турбулентности (ОТ), а также параметр seeing, который определяет угловое разрешение. Эти характеристики, во многом, определяют технические параметры систем адаптивной оптики [Лукин, 2024].

В настоящем докладе обсуждаются методы оценки характеристик оптической турбулентности, увеличения пространственного и временного разрешения, а также пути повышения точности оценки и предсказания интегрального параметра seeing с применением нейронных сетей. В частности, для оценки вертикальных профилей ОТ предлагается использовать градиентный метод в комбинации с минимизацией СКО между измеренными и модельными значениями параметра seeing и изопланатического угла. Для повышения разрешения профили ОТ могут быть рассчитаны на основе данных модели WRF с высоким горизонтальным и временным разрешением.

ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ПРОФИЛИ ОПТИЧЕСКОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПО ДАННЫМ РЕАНАЛИЗА ERA-5 С ОГРАНИЧЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

Для определения устойчивых вертикальных профилей оптической турбулентности над Большим солнечным вакуумным телескопом (БСВТ) были использованы данные ре-анализа Era-5. С применением градиентного метода [Shikhovtsev, 2023] и данных о скорости ветра и температуре воздуха на различных уровнях давления получены вертикальные профили оптической турбулентности над БСВТ для разных сезонов года (рис.1) [Shikhovtsev, 2024].

Полученные вертикальные профили оптической турбулентности над БСВТ демонстрируют быстрое уменьшение с высотой структурной постоянной турбулентных флуктуаций показателя преломления воздуха C_n^2 с высотой. Значения C_n^2 получены на 27 высотных уровнях в слое от 5 м до 21630 м. Эти профили могут быть использованы как референсные профили оптической турбулентности над БСВТ в целях оптимизации параметров макета системы адаптивной оптики.

ВЕРТИКАЛЬНЫЙ ПРОФИЛЬ ОПТИЧЕСКОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПО ДАННЫМ МОДЕЛИ WRF

С целью получения вертикальных профилей оптической турбулентности с более высоким пространственным разрешением над БСВТ, мы адаптировали мезомасштабную модель WRF для Байкальского региона. Вертикальные профили оптической турбулентности над БСВТ, восстановленные по данным модели WRF (синяя кривая) и по модели Хавнагеля-Волли (оранжевая кривая) показаны на рис. 2.

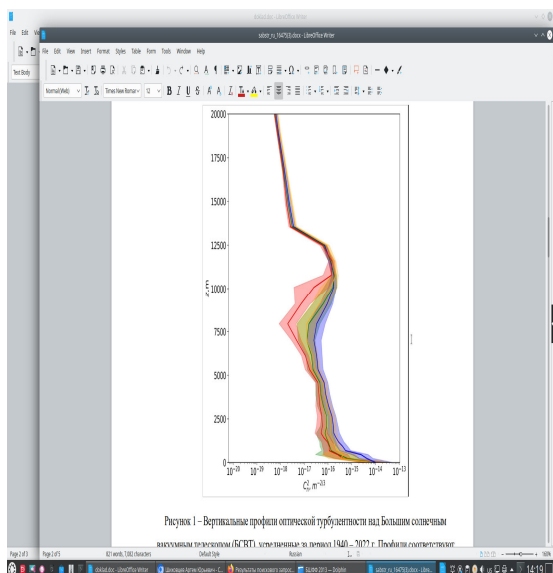


Рис. 1. Вертикальные профили оптической турбулентности над БСВТ, восстановленные по данным ре-анализа Era-5 для разных сезонов года. Синяя кривая соответствует зиме, зеленая — весне, красная — лету и оранжевая — осени

В отличие от данных ре-анализа Era-5, расчет C_n^2 выполнялся для 44 высот, с наилучшим разрешением в нижних слоях атмосферы. Число высотных уровней до 3100 м составило 12. В более высоких слоях атмосферы моделирование проводилось до высоты 30 800 м.

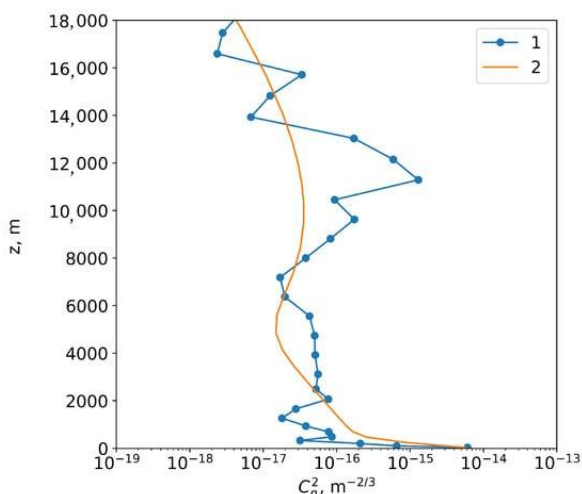


Рис. 2. Вертикальные профили оптической турбулентности над БСВТ, восстановленные по данным модели WRF (синяя кривая) и по модели Хавнагеля-Волли (оранжевая кривая)

Анализ рис. 2 показывает, что вертикальный профиль оптической турбулентности содержит ряд атмосферных слоев с повышенной интенсивностью оптических флуктуаций. Изрезанный характер вертикального профиля оптической турбулентности наблюдается не только в нижнем, т.н. атмосферном пограничном слое, но и под тропопаузой. Необходимо подчеркнуть, что градиентная модель подразумевает, что значения C_n^2 при увеличении вертикальных градиентов скорости ветра и внешнего масштаба турбулентности должны также возрастать. В то же время, экспериментальные данные показывают, что интенсивность оптической турбулентности C_n^2 уменьшается на фоне развития мезомасштабных вихревых структур в нижнем 500–700 м слое атмосферы (рис. 3)

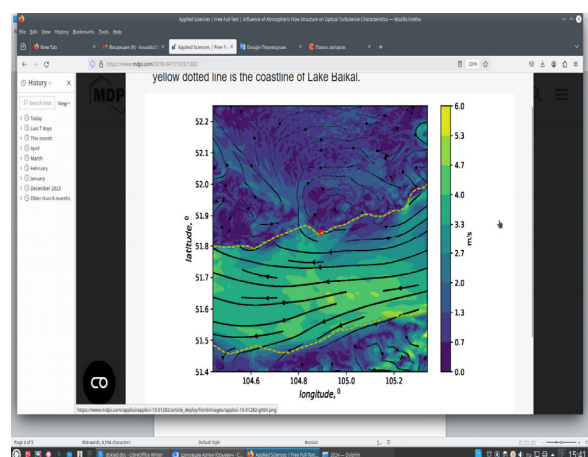


Рис. 3. Поле скорости ветра вокруг БСВТ (красный маркер) и мезомасштабная вихревая структура

ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПРОФИЛЯ ОПТИЧЕСКОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Важнейшей характеристикой вертикальных профилей оптической турбулентности является интеграл от структурной постоянной турбулентных флуктуаций показателя преломления воздуха по высоте. Этот интеграл определяет качество изображения, а именно, параметр seeing, измеряемых в угловых секундах. Данные измерений оптических искажений, как и оценки интенсивности оптической турбулентности, полученные по результатам моделирования могут быть использованы для задания дополнительных входных переменных для обучения нейронных сетей для диагностики и прогнозирования характеристик качества астрономического изображения [Shikhovtsev, 2023; Volbasova, 2021]. Фактически, использование характеристик мезомасштабного вихря, его завихренности, геометрических характеристик, должно учитывать подавление мелкомасштабной турбулентности в крупномасштабном вихревом течении и повышать точность предсказания параметра seeing.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем докладе обсуждаются методы оценки вертикальных профилей оптической

турбулентности и одной из важнейших характеристик, seeing. Показано, что вертикальные профили оптической турбулентности могут быть восстановлены по данным реанализа Era-5 с минимизацией СКО между измеренными и расчетными значениями seeing. Увеличение пространственного разрешения может быть достигнуто путем использования мезомасштабной модели WRF.

Результаты получены с использованием Уникальной научной установки Большой солнечный вакуумный телескоп <http://ckp-rf.ru/usu/200615/>. Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ботыгина Н.Н., Ковadlo П.Г., Копылов Е.А. и др. Оценка качества астрономического видения в месте расположения Большого солнечного вакуумного телескопа по данным оптических и метеорологических измерений // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26, № 11. С. 942–947.

Корнилов В., Ильясов С., Возякова О. и др. Измерения оптической турбулентности в свободной атмосфере

над горой Майданак в 2005–2007 гг. // Письма в Астроном. журн. 2009. Т. 35, № 8. С. 606–614.

Shikhovtsev A., Kovadlo P., Lukin V. Temporal variations of the turbulence profiles at the Sayan Solar Observatory site // Atmosphere. 2019. V. 10, N 9. P. 499.

Лукин В.П., Лукин И.П. Обзор современных технологий измерения, прогнозирования и коррекции турбулентных искажений в оптических волнах // Компьютерная оптика. 2024. Т. 48, № 1. С. 68–80.

Shikhovtsev A.Y., Kovadlo P.G., Lezhenin A.A. et al. Simulating Atmospheric Characteristics and Daytime Astronomical Seeing Using Weather Research and Forecasting Model // Appl. Sci. 2023. V. 13. P. 6354.

Shikhovtsev A.Yu. Reference optical turbulence characteristics at the Large Solar Vacuum Telescope site // Publications of the Astronomical Society of Japan. 2024. psae031.

Shikhovtsev A.Y., Kovadlo P.G., Kiselev A.V. et al. Application of Neural Networks to Estimation and Prediction of Seeing at the Large Solar Telescope Site // PASP. 2023. V. 135. 014503.

Bolbasova L.A., Andrakhanov A.A., Shikhovtsev A.Y. The application of machine learning to predictions of optical turbulence in the surface layer at Baikal Astrophysical Observatory // MNRAS. 2021. V. 504, iss. 4. P. 6008–6017.

ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЛЕДЯНЫХ КРИСТАЛЛОВ ПЕРИСТОЙ ОБЛАЧНОСТИ ДЛЯ ЗАДАЧ АКТИВНОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

В.А. Шишко, Д.Н. Тимофеев, Н.В. Кустова, Т.В. Русскова, А.В. Коношонкин

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Россия,
sva@iao.ru

OPTICAL MODELS OF ICE CRYSTALS OF CIRRUS CLOUDS FOR ACTIVE REMOTE SENSING OF THE ATMOSPHERE

V.A. Shishko, D.N. Timofeev, N.V. Kustova, T.V. Russkova, A.V. Konoshonkin

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia,
sva@iao.ru

Аннотация. Перистые облака являются объектом активных исследований в последние десятилетия. Однако их влияние на перенос солнечной радиации в атмосфере Земли и, следовательно, на климат планеты изучено недостаточно. Космические лидары, такие как CALIPSO и EarthCARE, являются основными инструментами, используемыми для изучения перистых облаков посредством активного дистанционного зондирования. Однако интерпретация лидарных данных представляет собой сложную задачу оптики атмосферы. Основным препятствием в интерпретации лидарных данных является отсутствие полного решения прямой задачи рассеяния света на кристаллических частицах льда перистых облаков.

В докладе представлено решение задачи рассеяния света для ледяных кристаллических частиц, типичных для перистых облаков, включая гексагональные пластинки и столбики, дроксталлы и частицы произвольной формы. Размеры частиц варьировались от 10 до 1000 мкм, а расчеты проводились для шести длин волн, типичных для лидаров: 0.355, 0.532, 1.064, 1.55, 2 и 2.15 мкм. Решение представлено в виде банка данных матриц Мюллера обратного рассеяния.

Ключевые слова: рассеяние света, лидар, физическая оптика, атмосферные ледяные кристаллы, перистые облака.

Abstract. Cirrus clouds have been the subject of active study in recent decades. However, their influence on solar radiation transfer in the Earth's atmosphere and, consequently, on the planet's climate, has not been sufficiently explored. Space lidars, such as the CALIPSO and EarthCARE, are the primary tools used to study cirrus clouds through active remote sensing. However, interpreting lidar data poses a challenging problem in atmospheric optics. The main obstacle in interpreting lidar data is the lack of a complete solution to the direct problem of light scattering on ice crystal particles of cirrus clouds.

This report presents a solution to the problem of light scattering for ice crystal particles commonly found in cirrus clouds, including hexagonal plates and columns, droxtals, and particles of arbitrary shape. The particle sizes ranged from 10 to 1000 μm , and the calculations were performed for six wavelengths 0.355, 0.532, 1.064, 1.55, 2 and 2.15 μm . The solution is presented as a databank of backscattering Mueller matrices.

Keywords: light scattering, lidar, physical optics, atmospheric ice crystals, cirrus clouds.

ВВЕДЕНИЕ

Атмосферные кристаллические частицы являются естественным препятствием, как для солнечного света, так и для различных видов излучения технических устройств с поверхности Земли и спутников, находящихся на околоземной орбите. Кроме того, Межправительственная группа экспертов по изменению климата ООН и Всемирная метеорологическая организация рассматривает атмосферный аэрозоль, в том числе и кристаллические частицы перистых облаков, как наибольший фактор неопределенности в оценках радиационного баланса Земли. Поэтому изучение оптических и микрофизических характеристик различных частиц в атмосфере является одной из приоритетных задач в области климатологии, прогнозирования погоды и изучения атмосферы.

Кристаллические (или перистые) облака образуются на высотах от 5 до 14 км, в зависимости от широты, при температурах приблизительно от -10 до -50°C . Они состоят из частиц льда преимущественно в виде гексагональных призм размерами от 10 до 1000 мкм. Эти облака тоньше по сравнению с облаками нижних слоев атмосферы, однако, они составляют примерно одну треть всех облаков,

покрывающих земную поверхность, а их протяженность может достигать тысячи километров. Состояние атмосферы сильно зависит от солнечного излучения, проходящего через частицы этих облаков. В зависимости от формы и отражающих свойств, они могут, как отражать падающий на них солнечный свет, не давая нагреваться нижним слоям атмосферы, так и возвращать излучение, переотраженное с поверхности Земли, усиливая парниковый эффект.

Наблюдение за состоянием атмосферы и подстилающей поверхности Земли с помощью приборов активного дистанционного зондирования (таких как лидары и радары), установленных на космических аппаратах, позволяют оперативно и в глобальном масштабе проводить исследования климатообразующих факторов и их взаимосвязи внутри климатической системы в целом [Sassen и др., 2008].

В настоящее время исследование атмосферы поляризационными лидарами космического базирования имеет уже долгую историю. Несмотря на то, что первый космический лидарный эксперимент был проведен NASA на Space Shuttle «Discovery» (программа Lidar In Space Technology Experiment (LITE)) в сентябре 1994 г. [Winker и др., 1996], первый полноценный космический лидар «БАЛКАН»

был запущен Россией и установлен на орбитальной станции «МИР» в мае 1995 г. [Балин и др., 2011]. Он проработал 4 года и позволил набрать большой опыт и получить уникальные данные, которые хорошо были восприняты научным сообществом. Благодаря этим данным в 2006 г. был запущен хорошо известный лидар CALIOP, установленный на спутнике CALIPSO, который функционирует по настоящее время и является основным инструментом сбора информации о состоянии атмосферы Земли [Winker и др., 2002].

Своевременное создание оптической модели перистых облаков позволит вовремя сформулировать необходимые предложения по техническим характеристикам космического лидара и внести соответствующие изменения в конструкцию лидара для его максимально эффективного использования.

МЕТОДЫ

Однако для разработки оптической модели необходимо построение базы данных матриц обратного рассеяния света, созданной как с учетом технических характеристик конкретного космического лидара (угла поля зрения, используемых длин волн, каналов поляризации и т.д.), так и с учетом многообразия микрофизических характеристик перистых облаков — размеров и форм кристаллов, их пространственной ориентации и концентрации, показателя преломления и т.д. Разработка такого банка данных ведется в ИОА СО РАН уже на протяжении многих лет [Shishko и др., 2019]. Банк данных представляет собой матрицы обратного рассеяния света для длин волн 0.355, 0.532, 1.064, 1.55, 2, 2.15 мкм и показателей преломления льда 1.3249; 1.3116; 1.3004 – 1.90*10⁻⁶i; 1.2893 – 4.24*10⁻⁴i; 1.2744 – 1.64*10⁻³i; 1.2663 – 4.92*10⁻⁴i, соответственно. Решение получено для различных форм хаотически ориентированных ледяных частиц: гексагональная пластинка, дроксталл, гексагональный столбик, bullet (гексагональная пуля), произвольная форма. Размер частиц варьировался в диапазоне от 5 до 1000 мкм.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В качестве примера, на основе банка данных, были построены измеряемые лидаром оптические характеристики для типичных длин волн (0.355; 0.532; 1.064 мкм), а именно: спектральное, деполаризационное и лидарное отношения.

На рис. 1 представлена диаграмма рассеяния для спектрального (длины волн 1.064/0.532) и деполаризационного отношений (0.532 мкм) для различных форм ледяных частиц. Из рис. 1 видно, что такой подход позволяет отличать частицы гексагональной формы от частиц произвольной формы и дроксталлов.

На рис. 2 представлена диаграмма рассеяния для лидарного и деполаризационного отношений

(длина волны 0.355 мкм). Рис. 2 также демонстрирует возможность восстанавливать форму частиц.

На рис. 3 представлена зависимость спектрального отношения от максимального размера частицы D_{max} для длин волн: без поглощения (1.064/0.532) и с поглощением (2.15/1.064 и 1.55/1.064). Видно, что длины волн с поглощением демонстрируют более сильную зависимость от размера частицы, что позволяет их использовать для восстановления размера частиц.

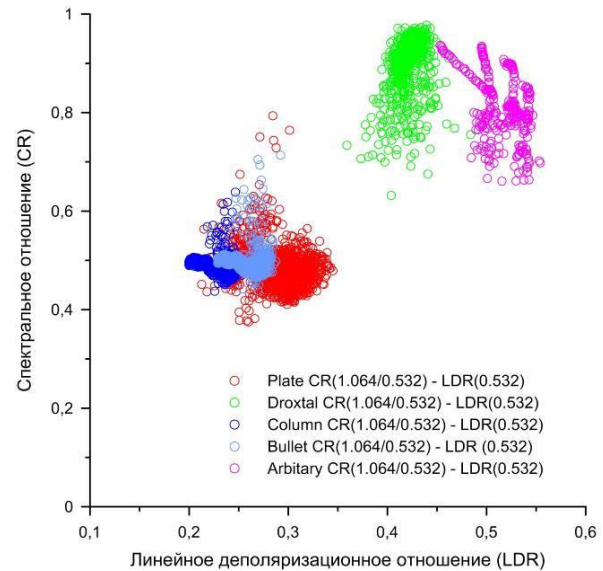


Рис. 1. Диаграмма рассеяния для спектрального и деполаризационного отношений. Символами отмечены различные формы ледяных частиц: гексагональная пластинка, дроксталл, гексагональный столбик, bullet (гексагональная пуля), произвольная форма

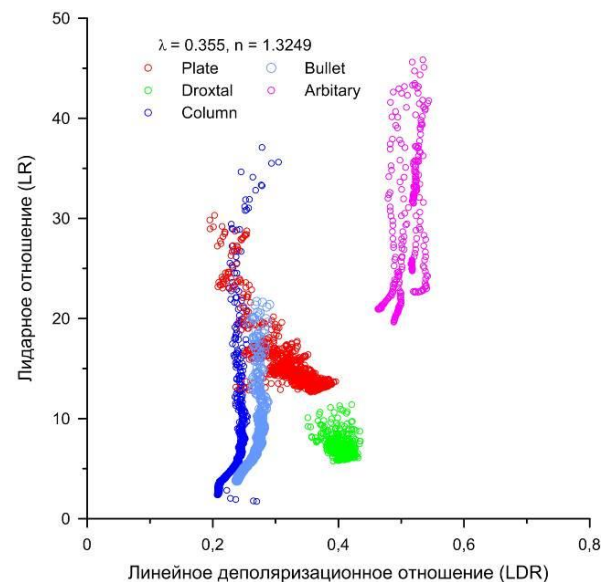


Рис. 2. Диаграмма рассеяния для лидарного и деполаризационного отношений. Символами отмечены различные формы ледяных частиц: гексагональная пластинка, дроксталл, гексагональный столбик, bullet (гексагональная пуля), произвольная форма.

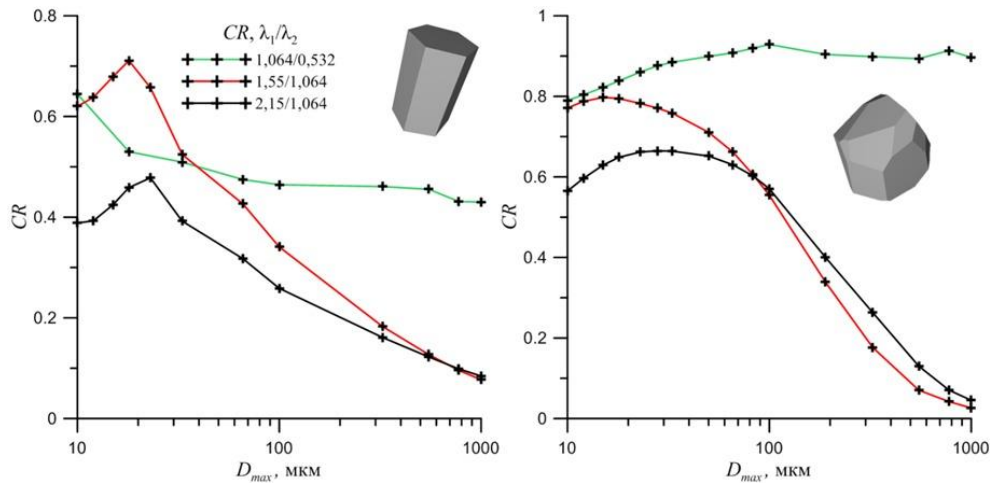


Рис. 3. Зависимость спектрального отношения от максимального размера частицы D_{max} в направлении обратного рассеяния для гексагонального столбика (слева) и частицы произвольной формы (справа)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показано, что для эффективного исследования перистых облаков методом лазерного поляризационного зондирования необходимо иметь минимум две длины волны (например, 0,532 и 1,064 мкм), возможность построения спектрального отношения для этой пары длин волн, а также возможность измерять лидарное и деполаризационное отношения на любой из длин волн. Показана перспективность использования длины волны с сильным поглощением льда (например, 1,55 или 2,15 мкм), для восстановления среднего размера частиц в облаке.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ №. 23-77-01084, <https://rscf.ru/project/23-77-01084/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Балин Ю.С., Тихомиров А.А. История создания и работы в составе орбитальной станции «Мир» первого российского космического лидара БАЛКАН // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24, № 12. С. 1078–1087.
- Sassen K., Wang Z., Liu D. Global distribution of cirrus clouds from CloudSat/Cloud-Aerosol lidar and infrared Pathfinder satellite observations (CALIPSO) measurements // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. (D00A12).
- Shishko V., Konoshonkin A., Kustova N. et al. Coherent and incoherent backscattering by a single large particle of irregular shape // Opt. Express. 2019. V. 27. P. 32984–32993.
- Winker D.M., Couch R.H., McCormick M.P. An overview of LITE: NASA's Lidar-in-space Technology Experiment // Proc. IEEE. 1996. V. 84. P. 164–180.
- Winker D.M., Pelon J., McCormick M.P. The CALIPSO mission: Spaceborne lidar for observation of aerosols and clouds // Proc. SPIE. 2002. V. 4893.

СОДЕРЖАНИЕ

Лекции

Благовещенская Н.Ф. Нелинейные явления в F-области ионосферы при воздействии мощными радиоволнами КВ-диапазона необыкновенной поляризации	3
Yongqiang Yao, Xuan Qian. Monitoring techniques and methods of atmospheric characteristics at High altitude observatories above the tibetan plateau	4
Секция А. Астрофизика и физика Солнца	
Абунина М.А., Шлык Н.С., Белов С.М., Белов А.В., Абунин А.А. О наиболее интересных событиях в солнечном ветре и космических лучах в 2023–2024 гг.	5–7
Автаева А.А., Шематович В.И. Кинетическое моделирование нетепловых атмосферных потерь для экзопланеты π Men с под действием родительской звезды	8–10
Агапова Д.В., Завершинский Д.И., Молевич Н.Е., Белов С.А. Влияние теплопроводности и теплового дисбаланса на динамику медленных магнитоакустических волн в магнитноструктурированной плазме	11–13
Белов С.М., Белов А.В., Шлык Н.С., Абунина М.А. База данных межпланетных возмущений и Форбуш-эффектов	14–16
Димитриева П.О., Гринин В.П. Количественный анализ спектров звезд типа UX Ori звезда UX Ori и CQ Tau	17–19
Дуканов И.А., Юшков Е.В., Соколов Д.Д. Исследование эволюции энергетического спектра флуктуаций солнечного ветра в рамках оболочечной МГД-модели	20–21
Егоров Я.И., Файнштейн В.Г. Исследование колебаний скорости КВМ и связанной с ним ударной волны	22–24
Ерофеева В.А., Малахов С.Д. от коллаборации TAIGA. Влияние атмосферных эффектов на вариации плотности потока частиц широких атмосферных ливней по экспериментальным данным установки Tunka-Grande	25–26
Жмуркина А.Д., Кашапова Л.К. Исследование параметров ускоренных электронов – источников радиовсплесков III типа во время мощной солнечной вспышки	27–28
Завершинский Д.И., Фролова А.С., Агапова Д.В. Исследование эволюции слабого возмущения индуцированного на границе горячей корональной петли в сильном магнитном поле	29–30
Исаева Е.С., Язев С.А. Майский вспышечный эксцесс 2024 г.	31–33
Каракотов Р.Р., Кузнецов А.А., Анфиногентов С.А. Анализ солнечной вспышки класса M3.0 по данным микроволнового и ультрафиолетового излучения	34–36
Карачик Н.В., Миненко Е.П. Изучение структур хромосферной сетки по данным С китайской космической обсерватории ASO-S: предварительные результаты	37–38
Киричков П.Н., Демидов М.Л. Прогнозирование космической погоды и солнечного ветра на основе синоптических карт разных обсерваторий	39–40
Кобелев П.Г., Хамраев Ю.Б., Янке В.Г. Экспериментальная оценка барометрического эффекта нейтронной компоненты космических лучей по данным детекторов Ташкент и Алма-Ата	41–43
Ковалев И.И., Кравцова М.В., Олемской С.В., Сдобнов В.Е. Сравнительный анализ двух слабых GLE в мае и августе 1998 г. методом спектрографической глобальной съемки	44–47
Крестьянских М.Г., Первалова И.А. Выделение сигнала и реконструкция околоректорных мюонных треков по данным одной гирлянды установки Baikal-GVD	48–50
Кузьмицкий А.В., Кочанов А.А. Кривая поглощения и угловое распределение атмосферных мюонов высоких энергий в водной среде: новый расчет	51–53
Кузьмицкий А.В., Кочанов А.А. Эволюция спектра протонов в солнечной вспышке: случай тонкой и толстой мишени	54–56
Леденцов Л.С. Метод оценки пространственного периода энерговыделения в солнечных вспышках	57–59
Маурчев Е.А., Диденко К.А., Шлык Н.С., Абунина М.А., Абунин А.А., Белов А.В. Исследование влияния протонов солнечных космических лучей на скорость ионизации атмосферы Земли	60–62
Коренблит С.Э., Аман Э.Г., Москаленко А.Д. К термодинамике темной энергии	63–65
Мотык И.Д., Кашапова Л.К. Наблюдение фазы спада белой вспышки в микроволновом диапазоне	66–68

Нечаева А.Б., Зимовец И.В., Шарыкин И.Н., Анфиногентов С.А. Незатухающие колебания солнечных корональных петель как возможные предвестники вспышек	69–70
Полухина С.А., Кашапова Л.К. Лимбовая вспышка с прерванной эрупцией	71–73
Рожкова Д.В., Кашапова Л.К. Создание каталога солнечных вспышек по наблюдениям Сибирского Радиогелиографа: первые результаты	74–76
Рубцов А.В., Анфиногентов С.А. Структура коронального выброса массы в межпланетном пространстве: анализ данных IMAGE/EUV	77–79
Рящиков Д.С., Скопцова Е.В., Завершинский Д.И., Букатина А.С. Конструирование функции нагрева солнечной короны для проведения численного МГД моделирования в гравитационно стратифицированной атмосфере	80–82
Смирнов Д.А., Мельников В.Ф. Исследование солнечных вспышек методами микроволновой диагностики	83–85
Рябова Н.В., Елсуков А.А., Станкевич С.С. Влияние параметров канальных моделей на характеристики ФКМ сигнала для ионосферных КВ радиолоний	86–89
Стрекалова П.В., Смирнова В.В., Наговицын Ю.А. Исследование структуры и параметров факельных образований на Солнце	90–92
Феденёв В.В., Анфиногентов С.А., Лесовой С.В., Глоба М.В. Восстановление магнитоплазменной структуры солнечных активных областей с помощью программного пакета ruAMPP	93–95
Шамсутдинова Ю.Н., Кашапова Л.К. Применение машинного обучения для распознавания солнечных вспышек в микроволновом диапазоне	96–98
Шлык Н.С., Белов А.В., Абунина М.А., Абунин А.А. Вспышки, выбросы и прогноз протонных возрастных	99–101

Секция В. Физика атмосферы Земли, включая околоземное космическое пространство

Сравнение вкладов различных высотных интервалов в отклике регионального электронного содержания в высоких широтах на геомагнитные бури в весенний сезон Белюченко К.В., Клименко М.В., Ратовский К.Г., Клименко В.В.	102–104
Бикбулатов Б.А., Диденко К.А., Ермакова Т.С. Изменчивость высоты арктической тропопаузы под воздействием внезапных стратосферных потеплений	105–107
Вазаева Н.В., Чхетиани О.Г., Голицын Г.С., Кулижникова Л.К., Мацкевич М.К. Статистические характеристики шквалов, проходящих через высотную метеорологическую мачту в г. Обнинск в 2014–2023 гг.	108–110
Варзарь Л.С., Падохин А.М. Использование программно определяемого радио для мониторинга внезапных ионосферных возмущений	111–113
Вершинин И.М., Зудин И.Ю., Гушин М.Е., Микрюков П.А., Шлюгаев Ю.В., Истомин А.А. Лабораторное моделирование импульсного электромагнитного излучения молниевых разрядов	114–116
Волкова А.В., Слюняев Н.Н., Сарафанов Ф.Г. Влияние супер-Эль-Ниньо на глобальную электрическую цепь	117–119
Воронова Е.А., Ратовский К.Г. Суточные вариации характеристик спорадического слоя Es над Иркутском	120–122
Громик Н.А., Ивонин В.А., Лебедев В.П. Разработка информационной системы комплексного анализа геофизических данных, полученных на радиофизических средствах ИСЗФ СО РАН	123–126
Данилов С.И., Степанов А.Е., Гололобов А.Ю. Поляризонный джет по измерениям спутниковой системы навигации GPS	127–129
Диденко К.А., Ермакова Т.С., Коваль А.В., Савенкова Е.Н. Анализ межгодовых вариаций стратосферно-тропосферного динамического взаимодействия в Северном полушарии	130–132
Долгачева С.А., Калишин А.С., Борисова Т.Д. Возможность организации каналов связи через спорадический Es слой	133–135
Долинин А.А., Сарафанов Ф.Г., Шлюгаев Ю.В. Измерение магнитного поля шумановского диапазона длин волн	136–138
Дрига М.Б., Шиховцев А.Ю., Ковадло П.Г. Метод локализации изображения солнечного пятна в фокальной плоскости датчика Шака-Гартмана с использованием нормализации изображения	139–140
Емельянов В.В., Когогин Д.А., Максимов Д.С., Насыров И.А., Белецкий А.Б.,	141–143

Шиндин А.В., Грач С.М., Загретдинов Р.В. Диагностика возмущенной области ионосферы по данным оптических измерений и ГНСС радиозондирования	
Загорский Г.А., Калишин А.С., Благовещенская Н.Ф., Борисова Т.Д., Егоров И.М. Особенности влияния провала ионизации на распространение радиоволн	144–147
Ивонин В.А., Лебедев В.П. Анализ вариаций мощности радиолокационного сигнала от спутников группировки «Starlink» по данным Иркутского радара некогерентного рассеяния	148–150
Кан Н.В., Шишко В.А., Кустова Н.В., Коношонкин А.В. Исследование формирования гало 46° при изменении размера атмосферных ледяных гексагональных частиц в рамках метода физической оптики	151–153
Капустин В.Э., Лунюшкин С.Б., Караваев Ю.А., Пенских Ю.В., Мишин В.В. Динамика продольных токов зоны I ииджимы-потермы в период стационарной магнитосферной конвекции по данным техники инверсии магнитограмм	154–156
Климанова А.А., Тимченко А.В., Клименко М.В. Ионограммы с нетипичными следами, полученные в обсерватории калининградского филиала ИЗМИРАН в 2023 году	157–159
Костарев Д.В., Пилипенко В.А., Козырева О.В. Влияние космической погоды на трубопроводы в высоких широтах	160–162
Курдяева Ю.А., Бессараб Ф.С., Борчевкина О.П., Клименко М.В. Исследование влияния атмосферных волн, генерируемых тропосферными источниками, на вариации параметров верхней атмосферы и ионосферы	163–165
Леоненко М.В., Григоренко Е.Е., Зелёный Л.М. Сверхтонкие токовые слои в хвосте магнитосферы земли и диссипация энергии в них на фазе накопления суббури по данным миссии MMS	166–168
Макеев А.П., Невзоров А.В., Долгий С.И. Лидарные наблюдения стратосферного аэрозоля и озона над Томском	169–171
Максимов Д.С., Когогин Д.А., Насыров И.А., Загретдинов Р.В. Исследование отклика среднеширотной ионосферы на солнечные вспышки 25-го цикла активности по данным измерения вариаций ПЭС и мощности ГНСС сигналов	172–174
Манина А.С., Калегаев В.В., Николаева В.Д., Сараев Р.Е., Иванова А.Р., Власова Н.А. Динамика высокоширотной магнитосферы земли в период геомагнитной активности 24.02.2023 - 02.03.2023	175–176
Михайлова О.С., Магер П.Н. Экспериментальное доказательство существования экваториального резонатора для волн диапазона Pc1 в магнитосфере	177–179
Николенко А.С., Гуцин М.Е., Коробков С.В., Зудин И.Ю., Стриковский А.В. Лабораторное моделирование околоземных и астрофизических плазменных струй на крупномасштабном плазменном стенде «Крот»	180–182
Осипов К.А., Ишин А.Б. Метод регистрации локальных возмущений электронной концентрации ионосферы, вызванных движением МКС, по данным полного электронного содержания	183–185
Павлов И.А., Падохин А.М. Восстановление региональных распределений TEC по данным GNSS с использованием модели NeQuick2 и универсального кригинга	186–188
Перебоева А.А., Сыренова Т.Е., Чертова В.Р., Васильев Р.В. Анализ волновых возмущений в интенсивности 557.7нм, регистрируемых с помощью камер всего неба НГК ИСЗФ СО РАН	189–191
Петрашук А.В., Климушкин Д.Ю., Магер П.Н. Баллонная неустойчивость и условия для её развития в магнитосфере Земли	192–193
Подлесный С.В., Михалев А.В. Фотометрия ночной атмосферы Земли на основе цветного ПЗС приемника	194–195
Позднякова Д.Д. Проявление ионосферного альвеновского резонатора в наземных и спутниковых наблюдениях	196–198
Распопов К.Р., Едемский И.К. Долгопериодные вариации индексов космической погоды	199–200
Рябов А.О. Сводные итоги по программе СУРА-SWARM, проведённой в 2016–2022 годах	201–203
Саункин А.В., Зоркальцева О.С., Васильев Р.В., Гаврильева Г.А. Исследование влияния внезапных стратосферных потеплений на вариации эмиссионного слоя 557.7 нм над обсерваториями Маймага и Торы	204–208
Серебренникова С.А., Иванова В.А., Подлесный А.В., Цедрик М.В., Поддельский А.И. Применение новой программы-обработчика ионограмм «IonoView» для исследования гелиогеофизических событий	209–211

Синеви́ч А.А., Чернышов А.А., Чугуни́н Д.В., Клименко М.В., Панченко В.А., Якимова Г.А., Могилевский М.М. Комплексный подход к исследованию поляриза- ционного джета	212–213
Смотрова Е.Е., Михайлова О.С., Магер П.Н., Климушкин Д.Ю. Генерация геомагнитных пульсаций Pc4-5 потоками энергичных частиц в дневной магнитосфере	214–216
Соколов А.В., Коваль А.В., Савенкова Е.Н. Оценка связи динамического режима мезосферы со стратосферной циркуляцией по данным PE-анализа и СВЧ-радиометрии	217–219
Стуков Д.А., Ягова Н.В. Временные масштабы когерентности пульсаций магнитного поля диапазона 1-5 мГц в геомагнитном хвосте и ночном магнитослое	220–222
Тимофеев Д.Н., Шишко В.А., Кустова Н.В. Исследование атмосферных ледяных частиц сложной формы в рамках приближения физической оптики	223–225
Борчевкина О.П., Бессараб Ф.С., Тимченко А.В., Карпов И.В. Волновая активность ВГВ в нижней термосфере в период метеорологического шторма по данным наблюдений SABER/TIMED	226–228
Ткачев И.В., Коношонкин А.В., Шишко В.А., Тимофеев Д.Н., Кустова Н.В. Рассеяние света атмосферными многогранными кристаллами	229–231
Тыщук О.В., Колтовской И.И., Николашкин С.В. Регистрация двух событий мезосферного бора в свечении ночного неба над Якутией	232–234
Шелков А.Д., Артамонов М.Ф. Фотометрическая калибровка интерферометров Фабри- Перо НГК РАН по звездам	235–236
Шелков А.Д., Васильев Р.В., Артамонов М.Ф., Ратовский К.Г. Сопоставление ночных вариаций параметров нейтральной компоненты и концентрации электронов в верхней атмосфере	237
Шубин Д.А., Рубцов А.В., Магер П.Н., Климушкин Д.Ю. Выполнимость условия вмороженности в магнитосферных возмущениях: анализ данных THEMIS-A	238–240
Сюань Цянь, Юнцян Яо, Хуншун Ван. Исследование оптической атмосферной турбулентности	241–245
Секция С. Диагностика естественных неоднородных сред и математическое моделирование	
Анютин Н.Д. Возбуждение резонансов плазмонов в InGaAs пластине плоской электромагнитной волной	246–248
Буряк Н.В., Носиков И.А., Клименко М.В. Современные методы оптимизации траекторий в неоднородных средах	249–250
Гусева В.Е., Нечай А.Н., Перекалов А.А., Чхало Н.И. Исследование радиального распределения источников ЭУФ излучения в лазерной плазме с помощью преобразования Абеля	251–252
Данильчук Е.И., Демьянов В.В. Тестирование процедур удаления тренда измерений фазы несущей и расчета индексов ионосферных мерцаний	253–255
Едемский И.К., Тащилин А.В. Исследование влияния описания нейтральной атмосферы на результаты моделирования эффектов магнитной бури февраля 2022 г.	256–258
Ермаков В.Ю., Лебедев В.П. Исследование направленных свойств КВ-антенн по измерениям в ближней зоне, полученным с привлечением БПЛА	259–261
Зверев М.А., Книжин С.И., Тинин М.В. Методы пространственной обработки поля в задачах диагностики ионосферы	262–264
Кислицын А.А., Рябова Н.В., Кислицына М.А., Конкин Н.А. Интеллектуальная система диагностики с режимом прогнозирования параметров широкополосных радиоканалов по данным пассивных радиосенсоров	265–267
Кислицына М.А., Кислицын А.А. Сенсорная диагностика предельной полосы частот трансионосферного канала в условиях воздействия дестабилизирующих факторов ионосферы	268–270
Колпак В.И., Могилевский М.М., Чугуни́н Д.В., Чернышов А.А., Моисеенко И.Л., Рязанцева М.О. О возможности использования аврорального километрового радиоизлучения для определения некоторых характеристик солнечного ветра	271–273
Копылов Е.А., Большасова Л.А., Шиховцев А.Ю., Потанин С.А., Сачков А.М. Астроклимат обсерватории Пик Терскол	274–276
Гейнц Ю.Э., Минина О.В. Структурированная филаментация мощных фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе. Численное моделирование	277–279

Бобровников С.М., Горлов Е.В., Жарков В.И., Мурашко С.Н. Определение значений энергетических и временных параметров лазерного излучения для эффективного возбуждения молекул оксида фосфора	280–281
Нгуен Х.Х.З., Полетаев А.С. Использование методов детрендринга для обнаружения эффектов солнечных вспышек в вариациях амплитуды СДВ радиосигналов	282–285
Носиков И.А., Клименко М.В., Падохин А.М., Крашенинников И.В., Бессараб П.Ф. Моделирование ионограмм наклонного зондирования методом обобщенной силы в трехмерной анизотропной ионосфере	286–288
Носикова В.В., Пестов Л.Н. Визуализация отраженных и рассеянных волн по методу граничного управления, численный эксперимент	289–290
Овчинников В.В., Иванов Д.В., Иванов В.А., Рябова М.И. Сенсорная диагностика широкополосных ионосферных каналов с полосой до 1 МГц для повышения скрытности систем передачи информации с ППРЧ за счёт адаптивного эквалайзирования внутримодовой дисперсии	291–293
Смирнова Е.С., Доброхотов С.Ю. Моделирование вертикального распространения акустического возмущения атмосферы, инициированного импульсом на нижней границе	294–296
Шиховцев А.Ю., Ковадло П.Г., Киселев А.В., Леженин А.А. Методы оценки атмосферных характеристик в приложении к наземным астрономическим телескопам	297–299
Шишко В.А., Тимофеев Д.Н., Кустова Н.В., Русскова Т.В., Коношонкин А.В. Оптические модели ледяных кристаллов перистой облачности для задач активного дистанционного зондирования атмосферы	300–302

CONTENTS

Lectures

Blagoveshchenskaya N.F. Non-linear phenomena in the ionospheric F-region induced by extraordinary polarized powerful HF radio waves	3
Yongqiang Yao, Xuan Qian. Monitoring techniques and methods of atmospheric characteristics at High altitude observatories above the tibetan plateau	4
Section A. Astrophysics and Solar Physics	
Abunina M.A., Shlyk N.S., Belov S.M., Belov A.V., Abunin A.A. On the most interesting events in the solar wind and cosmic rays in 2023-2024	5–7
Avtaeva A.A., Shematovich V.I. Kinetic modeling of non-thermal atmospheric losses for exoplanet π Men c forced by the host star	8–10
Agapova D.V., Zavershinskii D.I., Molevich N.E., Belov S.A. Effect of thermal conductivity and thermal misbalance on the dynamics of slow magnetoacoustic waves in a magnetically structured plasma	11–13
Belov S.M., Belov A.V., Shlyk N.S., Abunina M.A. Database of interplanetary disturbances and Forbush effects	14–16
Dimitrieva P.O., Grinin V.P. Quantitative analysis of spectra of UX Ori stars. Star UX Ori AND CQ Tau	17–19
Dukanov I.A., Yushkov E.V., Sokoloff D.D. Studying evolution of the energy spectrum of solar wind fluctuations within the framework of the shell MHD-model	20–21
Egorov Ya.I., Fainshtein V.G. Velocity oscillations of CME and related shock	22–24
Erofeeva V.A., Malakhov S.D., collaboration TAIGA. Influence of atmospheric effects on variations in the particle flux density of extensive atmospheric showers according to experimental data from the Tunka-Grande array	25–26
Zhmurkina A.D., Kashapova L.K. Investigating parameters of accelerated electrons – sources of type III radio bursts during a powerful solar flare	27–28
Zavershinskii D.I., Frolova A.S., Agapova D.V. Studying evolution of a weak perturbation induced at the boundary of a hot coronal loop in a strong magnetic field	29–30
Isaeva E.S., Yazev S.A. The flare excess of may 2024	31–33
Karakotov R.R., Kuznetsov A.A., Anfinogentov S.A. Investigation of M3.0 class solar flare in the microwave and ultraviolet emission	34–36

Karachik N.V., Minenko E.P. Investigation of the chromospheric network structures using data from the chinese space observatory ASO-S: preliminary results	37–38
Kirichkov P.N., Demidov M.L. Forecasting space weather and solar wind based on synoptical maps of differ-ent observatories	39–40
Kobelev P.G., Hamraev Y.B., Yanke V.G. Experimental evaluation of barometric effect of the neutron component of cosmic rays according to the Tashkent and Alma-Ata detectors	41–43
Kovalev I.I., Kravtsova M.V., Olemskoy S.V., Sdobnov V.E. Comparative analysis of two weak GLEs in may and august 1998 by spectrographic global survey method	44–47
Krestyanskikh M.G., Perevalova I.A. Hit selection and reconstruction of near-vertical muon tracks based on data from one string of the Baikal-GVD	48–50
Kuzmitskiy A.V., Kochanov A.A. Depth intensity relation and angular distribution of the high-energy atmospheric muons in water medium: new calculation	51–53
Kuzmitskiy A.V., Kochanov A.A. Proton spectrum evolution in solar flare: thin and thick target regimes	54–56
Ledentsov L.S. A method for estimating the spatial period of energy release in solar flares	57–59
Maurchev E.A., Didenko K.A., Shlyk N.S., Abunina M.A., Abunin A.A., Belov A.V. Investigation of the solar cosmic ray protons impact on the Earth's atmosphere ionization rate	60–62
Korenblit S.E., Aman E.G., Moskalenko A.D. On thermodynamics of dark energy	63–65
Motyk I.D., Kashapova L.K. Observation of white-light flare decay phase in microwave range	66–68
Nechaeva A.B., Zimovets I.V., Sharykin I.N., Anfinogentov S.A. Decayless oscillations of solar coronal loops as possible precursors of flares	69–70
Polukhina S.A., Kashapova L.K. Limb flare with failed eruption	71–73
Rozhkova D.V., Kashapova L.K. Creating catalog of solar flares observed by the Siberian Radioheliograph: first results	74–76
Rubtsov A.V., Anfinogentov S.A. Spatial structure of the interplanetary coronal mass ejection: IMAGE/EUV data analysis	77–79
Riashchikov D.S., Scoptsova E.V., Zavershinskii D.I., Bukatina A.S. Construction of the solar coronal heating function for numerical MHD modeling in a gravitationally stratified atmosphere	80–82
Smirnov D.A., Melnikov V.F. Studying solar flares by microwave diagnostics methods	83–85
Ryabova N.V., Elsukov A.A., Stankevich S.S. Influence of channel model parameters on the characteristics of the PCM signal for ionospheric HF radio links	86–89
Strekalova P.V., Smirnova V.V., Nagovitsyn Yu.A. Study of the structure and parameters of facular formations on the Sun	90–92
Fedenev V.V., Anfinogentov S.A., Lesovoi S.V., Globa M.V. Reconstruction of the magnetothermal structure of solar active regions using the pyAMPP software package	93–95
Shamsutdinova Yu.N., Kashapova L.K. The recognition of solar flares in microwave range using machine learning	96–98
Shlyk N.S., Belov A.V., Abunina M.A., Abunin A.A. X-ray flares, cmes and proton event forecasting	99–101
Section B. Physics of the Earth's Atmosphere Including Near-Earth Space	
Belyuchenko K.V., Klimenko M.V., Ratovsky K.G., Klimenko V.V. Comparison between contributions of different altitude intervals to the response of regional electron content at high latitude to geomagnetic storms in spring	102–104
Bikbulatov B.A., Didenko K.A., Ermakova T.S. Variability of arctic tropopause height affected by sudden stratospheric warming	105–107
Vazaeva N.V., Chkhetiani O.G., Golitsyn G.S., Kulizhnikova L.K., Matskevich M.K. Statistical characteristics of squalls passing through the Obninsk's high-altitude instrumental tower in 2014–2023	108–110
Varzar L.S., Padokhin A.M. Application of software-defined radio for monitoring of sudden ionospheric disturbances	111–113
Vershinin I.M., Zudin I.Yu., Gushchin M.E., Mikryukov P.A., Shlyugaev Yu.V., Istomin A.A. Laboratory modeling of pulsed electromagnetic radiation of lightning discharges	114–116
Volkova A.V., Slyunyaev N.N., Sarafanov F.G. The impact of super El Nino on the global electrical circuit	117–119
Voronova E.A., Ratovsky K.G. Diurnal variations in Es sporadic layer characteristics over Irkutsk	120–122

Gromik N.A., Ivonin V.A., Lebedev V.P. Development of an information system for complex analysis of geophysical data obtained at ISTP SB RAS radio instruments	123–126
Danilov S.I., Stepanov A.E., Gololobov A.Yu. Polarization jets from GPS satellite navigation system measurements	127–129
Didenko K.A., Ermakova T.S., Koval A.V., Savenkova E.N. Analysis of interannual variations of stratosphere–troposphere dynamic coupling in the Northern Hemisphere	130–132
Dolgacheva S.A., Kalishin A.S., Borisova T.D. The possibility of organizing communication channels through a sporadic Es layer	133–135
Dolinin A.A., Sarafanov F.G., Shlyugaev Yu.V. Measurement of the magnetic field of the schumann wavelength range	136–138
Driga M.B., Shikhovtsev A.Yu., Kovadlo P.G. Method of sunspot image localization in the focal plane of the Shack-Gartmann sensor using image normalization	139–140
Emelyanov V.V., Kogogin D.A., Maksimov D.S., Nasyrov I.A., Beletsky A.B., Shindin A.V., Grach S.M., Zagretidinov R.V. Diagnostics of a disturbed region of the ionosphere based on optical measurements and GNSS radio sounding	141–143
Zagorskiy G.A., Kalishin A.S., Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Egorov I.M. Features of the ionospheric trough's influence on radio wave propagation	144–147
Ivonin V.A., Lebedev V.P. Analysis of variations in radar signal power from Starlink satellites, according to Irkutsk incoherent scatter radar data	148–150
Kan N.V., Shishko V.A., Kustova N.V., Konoshonkin A.V. Study of formation of a 46° halo when changing size of atmospheric ice hexagonal particles within the framework of physical optics method	151–153
Kapustin V.E., Lunyushkin S.B., Karavaev Y.A., Penskiikh Y.V., Mishin V.V. Dynamics of field-aligned currents in region 1 of Iijima-poterna during the period of stationary magnetospheric convection according to the magnetogram inversion technique	154–156
Klimanova A.A., Timchenko A.V., Klimenko M.V. Ionograms with unique traces obtained at the observatory of wd IZMIRAN in 2023	157–159
Kostarev D.V., Pilipenko V.A., Kozyreva O.V. Impact of space weather on pipelines in high-latitude regions	160–162
Kurdyayeva Yu.A., Bessarab F.S., Borchevskina O.P., Klimenko M.V. Study of the influence of atmospheric waves generated by tropospheric sources on variations of the upper atmosphere and ionospheric parameters	163–165
Leonenko M.V., Grigorenko E.E., Zelenyi L.M. Superthin current sheets in the earth's magnetotail and associated energy dissipation during the growth phase of substorm observed by MMS spacecraft	166–168
Makeev A.P., Nevzorov A.V., Dolgiy S.I. Lidar observations of stratospheric aerosol and ozone over Tomsk	169–171
Maksimov D.S., Kogogin D.A., Nasyrov I.A., Zagretidinov R.V. Investigating the response of the mid-latitude ionosphere to solar flares of the 25th solar cycle, using TEC variation measurements and GNSS signal strength	172–174
Manina A.S., Kalegaev V.V., Nikolaeva V.D., Sarajev R.E., Ivanova A.R., Vlasova N.A. Dynamics of the earth's high-latitude magnetosphere during the period of geomagnetic activity 02/24/2023 - 03/22/2023	175–176
Mikhailova O.S., Mager P.N. Experimental proof of the existence of an equatorial resonator for Rc1 waves in the magnetosphere	177–179
Nikolenko A.S., Gushchin M.E., Korobkov S.V., Zudin I.Yu., Strikovskiy A.V. Laboratory modeling of near-earth and astrophysical plasma jets on a large-scale plasma device «Krot»	180–182
Osipov K.A., Ishin A.B. A method for recording local disturbances in the ionospheric electron density caused by the movement of the ISS using total electron content data	183–185
Pavlov I.A., Padokhin A.M. Reconstruction of regional TEC distributions from GNSS data, using NeQuick2 model and universal kriging	186–188
Pereboeva A.A., Syrenova T.E., Chertkova V.R., Vasilyev R.V. Analysis of wave disturbances in 557.7nm intensity recorded using all-sky cameras of the NHC ISTP SB RAS	189–191
Petrashchuk A.V., Klimushkin D.Yu., Mager P.N. Ballooning instability and conditions for its development in the Earth's magnetosphere	192–193
Podlesnyi S.V., Mikhalev A.V. Photometry of the Earth night atmosphere based on color CCD receiver	194–195

Pozdnyakova D.D. Manifestation of the ionospheric alfvén resonator in ground-based and satellite observations	196–198
Raspopov K.R., Edemsky I.K. Long-period variations of space weather indices	199–200
Ryabov A.O. Summary results of the SURA-SWARM program conducted in 2016–2022	201–203
Saunkin A.V., Zorkaltseva O.S., Vasilyev R.V., Gavrilyeva G.A. Study of the influence of sudden stratospheric warmings on variations of the 557.7 nm emission layer over the Maimaga and Tory observatories	204–208
Serebrennikova S.A., Ivanova V.A., Podlesnyi A.V., Cedrik M.V., Poddelsky A.I. Application of the new ionogram processor “IonoView” for studying heliogeophysical events	209–211
Sinevich A.A., Chernyshov A.A., Chugunin D.V., Klimenko M.V., Panchenko V.A., Yakimova G.A., Mogilevsky M.M. A complex approach to the study of the polarization jet	212–213
Smotrova E.E., Mikhailova O.S., Mager P.N., Klimushkin D.Yu. Generation of geomagnetic pulsations Pc4-5 by energetic particles' fluxes in the dayside magnetosphere	214–216
Sokolov A.V., Koval A.V., Savenkova E.N. Estimation of the relation between the mesospheric dynamic regime and the stratospheric circulation from reanalysis and microwave radiometry data	217–219
Stukov D.A., Yagova N.V. Coherence timescales of the magnetic field pulsations in 1-5 mHz range in the magnetotail and night magnetosheath	220–222
Timofeev D.N., Shishko V.A., Kustova N.V. Investigating the atmospheric ice particles of complex shape within the physical optics approximation	223–225
Borchevkina O.P., Bessarab F.S., Timchenko A.V., Karpov I.V. Gravity waves activity in the mesosphere and lower thermosphere during a meteorological storm	226–228
Tkachev I.V., Konoshonkin A.V., Shishko V.A., Timofeev D.N., Kustova N.V. Light scattering by atmospheric polyhedral crystals	229–231
Tyshchuk O.V., Koltovskoi I.I., Nikolashkin S.V. Detection of two mesospheric bores in the nightglow over Yakutia	232–234
Shelkov A.D., Artamonov M.F. NHC RAS Fabri-Perot interferometers' photometric calibration using stars	235–236
Shelkov A.D., Vasilyev R.V., Artamonov M.F., Ratovsky K.G. Comparison between nocturnal variations of the neutral atmospheric parameters and electron densities in the upper atmosphere	237
Shubin D.A., Rubtsov A.V., Mager P.N., Klimushkin D.Yu. Implementation of the frozen-in condition in magnetospheric disturbances: analysis of THEMIS-A data	238–240
Xuan Qian, Yongqiang Yao, Hongshuang Wang. The study of atmospheric optical turbulence	241–245
Section C. Diagnostics of Natural Inhomogeneous Media and Mathematical Modeling	
Aniutin N.D. Excitation of plasmon resonances on InGaAs plate by a plane electromagnetic wave	246–248
Buryak N.V., Nosikov I.A., Klimenko M.V. Modern methods of trajectory optimization in inhomogeneous media	249–250
Guseva V.E., Nechay A.N., Perekalov A.A., Chkhalo N.I. Studying radial distribution of EUV radiation sources in laser plasma by Abele transform methods	251–252
Danilchuk E.I., Demyanov V.V. Testing carrier phase measurement detrending procedures and calculation of ionospheric scintillation indices	253–255
Edemskiy I.K., Taschilin A.V. Influence of description of the neutral atmosphere on modeling results of effects of the february 2022 magnetic storm	256–258
Ermakov V.Yu., Lebedev V.P. Study of e directional properties of HF antennas based on near-field measurements obtained using a UAV	259–261
Zverev M.A., Knizhin S.I., Tinin M.V. Methods of spatial field processing for ionospheric diagnostics problems	262–264
Kislitsin A.A., Ryabova N.V., Kislitsina M.A., Konkin N.A. Intelligent diagnostic system with a mode for predicting the parameters of broadband radio channels based on data from GNSS passive radio sensors	265–267
Kislitsina M.A., Kislitsin A.A. Sensory diagnostics of the limiting frequency band of transionospheric channel under the influence of destabilizing factors of the ionosphere	268–270
Kolpak V.I., Mogilevsky M.M., Chugunin D.V., Chernyshov A.A., Moiseenko I.L., Riazantseva M.O. On possibility of using auroral kilometric radiation to determine some characteristics of solar wind	271–273

Kopylov E.A., Bolbasova L.A., Shikhovtsev A.Yu., Potanin S.A., Sachkov A.M. Astroclimate of the Terskol Peak observatory	274–276
Geints Yu.E., Minina O.V. Structured filamentation of high-power femtosecond laser pulses in air. Numerical simulation	277–279
Bobrovnikov S.M., Gorlov E.V., Zharkov V.I., Murashko S.N. Determining the energy and time parameters of laser radiation for effective excitation of phosphorus oxide molecules	280–281
Nguyen K.H.D., Poletaev A.S. Applying detrending methods for detecting the solar flare effects in amplitude variations of VLF signals	282–285
Nosikov I.A., Klimenko M.V., Padokhin A.M., Krasheninnikov I.V., Bessarab P.F. Oblique sounding ionogram simulation by the generalized force method	286–288
Nosikova V.V., Pestov L.N. Reflected and scattered wave imaging by the boundary control method, numerical experiment	289–290
Ovchinnikov V.V., Ivanov D.V., Ivanov V.A., Ryabova M.I. Sensor diagnostics of wideband ionospheric channels of 1 MHz width to increase the covertness of frequency hopping data transmission systems by means of adaptive equalization of intramode dispersion	291–293
Smirnova E.S., Dobrokhotov S.Yu. Modeling of vertical propagation of atmospheric acoustic disturbance initiated by a pulse at the lower boundary	294–296
Shikhovtsev A.Yu., Kovadlo P.G., Kiselev A.V., Lezhenin A.A. Methods for estimating atmospheric characteristics as applied to ground-based astronomical telescopes	297–299
Shishko V.A., Timofeev D.N., Kustova N.V., Russkova T.V., Konoshonkin A.V. Optical models of ice crystals of cirrus clouds for active remote sensing of the atmosphere	300–302

ТРУДЫ
XVIII КОНФЕРЕНЦИИ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ
«ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПОЛЕЙ И ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ»

БШФФ-2024

Материалы, представленные для публикации,
печатаются в авторской редакции.

Формат 60×90 1/8. Гарнитура Times New Roman.

БШФФ-2024 — ISSN 0135-3748 — 2024 — 312 с.