УДК 551.510.533 DOI: 10.62955/0135-3748-2024-232

РЕГИСТРАЦИЯ ДВУХ СОБЫТИЙ МЕЗОСФЕРНОГО БОРА В СВЕЧЕНИИ НОЧНОГО НЕБА НАД ЯКУТИЕЙ

О.В. Тыщук, И.И. Колтовской, С.В. Николашкин

Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера
Сибирского отделения Российской академии наук, Якутск, Россия,
oleSmile@mail.ru

DETECTION OF TWO MESOSPHERIC BORES IN THE NIGHTGLOW OVER YAKUTIA

O.V. Tyshchuk, I.I. Koltovskoi, S.V. Nikolashkin

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 OH 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 OH. 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 OH на высоте ~87 км, Na на высоте ~90 км, O_2 на высоте ~94 км и OI на высоте ~96 км. При прохождении бора по горизонтальному волноводному каналу на высоте между Na и O_2, два нижних слоя свечения, OH и Na, демонстрировали усиление яркости фронта и его последовательного волнового поля, два верхних слоя свечения, O_2 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 «ST-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 OH. 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 «ST-6». Используется ПЗС-камера «ST-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 сьемки 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).

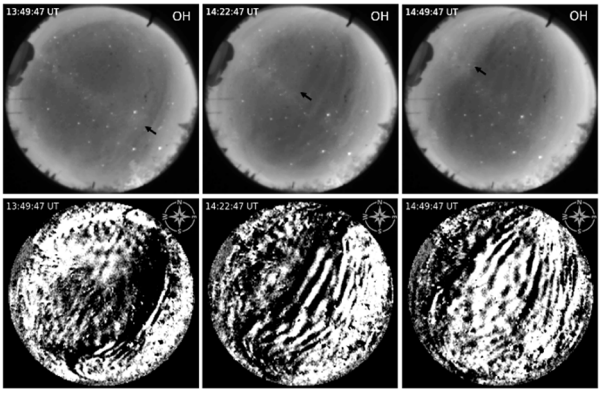

Рис. 1. Изображения в эмиссии OH по камере всего неба «ST-6» на которых видно движение мезосферного бора 19 ноября 2017 г. в 13:49 UT (появление бора), 14:22 UT (бор в зените камеры) и 14:49 UT (уход бора из поля зрения камеры). На верхних кадрах показаны необработанные изображения. Темный мезосферный 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 ~290° (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).

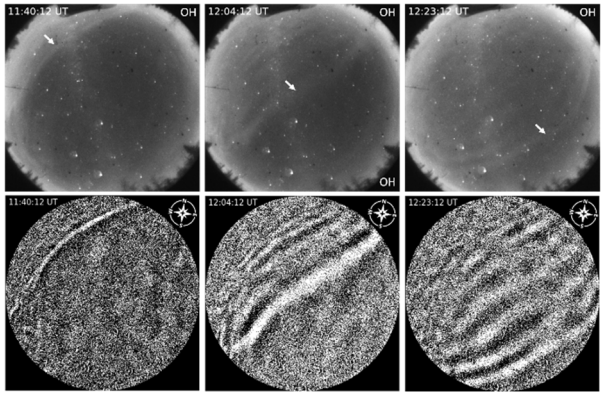

Рис. 2. Изображения в эмиссии OH по камере всего неба «ST-9» на которых видно движение мезосферного бора 30 января 2022 г. в 11:40 UT (появление бора), 12:04 UT (бор в зените камеры) и 12:23 UT (уход бора из поля зрения камеры). На верхних кадрах показаны необработанные изображения. Светлый мезосферный 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 гидроксила OH и молекул атомарного кислорода OI (87 и 96 км). Стрелки белого цвета указывают направление распространения мезосферного бора, которое равно ~140° (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 ~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 корректировки струйных течений) [Plougonven, 2014]. Для рассматриваемых в данной работе случаев были рассмотрены синоптические карты Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ) [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 нестабильности, 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 суббуревой инжекцией по наблюдениям полярных сияний. Магнитосферные явления в окрестности плазмопаузы // 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, O_2 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.