УДК 523.62-726 DOI: 10.62955/0135-3748-2024-271

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АВРОРАЛЬНОГО КИЛОМЕТРОВОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

В.И. Колпак[1, 2], М.М. Могилевский[1], Д.В. Чугунин[1], А.А. Чернышов[1], И.Л. Моисеенко[1], М.О. Рязанцева[1]

[1]Институт космических исследований РАН, Москва, Россия,
lera.kolpak@yandex.ru
[2]Институт 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. Mogilevsky[1], D.V. Chugunin[1], A.A. Chernyshov[1], I.L. Moiseenko[1], M.O. Riazantseva[1]

[1]Space Research Institute of RAS, Moscow, Russia,
lera.kolpak@yandex.ru
[2]Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences, Troitsk, Moscow, Russia

Аннотация. Представлены результаты статистической обработки измерений авроральных 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 ~ 200R_e от Земли позволяют выявить зависимость частоты появления АКР от солнечной активности.

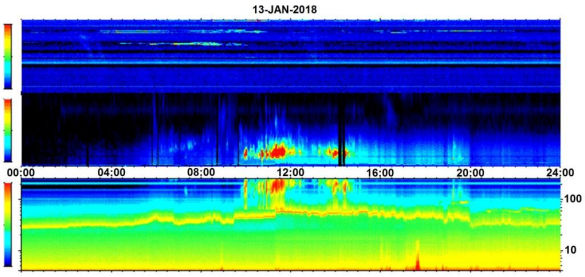

Рис. 1. Спектрограмма электрической компоненты поля, зарегистрированной на спутнике WIND 13 января 2018 г. в диапазонах частот: 4–245 кГц (нижняя панель), 20–1040 кГц (средняя панель), 10–14 МГц (верхняя панель)

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:

$$f_{UH} = \left(f_{pe}^2 - f_{Be}^2\right)^{\frac{1}{2}}.$$

Поскольку в солнечном ветре $f_{pe} \gg f_{Be}$, 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/см^3. 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.

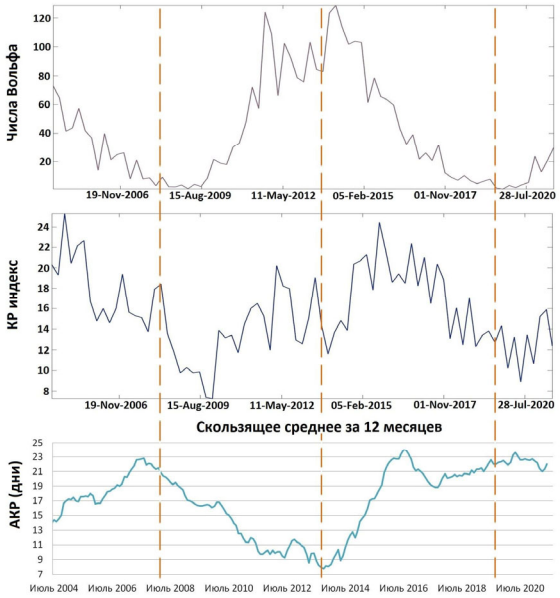

Рис. 2. Усредненные значения чисел Вольфа (верхняя панель), индекса геомагнитной активности *Kp* (средняя панель) и частота появления АКР — количество «активных» дней в месяц (нижняя панель)

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 плазмосферы // 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. Каналирование 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., Baumback 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.