

УДК 523.62-726

ПАРАДОКСАЛЬНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ АВРОРАЛЬНОГО КИЛОМЕТРОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

© 2024 г. В. И. Колпак^{1,2,*}, М. М. Могилевский¹, Д. В. Чугунин¹, А. А. Чернышов¹,
И. Л. Моисеенко¹, М. О. Рязанцева¹

Представлено академиком РАН Л. М. Зелёным 26.06.2024 г.

Поступило 27.06.2024 г.

После доработки 27.06.2024 г.

Принято к публикации 07.08.2024 г.

Представлены результаты статистической обработки измерений аврорального километрового радиоизлучения, зарегистрированного на спутнике WIND вблизи точки либрации L1. Показано, что частота регистрации аврорального километрового радиоизлучения изменяется в противофазе с вариациями солнечной активности. Сделано предположение, что такое изменение частоты регистрации аврорального километрового радиоизлучения связано с особенностью распространения радиоизлучения в неоднородной плазме солнечного ветра.

Ключевые слова: авроральное километровое радиоизлучение, солнечный ветер, плазменные неоднородности, распространение радиоволн

DOI: 10.31857/S2686740024060043, EDN: HWANLH

Авроральное километровое радиоизлучение (АКР) получило название по расположению источника и характерной длине волны [1–3]. Источником энергии АКР являются потоки сверхтепловых электронов (1–10 кэВ), инжектируемых из хвоста магнитосферы Земли во внутренние области во время геомагнитных возмущений. Механизмом генерации АКР является циклотронная мазерная неустойчивость (ЦМН) [4–6], развивающаяся в областях с пониженной плотностью плазмы (кавернах Кальверта) [7, 8], когда выполняется условие

$$f_{pe} < f_{Ve},$$

где $f_{pe} = (4\pi 2N/m)^{1/2}$ — плазменная электронная частота; e — заряд электрона; N — плотность плазмы; m — масса электрона; $f_{Ve} = Ve/mc$ — гирочастота электронов, V — магнитное поле, c — постоянная скорости света. При развитии ЦМН все частицы плазмы резонансно передают энергию электромагнитному излучению, что приводит к большому КПД передачи энергии от частиц к волнам и, как следствие этого, высокой интенсивности АКР. При сильных геомагнитных возмущениях до 10% энергии частиц переходит в электромагнитное из-

лучение и интегральная интенсивность АКР может достигать 10^7 – 10^9 Вт. Диаграмму направленности АКР формируют каверны Кальверта, вытягивая излучение вдоль магнитного поля от Земли. Типичные значения раскрытия конуса излучения составляет 25–35 градусов от направления магнитного поля в источнике излучения [9], а частотный диапазон самого аврорального километрового радиоизлучения составляет 30–900 кГц. По этой причине регистрация АКР возможна лишь 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 использовать его для диагностики свойства плазмы, в которой происходит распространение данного излучения [8, 10–12]. Мы использовали результаты измерений электромагнитного поля в диапазоне частот 4–1000 кГц, выполненных на борту спутника WIND [13], для исследования некоторых свойств солнечного ветра. Спутник WIND был запущен 1 ноября 1994 г. и на первом этапе его миссии 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 на расстояние порядка $\sim 200 R_e$, где измерения проводятся по настоящее время.

¹ Институт космических исследований
Российской академии наук, Москва, Россия

² Институт земного магнетизма, ионосферы
и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова
Российской академии наук, Троицк, Москва, Россия

* E-mail: lera.kolpak@yandex.ru

Для наших исследований излучения и свойств плазмы в солнечном ветре мы выбрали интервал с июня 2004 по август 2020 г. 16-летние однородные измерения позволяют провести статистический анализ распространения АКР при различных уровнях солнечной активности, а также выявить зависимость частоты появления АКР от солнечной активности.

Пример электрических сигналов, зарегистрированных на спутнике WIND, приведен на рис. 1.

На рис. 1 приведен пример электрических сигналов, зарегистрированных на борту спутника WIND в момент активности аврорального километрового радиоизлучения. На приведенном интервале вместе с появлением АКР (верхняя панель) происходит заметное изменение частоты верхнего гибридного резонанса, $f_{UH} = (f_{pe}^2 - f_{Be}^2)^{1/2}$, с 30 до 60 кГц. Поскольку в солнечном ветре выполняется условие $f_{pe} \gg f_{Be}$, то в первом приближении можно считать, что вариации f_{UH} связаны с изменением плотности плазмы. Следовательно, 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 2018 г. АКР было зарегистрировано при повышении плотности плазмы, т.е. при попадании в плазменный канал, условия для формирования которого возникают лишь при определенных условиях.

Для выявления закономерностей изменения АКР в солнечном ветре было посчитано количество дней в месяц, в которые наблюдались излучения. Частота появления АКР сопоставлялась с солнечной активностью — числами Вольфа (ЧВ). На рис. 2 приведены усредненные значения чисел Вольфа и частота регистрации АКР за период с июня 2004 по июль 2020 г. Интервал наблюдений превышает среднюю длительность цикла солнечной активности, что позволяет отследить квазипериодичность измене-

ния чисел Вольфа. Вертикальными пунктирными линиями отмечены минимумы, приходящиеся на февраль 2008 и сентябрь 2019 г., и максимум солнечной активности, приходящийся на сентябрь 2013 г.

График изменения частоты регистрации АКР (нижний график на рис. 2) находится в противофазе с изменениями чисел Вольфа. Такая зависимость частоты регистрации АКР от солнечной активности является неожиданной, поскольку еще в первых работах по АКР было замечено, что появление АКР зависит от геомагнитной активности [1–3] — частота регистрации и интенсивность АКР в магнитосфере Земли наблюдаются чаще при возрастании геомагнитных возмущений. Общепринятый механизм генерации АКР объясняет эту зависимость [4, 5] — поскольку источником энергии АКР являются сверхтепловые частицы, инжектируемые из хвоста магнитосферы во внутренние области, то появление потоков таких частиц связано с геомагнитными возмущениями. Для интерпретации парадоксальной зависимости частоты регистрации АКР (рис. 2) логично предположить, что наблюдаемая зависимость частоты регистрации АКР от солнечной активности связана не с генерацией АКР в магнитосфере Земли, а с особенностями распространения АКР в солнечном ветре.

В работах [8, 10] на основе измерений в магнитосфере Земли было показано, что АКР может захватываться в плазменные каналы — вытянутые вдоль магнитного поля неоднородности плазмы. И 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 [10]. Роль таких каналов в солнечном ветре могут играть неоднородности плотности плазмы — так называемая “лапша Застенкера” [14]. Эти неоднородности плотности солнечного ветра в спокойных условиях более протяженные, чем в возмущенных условиях, что позволяет “длинным” каналам переносить АКР из магнито-

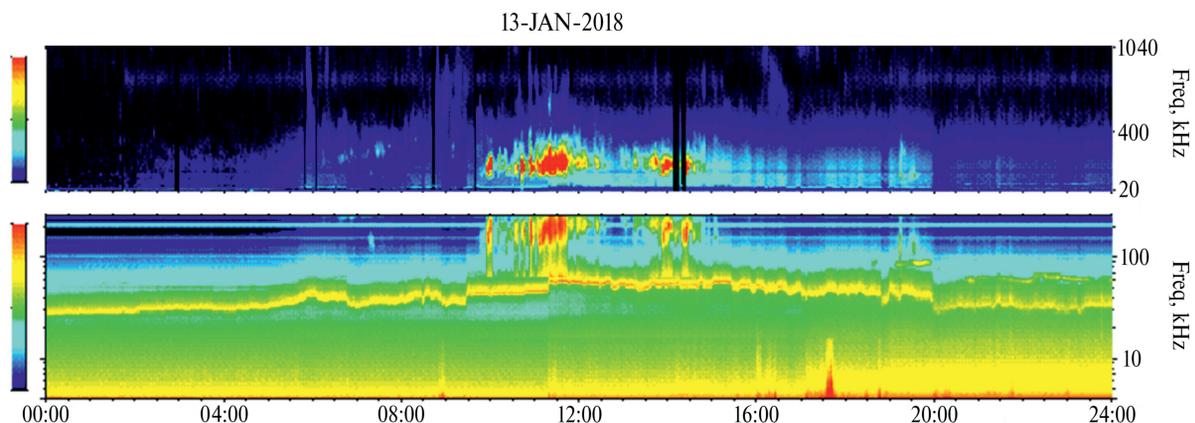


Рис. 1. Спектрограмма электрической компоненты поля, зарегистрированной на спутнике WIND 13 января 2018 г. в диапазонах частот: 4–245 кГц (нижняя панель), 20–1040 кГц (верхняя панель).

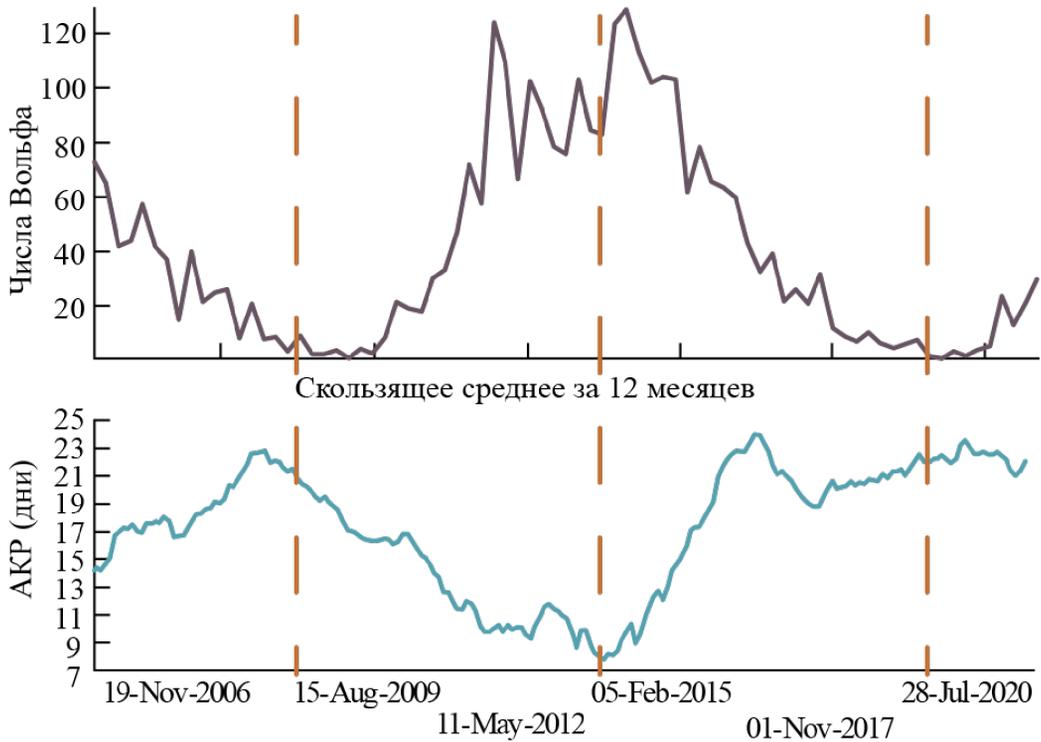


Рис. 2. Усредненные значения чисел Вольфа (верхняя панель), частота появления АКР — среднее значение количества “активных” дней в месяц (нижняя панель).

сферы Земли к спутнику WIND (1.5 млн км) в спокойных условиях (рис. 3). В возмущенных условиях источники инжекции плазмы меняются быстрее, что приводит к формированию мелкомасштабных неоднородностей, которые приводят к рассеянию сигнала и препятствуют переносу АКР до орбиты спутника WIND. На рис. 3 приведена предполагаемая схема распространения АКР в двух случаях — при спокойном Солнце и при возмущенных условиях. В спокойных условиях в солнечном ветре формируются достаточно длинные плазменные каналы, ко-

торые способствуют переносу излучения — такой канал изображен пунктирными линиями. В возмущенных условиях образуются множественные и нерегулярные неоднородности плазмы, которые приводят к рассеянию излучения — представлены на рис. 3 закрашенными фигурами, ограниченными сплошными кривыми.

Отметим, что предположение о различных условиях распространения АКР в солнечном ветре при спокойных и возмущенных условиях требует дальнейших исследований.

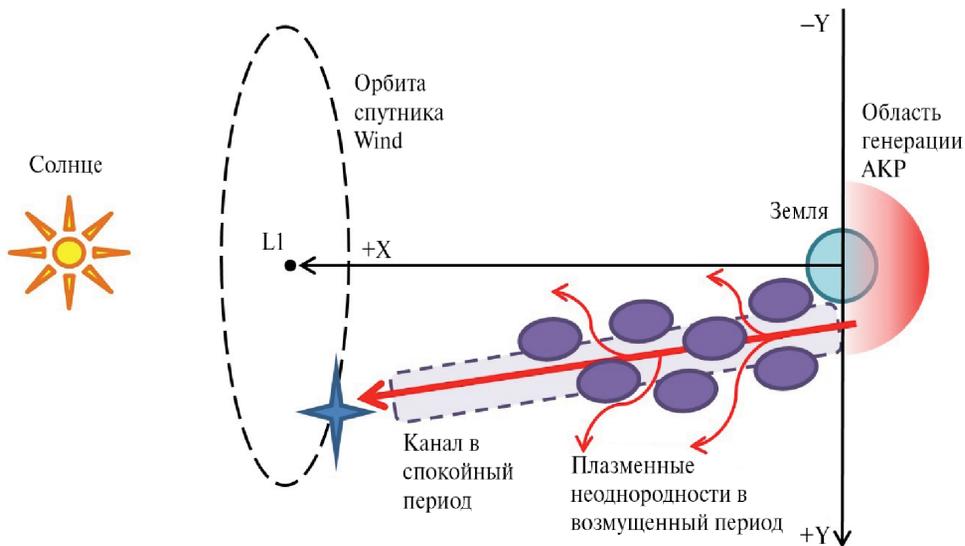


Рис. 3. Схематическое пояснение различных условий распространения АКР в спокойных и возмущенных условиях.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы приносят свою благодарность создателям спутника WIND. Длительный ряд однородных измерений электрической компоненты поля, зарегистрированный на спутнике, доступен на сайте [15]. Данные солнечной активности, использованные в работе, взяты из базы данных OMNI [16].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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” // Иссл. космического пространства / под ред. Скудрина Г.А. М.: Наука, 1965. 581 с.
2. *Gurnett D.A.* The Earth as a radio source: Terrestrial kilometric radiation // *J. Geophys. Res.* 1974. V. 79. N 28. P. 4227.
3. *Kurth W.S., Baumbach M.M., Gurnett D.A.* Direction finding measurements of auroral kilometric radiation // *J. Geophys. Res.* 1975. V. 80. P. 2764.
4. *Wu C.S., Lee L.C.* A theory of the terrestrial kilometric radiation // *Astrophys. J.* 1979. V. 230. P. 621.
5. *Louarn P., Le Quéau D.* Generation of the auroral kilo-metric radiation in plasma cavities-II. The cyclotron maser instability in small size sources // *Planet. Space Sci.* 1996. V. 44. № 3. P. 211.
6. *Baumjohann W., Treumann R.A.* Auroral kilometric radiation – The electron cyclotron maser paradigm // *Front. Astron. Space Sci.* 2022. V. 9
7. *Benson R.F., Calvert W.* ISIS-1 observations of the source of AKR // *Geophys. Res. Lett.* 1979. V. 6. P. 479.
8. *Calvert W.* Ducted Auroral Kilometric Radiation // *Geophys. Res. Letters.* 1982. V. 9. N 1. P. 56–59.
9. *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.
10. *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.
11. *Zhang S., Yin Q., Yang H., et al.* Direct observation of L-X mode of auroral kilometric radiation in the lower latitude magnetosphere by the Arase satellite // *Geophys. Res. Lett.* 2024. V. 51. N 5.
12. *Чернышов А.А., Чугунин Д.В., Могилевский М.М.* Авроральное километровое радиоизлучение как средство диагностики свойств магнитосферы // *Письма в ЖЭТФ.* 2022. Т. 115. № 1. С. 28–34.
13. *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.
14. *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.
15. https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/pub/data/wind/waves/wav_h1/
16. <https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/eval2.cgi>

PARADOXICAL DEPENDENCE OF AURORAL KILOMETRIC RADIATION ON SOLAR ACTIVITY

V. I. Kolpak^{a,b}, M. M. Mogilevsky^a, D. V. Chugunin^a, A. A. Chernyshov^a, I. L. Moiseenko^a, M. O. Riazantseva^a

Presented by Academician of the RAS L. M. Zeleny

^aSpace Research Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

^bPushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences, Troitsk, Moscow, Russia

The results of statistical processing of measurements of auroral kilometric radiation detected on the WIND satellite near the libration point L1 are presented. It is shown that the frequency of auroral kilometric radiation registration varies in antiphase with variations in solar activity. It is hypothesized that such a change in the detection frequency of auroral kilometer radio emissions is related to the characteristics of radio wave propagation in the inhomogeneous plasma of the solar wind.

Keywords: auroral kilometric radiation, solar wind, plasma inhomogeneities, propagation of radio waves