УДК 537.868
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-443
ORCID 0000-0001-7691-8326

ПАРАДОКСАЛЬНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ АВРОРАЛЬНОГО КИЛОМЕТРОВОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ОТ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

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

PARADOXICAL DEPENDENCE OF AURORAL KILOMETRIC RADIATION ON SOLAR ACTIVITY

V.I. Kolpak[1,2], M.M. Mogilevsky[1], D.V. Chugunin[1], A.A. Chernyshov[1], I.L. Moiseenko[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 АКР на спутнике WIND. Показано, что активность АКР находится в противофазе с изменением солнечной активности. Делается предположение о возможном механизме такого явления.

Ключевые слова: солнечный ветер, магнитосфера, авроральнo километровое радиоизлучение, солнечная активность.

Abstract. The results of statistical processing of auroral kilometric radiation (AKR) measurements on the WIND satellite are presented. It is shown that AKR activity is in antiphase with the variation of solar activity. An assumption is made about a possible mechanism of this phenomenon.

Keywords: solar wind, magnetosphere, auroral kilometric radiation, solar activity.

1. О ПРИРОДЕ АВРОРАЛЬНОГО КИЛОМЕТРОВОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ

Авроральное километровое радиоизлучение (АКР) является мощным электромагнитным излучением планет, имеющих магнитное поле. Его источник находится на авроральных широтах, а частотный диапазон АКР, генерируемого в магнитосфере Земли в интервале 30–800 кГц, с максимумом интенсивности находится на 100–300 кГц. Впервые АКР было зарегистрировано в 1965 г. на спутнике «Электрон-2» [Бенедиктов и др., 1965]. В ходе многолетних космических экспериментов были определены основные характеристики АКР: частотный диапазон, поляризационные свойства, а также зависимость данного излучения от геомагнитной активности [Gurnett, 1974; Kurth et al., 1975; Benson, Calvert, 1979].

Согласно общепринятой теории генерации АКР [Wu, Lee, 1979], излучение возникает в результате развития циклотронной мазерной неустойчивости в областях с пониженной плотностью плазмы, при выполнении условия

$$f_{pe} < f_{Be},$$

где f_{pe} — электронная плазменная частота, f_{Be} — гирочастота электронов.

АКР является одним из самых мощных естественных излучений магнитосферы Земли. Интенсивность излучения составляет 10^7–10^8 Вт, а в некоторых случаях достигает 10^9 Вт. Высокая интенсивность АКР обусловлена резонансным взаимодействием всех электронов на высоте генерации с электромагнитными волнами. Благодаря этому происходит эффективная передача энергии от частиц к волнам. Основная часть излучения генерируется вблизи локальной гирочастоты электронов и имеет правополяризованную необыкновенную моду [Wu, Lee, 1979].

Согласно модели генерации, АКР возникает в авроральный области и распространяется от Земли во внешние области. Поскольку АКР является правополяризованной необыкновенной волной, это излучение отражается от резкого градиента плазмы — плазмопаузы.

2. ПРЯМАЯ ЗАВИСИМОСТЬ АКР ОТ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ

Еще в первых работах [Бенедиктов и др. 1965] было показано, что АКР зависит от интенсивности возмущений геомагнитного поля. Сопоставление динамики интегральной интенсивности АКР, зарегистрированной на спутнике Polar, с авроральной активностью, характеризуемой индексом *AE* [Kurth, Gurnett, 1998], подтвердило, что рост интегрального потока мощности АКР хорошо согласуется по времени с ростом *AE*. Данное соответствие подтверждает возможность использования спутниковых измерений АКР в качестве альтернативы глобального *AE*-индекса для оценки уровня геомагнитной активности.

В работе [Колпак и др., 2021] года была подтверждена зависимость интенсивности АКР от геомагнитной активности (рис. 1). При увеличении K_p увеличивается интенсивность АКР.

В работе [Murata et al., 1997] предложен новый индекс, количественно характеризующий мощность

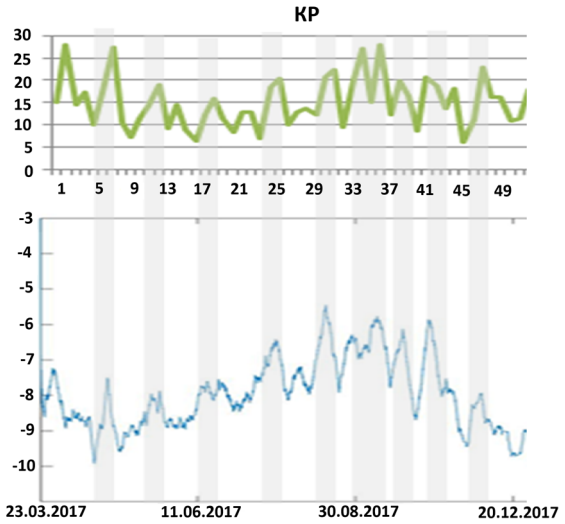

Рис. 1. Результаты статистической обработки измерений АКР, выполненных на спутнике ERG, в сравнении с геомагнитным индексом K_p

АКР по данным наблюдений на спутнике Geotail. Сравнение этого индекса с K_p и индексом кольцевого тока *Dst* показало, что в условиях спокойной магнитосферы увеличение геомагнитной активности (K_p<4) сопровождается пропорциональным ростом мощности АКР. При этом для возмущений с K_p>4 мощность АКР перестатт расти и выходит на насыщение, что указывает на перераспределение избыточной энергии магнитосферного возмущения в другие процессы.

3. ОБРАТНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ АКР ОТ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ

Спутник WIND [Bougeret et al., 1995] после маневров вокруг Земли в 2004 г. перешел на орбиту в окрестностях точки Лагранжа L1 на расстоянии ~220R_E от Земли (рис. 2) и с этого момента проводит измерения, в том числе АКР. Длительные измерения в течение времени, превышающего цикл солнечной активности, были использованы для анализа статистической зависимости АКР от изменений активности Солнца.

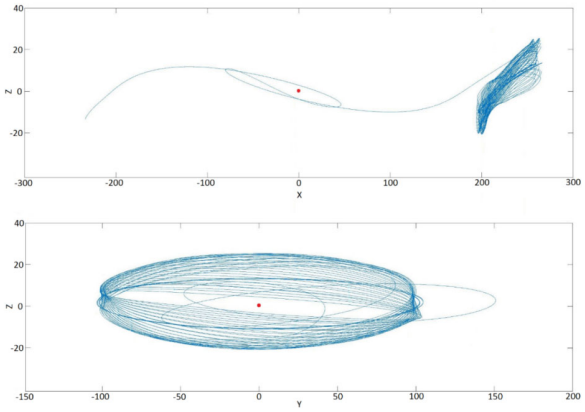

Рис. 2. Орбита спутника WIND с 2004 по 2021 г. в координатах XY_{GSE} (вверху) и YZ_{GSE}. Красная точка — Земля

Для статистического анализа на всем периоде наблюдений были отобраны дни, в которые на борту спутника WIND регистрировались всплески АКР. На основе полученной выборки было определено количество активных дней регистрации АКР для каждого месяца исследуемого интервала.

На рис. 3 показаны усредненные данные солнечной активности (числа Вольфа), скользящее среднее за 24 мес измерений и активные дни, в которые наблюдалось АКР, с тем же самым усреднением. Сопоставление числа дней регистрации АКР с уровнем солнечной активности показало наличие долговременных вариаций, период которых соответствует циклу солнечной активности, характеризуемому числами Вольфа. Следует обратить внимание, что изменения частоты регистрации АКР находятся в противофазе с солнечной активностью: максимум числа зарегистрированных событий наблюдается в периоды минимума солнечной активности, тогда как вблизи максимумов солнечного цикла количество регистраций уменьшается.

Рис. 3. Числа Вольфа (красная кривая) и количество активных дней АКР в месяц (синяя кривая); скользящее среднее за 24 мес

Полученный результат носит парадоксальный характер, поскольку увеличение солнечной активности связано с ростом возмущенности межпланетной среды и, как следствие, с увеличением геомагнитных возмущений. Этот результат противоречит данным, приведенным в разделе 2.

4. О ВОЗМОЖНОМ МЕХАНИЗМЕ ПАРАДОКСАЛЬНОГО ПОВЕДЕНИЯ АКТИВНОСТИ АКР В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ

Мы предполагаем, что парадоксальная зависимость АКР от активности Солнца связана не с генерацией излучения, а с распространением этого излучения от Земли к точке либрации L1.

Ранее было показано, что АКР может распространяться внутри плазменных каналов — вытянутых вдоль линий магнитного поля неоднородностей плазмы [Calvert, 1982; Могилевский и др., 2022]. В солнечном ветре роль таких каналов могут выполнять неоднородности плотности плазмы, известные как «лапша Застенкера» [Застенкер и др, 2013]. Предполагается, что в периоды низкой солнечной активности данные структуры имеют достаточно большую протяженность, вследствие чего

обеспечивается перенос АКР от магнитосферы Земли до орбиты спутника WIND ~200–260R_E. При этом захват излучения в плазменный канал возможен даже в случае, когда частота излучения превышает локальную плазменную частоту, при выполнении определенного соотношения между направлением оси канала и углом распространения излучения [Колпак и др., 2024].

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенный анализ показывает, что регистрация аврорального километрового радиоизлучения в солнечном ветре определяется не только интенсивностью процессов генерации АКР в магнитосфере Земли, но и условиями его распространения в межпланетной плазме. Несмотря на известную связь мощности АКР с ростом геомагнитной активности при умеренных возмущениях магнитосферы, статистика наблюдений на спутнике WIND демонстрирует противофазную зависимость частоты регистрации АКР от солнечной активности. Полученный результат указывает на существенную роль плазменных неоднородностей и параметров солнечного ветра в процессах распространения и затухания излучения на больших расстояниях от Земли.

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» // Исследования космического пространства / под ред. Г.А. Скудрина. М.: Наука, 1965. С. 581–606.

Застенкер Г.Н., Шафранкова Я., Немечек З. и др. Быстрые измерения параметров солнечного ветра с помощью прибора БМСВ // Косм. исслед. 2013. Т. 51, № 2. С. 88–99.

Колпак В.И., Могилевский М.М., Чугунин Д.В. и др. Статистические свойства аврорального километрового радиоизлучения по наблюдениям на спутнике ERG (Arase) // Солнечно-земная физика. 2021. Т. 7, № 1. С. 13–20.

Колпак В.И., Могилевский М.М., Чугунин Д.В., и др. Изменение спектра аврорального километрового радиоизлучения при распространении в неоднородной космической плазме // Изв. РАН. Сер. физическая. 2024. Т. 88, № 3. С. 451–456.

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. 1995. V. 71, N 1–4. 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. 4227–4238.

Kurth W.S., Baumback M.M., Gurnett D.A. Direction finding measurements of auroral kilometric radiation // J. Geophys. Res. 1975. V. 80. P. 2764.

Kurth W.S., Gurnett D.A. Auroral Kilometric Radiation Integrated Power Flux as a Proxy for AE // Adv. Space Res. 1998. V. 22, N 1. P. 73–77.

Murata T., Matsumoto H., Kojima H., Iyemori T. Correlations of AKR index with K_p and *Dst* indices // Proc. NIPR Symposium on Upper Atmosphere Physics. 1997. V. 10. P. 64–68.

Wu C.S., Lee L.C. A theory of the terrestrial kilometric radiation // Astrophys. J. 1979. V. 230. P. 621–626.