

# ГЕОМАГНИТНАЯ АКТИВНОСТЬ В ПЕРИОД С 23-ГО ПО 25-Й ЦИКЛЫ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

## GEOMAGNETIC ACTIVITY DURING THE PERIOD FROM 23RD TO 25TH SOLAR ACTIVITY CYCLES

И. П. БЕЗРОДНЫХ<sup>1</sup>, А. А. МУСАЛИТИН<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ИКИ РАН, Москва

<sup>2</sup>АО «Корпорация «ВНИИЭМ», Москва

I. P. Bezrodnykh<sup>1</sup>, A. A. Musalitin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>IKI, Moscow

<sup>2</sup>JSC "VNIIEM Corporation", Moscow

Аннотация. Проводится анализ геомагнитной активности с использованием данных трехчасовых значений  $Kp$ -индекса геомагнитного поля за период с 1932 по 2025 гг. В работе геомагнитная активность рассматривается как отклик на солнечную активность (ударные волны от солнечных вспышек, рекуррентные высокоскоростные потоки солнечной плазмы). В 2024 и 2025 гг. наблюдались мощные геомагнитные возмущения, на основании этого сделан вывод, что в 2024-м г. закончился почти 20-летний период низкой солнечной и геомагнитной активности, который начался после максимума 23-го цикла активности Солнца и продолжался почти до максимума 25-го цикла. В работе для оценки спектральных характеристик вариаций использовались методы спектрального и спектрально-временного анализа. Показано, что на фазе роста солнечной активности и в максимуме активности Солнца спектр вариаций сплошной, отсутствуют выделенные частоты, такой спектр вариаций напоминает спектр белого шума. На спаде активности Солнца в 23-м и 24-м циклах наблюдается дискретный спектр вариаций, состоящий из 5-ти выделенных частот. С начала 2007 до 2010 гг. эти частоты соответствовали периодам около 26-ти, 14-ти, 9-ти, 7-ми, 5-ти сут. В течение 2007 г. наблюдалось небольшое смещение частоты вариации  $Kp$ -индекса в низкочастотную область спектра, это можно объяснить смещением источника рекуррентного высокоскоростного потока солнечной плазмы на более высокую широту. Сравнительный анализ частот вариаций межпланетных и магнитосферных параметров показал, что в 2007 г. частоты  $Dst$ -вариаций,  $Kp$ -индекса, потоков релятивистских электронов внешнего радиационного пояса и потока частиц галактических космических лучей совпадали с частотами вариаций скорости солнечного ветра.

Ключевые слова:  $Kp$ -индекс геомагнитной активности, циклы солнечной активности, вариации параметров межпланетной среды и геомагнитного поля, спектральный анализ.

Для цитирования: Безродных И. П., Мусалитин А. А. Геомагнитная активность в период с 23-го по 25-й циклы солнечной активности // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2025. Т. 208. № 5. С. 36–44.

Annotation. To analyze geomagnetic activity, we used data from three hourly values of the  $Kp$ -index of the geomagnetic field for the period from 1932 to 2025. In the paper, geomagnetic activity is considered as a response to solar activity (shock waves from solar flares, recurrent high-speed flows of solar plasma). In 2024 and 2025, powerful geomagnetic disturbances were observed, based on which it was concluded that in 2024, an almost 20-year period of low solar and geomagnetic activity ended, which began after the maximum of the 23rd solar activity cycle and lasted almost until the maximum of the 25th cycle. In the paper, spectral and spectral-temporal analysis methods were used to assess the spectral characteristics of the variations. It is shown that during the growth phase of solar activity and at the maximum of solar activity, the spectrum of variations is continuous, there are no distinguished frequencies, such a spectrum of variations resembles a white noise spectrum. During the decline of solar activity in the 23rd and 24th cycles, a discrete spectrum of variations is observed, consisting of 5 selected frequencies. From the beginning of 2007 to 2010, these frequencies corresponded to periods of about 26, 14, 9, 7, 5 days. During 2007, a small shift in the frequency of the  $Kp$ -index variation to the low-frequency region of the spectrum was observed, this can be explained by the shift of the source of the recurrent high-speed solar plasma flow to a higher latitude. Comparative analysis of the frequencies of variations in interplanetary and magnetospheric parameters showed that in 2007, the frequencies of  $Dst$ -variations,  $Kp$ -index, flows of relativistic electrons of the outer radiation belt and the flow of particles of galactic cosmic rays coincided with the frequencies of variations in the solar wind velocity.

Key words:  $Kp$ -index of geomagnetic activity, solar activity cycles, variations in the parameters of the interplanetary medium and geomagnetic field, spectral analysis.

For citation: Bezrodnykh I. P., Musalitin A. A. Geomagnetic Activity During the Period from 23rd to 25th Solar Activity Cycles // Electromechanical matters. VNIIEM studies. 2025. Vol. 208. № 5. P. 36–44.

Земля, как все остальные планеты солнечной системы, находится внутри солнечной короны. Изменение солнечной активности меняет физические условия в межпланетной среде и в магнитосфере Земли, в частности, от солнечной активности зависит степень возмущенности геомагнитного поля (геомагнитная активность) и радиационные условия на орбитах космических аппаратов (КА). Гео-

магнитные возмущения в магнитосфере Земли генерируют потоки релятивистских электронов, инженеры их заслуженно называют «убийцами» электронной аппаратуры КА. Очевидно, исследование солнечной активности и ее влияния на процессы в магнитосфере Земли представляет не только научный интерес. Результаты этих исследований могут быть учтены при разработке

конструкции КА и для прогноза радиационных условий на орбитах КА.

В данной работе, для анализа солнечной и геомагнитной активности использовались значения числа солнечных пятен (*Sunspot Number* – SSN) и значения трехчасовых *Kp*-индексов геомагнитной активности за период с 1 января 1932 г. по 1 августа 2025 г. [1].

На рис. 1 показаны события, когда наблюдались мощные геомагнитные возмущения со значениями *Kp*-индекса более чем 7,5. В период с 1931 до 1937 гг. и в период с 2006 до 2024 гг. геомагнитная и солнечная активность была существенно ниже, чем в период с 1937 до 2006 гг.

На рис. 2 показаны циклы солнечной активности, число солнечных пятен и количество 3-часовых *Kp*-индексов в году, значение которых было равно нулю. Из данных, приведенных на рис. 2, следует, что в период с 2006 до 2024 гг. было наибольшее число 3-часовых значений *Kp*, равных нулю. В 2009 г. геомагнитная активность была самой низкой за всю историю наблюдения. Не только 2009 г., но и весь период, относящийся к спаду 23-го цикла солнечной активности является уникальным. На спаде всех циклов солнечной активности появляются корональные дыры на Солнце, которые фактически являются предвестниками будущего цикла солнечной активности [2].

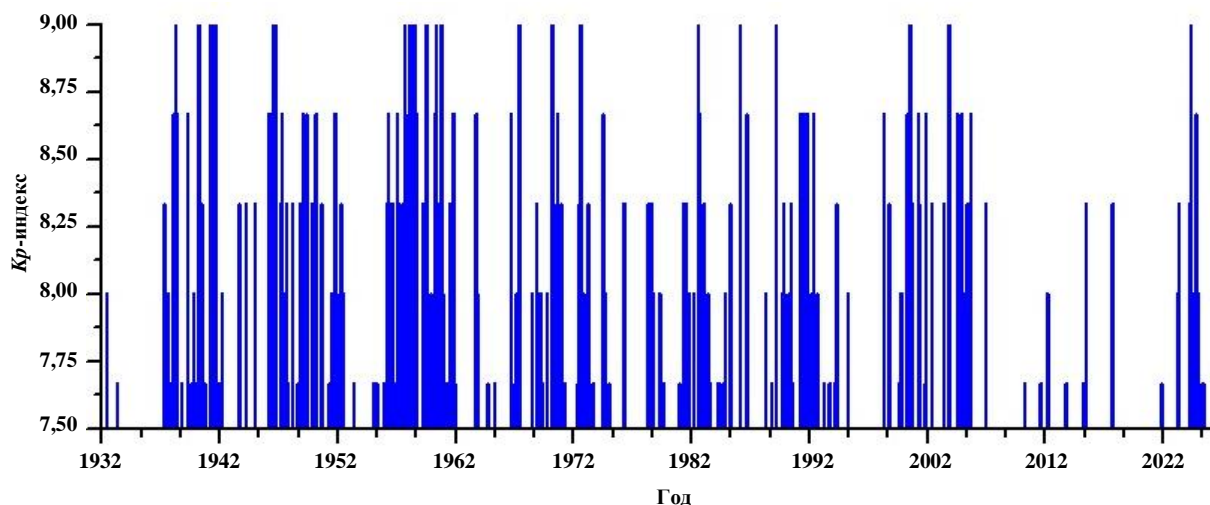


Рис. 1. Геомагнитные возмущения в период с 01.01.1932 по 01.08.2025 гг. со значениями *Kp*-индекса более чем 7,5

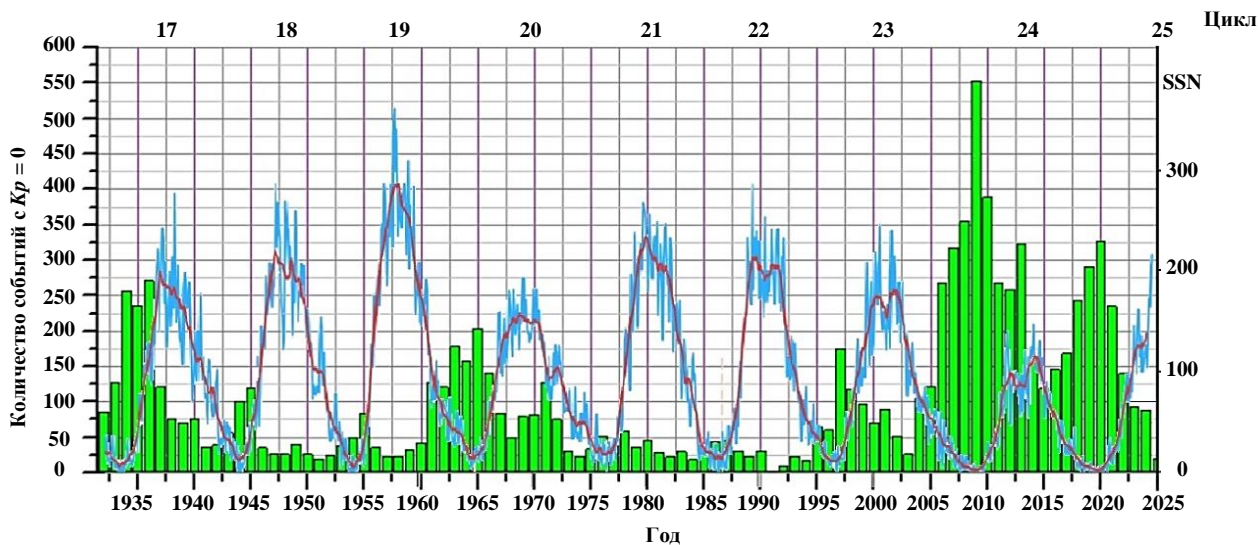


Рис. 2. Среднее число солнечных пятен и число событий со значениями *Kp* = 0. Данные приведены для периода с 01.01.1932 по 01.08.2025 гг.

Корональная дыра может образоваться в любом месте на поверхности Солнца. Поскольку экватор Солнца вращается быстрее, чем части Солнца, расположенные ближе к полюсам, то периодичность воздействия на магнитосферу Земли струи рекуррентного высокоскоростного потока плазмы, вытекающего из корональной дыры, будет разной в зависимости от солнечной широты, на которой располагается корональная дыра. Периодичность воздействия на магнитосферу Земли струи плазмы из корональной дыры, если она располагается на экваторе, составляет около 25-ти суток. Если корональная дыра располагается вблизи полюса, то период воздействия струи плазмы на магнитосферу Земли составляет около 35-ти суток.

Уникальность спада 23-го цикла солнечной активности состоит в том, что периодические процессы, связанные с рекуррентными (повторяющимися) потоками солнечной плазмы, из-за низкой вспышечной активности Солнца, будут наблюдаться с наименьшими искажениями. На рис. 3 показан график исходных данных  $Kp$ -индекса геомагнитной активности и развертка во времени амплитуды

огibaющей вариаций  $Kp$ -индекса геомагнитной активности за период с 2005 по 2025 гг. Обычно для спектрально-временного анализа сигналов используется набор (около 100) цифровых фильтров и построение огibaющих периодических вариаций с помощью преобразования Гильберта [3 – 5]. Амплитуда вариаций показана цветом, справа от рисунка (см. рис. 3, б). При спектрально-временном анализе амплитуды огibaющих вариаций нормируются на единицу. Максимальному значению амплитуды вариаций соответствует темно-красный цвет (1,0), минимальному значению амплитуды соответствует темно-синий цвет (0).

На рис. 3 видно, периодические вариации  $Kp$ -индекса геомагнитной активности наблюдаются только на спаде солнечной активности в 23-м цикле (2007 – 2009 гг.) и 24-м цикле (2018 – 2020 гг.). Заметно, что вариации наблюдаются только на 5-ти частотах: 0,0383, 0,0714, 0,1099, 0,144, 0,1887 1/сут, данным частотам вариаций соответствуют периоды вариаций: 26,1, 14, 9,1, 6,9, 5,3 сут. Обратим внимание, что к началу 24-го цикла солнечной активности (2010 г.) вариации на всех пяти частотах прекратились. Начало следующего цикла активности

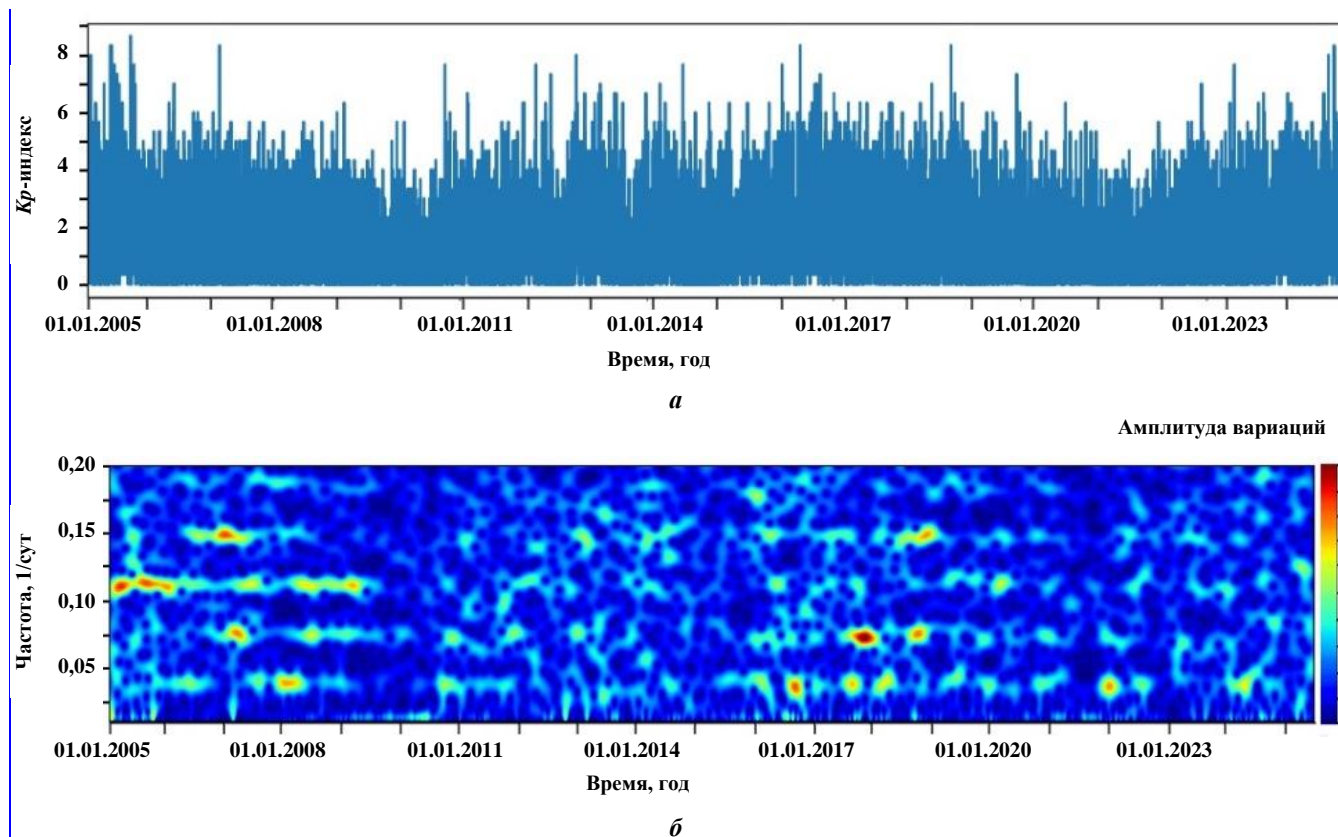


Рис. 3. Спектрально-временной анализ вариаций значений  $Kp$ -индекса геомагнитной активности за период с 2005 по 2025 гг.: а – график исходных данных; б – развертка во времени амплитуды огibaющей вариаций

Солнца и максимум цикла не сопровождается рекуррентными высокоскоростными потоками солнечной плазмы, которые являются причиной периодических изменений значения  $Kp$ -индекса. Рассмотрим более детально периодические вариации  $Kp$ -индекса на спаде 23-го цикла солнечной активности. Для этого ограничимся временным периодом всего в 3 года. На рис. 4 показан график временного ряда значений  $Kp$ -индекса геомагнитной активности и результаты спектрально-временного анализа этого ряда за период с 2007 до 2010 гг. На рис. 4 видно, что вариации не стабильны, их амплитуды меняются со временем. В 2007 г. максимальное значение амплитуды вариаций наблюдалось на частоте 0,0383 1/сут, что соответствует периоду 26,1 сут, в 2008 г. максимум вариаций сместился на более высокие частоты. Даже на одной и той же частоте амплитуда вариаций изменяется со временем нере-

гулярно. Повторно выполним спектрально-временной анализ ряда исходных данных значений  $Kp$ -индекса, но с большим разрешением по частоте, при этом мы частично потеряем разрешение по амплитуде. На рис. 5 показан результат спектрально-временного анализа с высоким частотным разрешением. **Спектр вариаций  $Kp$ -индекса дискретный.** Четко видно, что периодические изменения амплитуды вариаций  $Kp$ -индекса происходят только на пяти частотах, которые мы указали выше. Попробуем выяснить, есть ли изменение частоты вариаций со временем на отдельно выделенной частоте. Если обнаружим изменение частоты со временем, то это будет основанием утверждать, что источник высокоскоростного рекуррентного потока солнечной плазмы в процессе эволюции смещается по широте. Для решения этой задачи рассмотрим отдельно основную гармонику в узком диапазоне частот.

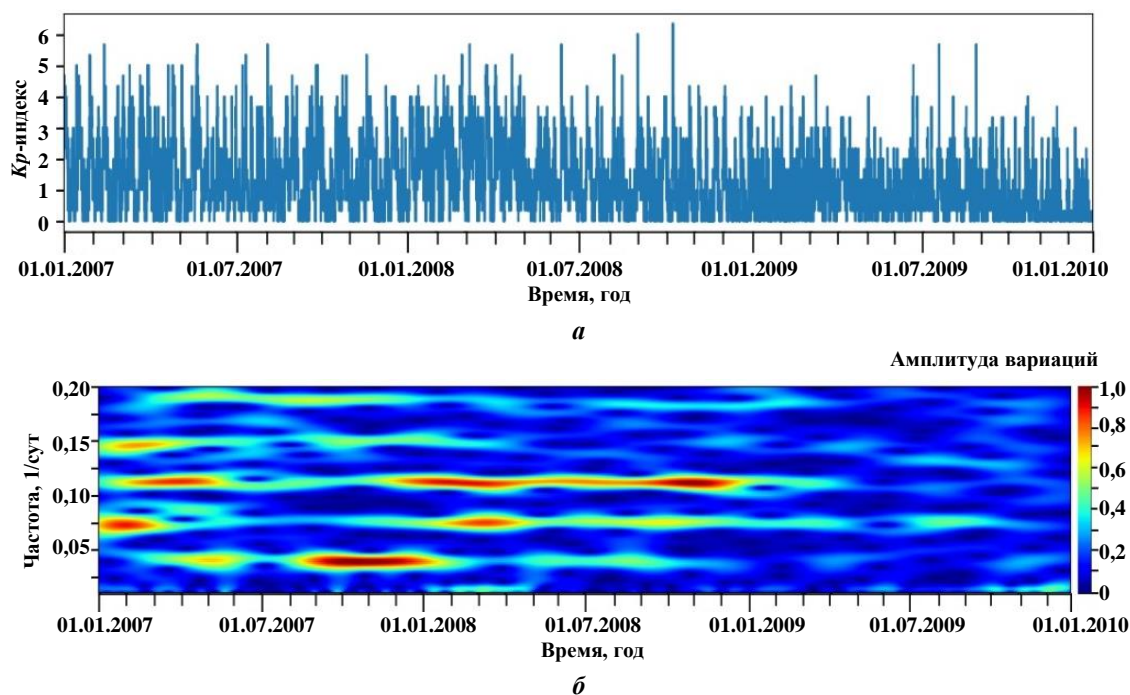


Рис. 4. Спектрально-временной анализ вариаций значений  $Kp$ -индекса в период с 2007 до 2010 гг.:  $a$  – график исходных данных;  $b$  – развертка во времени амплитуды огибающей вариаций

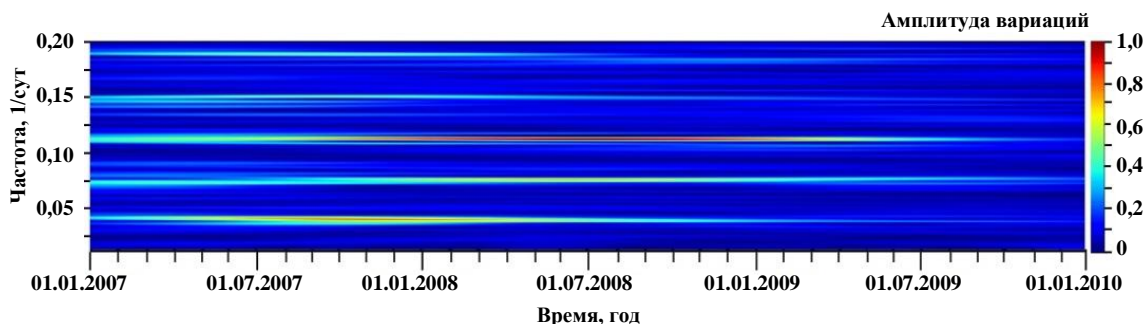


Рис. 5. Спектрально-временной анализ вариаций значений  $Kp$ -индекса в период с 2007 до 2010 гг. с высоким частотным разрешением



На рис. 6 показан результат спектрально-временного анализа в диапазоне частот от 0,01 (1/сут) до 0,06 (1/сут). Заметим, что вариация  $Kp$ -индекса в начале 2007 г. имеет частоту больше чем 0,0383 (1/сут), а в конце 2008 г. имеет частоту меньше чем 0,0383 (1/сут). Изменения незначительные. **Это дает основание утверждать, что источник рекуррентного высокоскоростного потока плазмы солнечного ветра в процессе эволюции смещается на более высокие широты всего на несколько градусов.** Это не означает, что обязательно смещается сама корональная дыра, возможно и смещение на более высокие широты основания источника струи высокоскоростной плазмы внутри границ корональной дыры. Если взять поперечное сечение струи плазмы рекуррентного потока, то вполне вероятно, скорость плазмы не строго однородна по сечению.

Основной ритм вариаций в межпланетной среде и в магнитосфере Земли задают рекуррентные высокоскоростные потоки солнечной плазмы, источником которых являются корональные дыры [6 – 9]. С каждым оборотом Солнца высокоскоростная струя плазмы «бьет» по магнитосфере Земли, сжимает её, передавая ей часть своей кинетической энергии, которая частично, через электромагнитные волны, расходуется на ускорение электронов радиационных поясов. Поскольку скорость вращения вещества поверхности Солнца зависит от широты, то периодичность, с которой струя плазмы будет воздействовать на магнитосферу Земли, зависит от широты источника этой струи (корональной дыры). На рис. 7 для периода с 1 января по 31 декабря 2007 гг. показаны спектры мощности флуктуаций – скорости солнечного ветра вблизи магнитосферы Земли,  $Kp$ -индекса геомагнитной активности,  $Dst$ -вариаций, интенсивности потока релятивистских электронов внешнего радиационного пояса Земли и потока протонов галактических космических лучей (ГКЛ) с  $E_p > 100$  МэВ на геостационарной орбите.

Вариации с периодом около 26-ти дней связаны с рекуррентными высокоскоростными потоками солнечной плазмы из корональной дыры. Меньшие периоды (около 14-ти и 9-ти сут) относительно небольших возрастаний скорости солнечного ветра, вероятно, связаны с секторными структурами межпланетного магнитного поля (ММП). В отличие от спектрально-временного анализа спектр мощности вариаций не дает развертку вариаций во времени, но позволяет получить информацию о распределении средней мощности вариаций по частотам на заданном временном интервале. **Обратите внимание, частоты  $Dst$ -вариаций,  $Kp$ -индекса, потоков релятивистских электронов внешнего радиационного пояса и потока частиц ГКЛ совпадают с частотами вариаций скорости солнечного ветра.**

Область корональной дыры в отличие от других областей на Солнце имеет открытые силовые линии магнитного поля, уходящие в межпланетное пространство. Магнитное поле других областей на Солнце представляет собой в основном арочную структуру. Температура в корональной дыре из-за свободного расширения плазмы вдоль силовых магнитных линий ниже, чем в других областях на Солнце. По этой причине в рентгеновских лучах она выглядит как темное пятно (рис. 8, а).

В межпланетной среде газы от атмосфер планет, космическая пыль ионизированы. Ударные волны от солнечных вспышек и рекуррентные высокоскоростные потоки солнечной плазмы представляют для заряженных частиц крупномасштабные магнитные неоднородности (магнитные зеркала), которые выталкивают (выметают) весь мусор (космическую пыль, газы планет и другие любые заряженные частицы, например, частицы ГКЛ) из межпланетного пространства на границу солнечной системы (рис. 8, б). В максимуме солнечной активности в роли космической метлы работают ударные волны от солнечных вспышек. На спаде солнечной активности

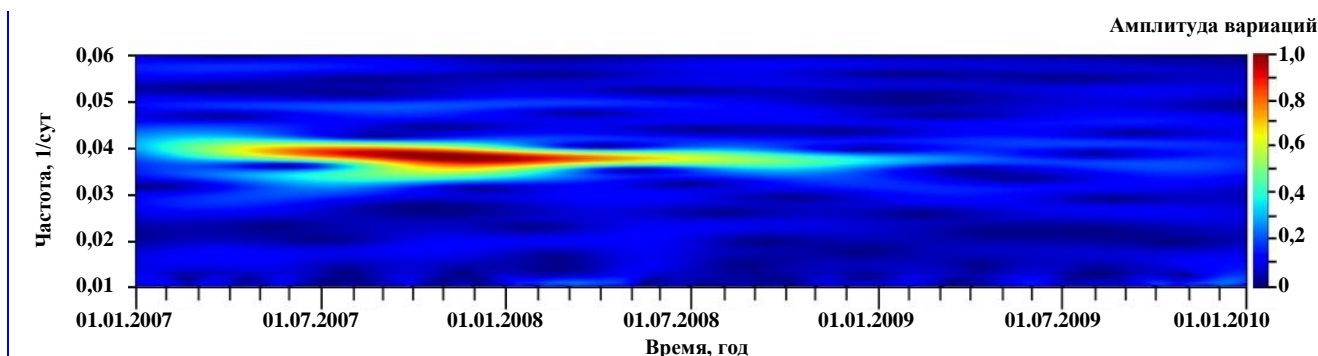


Рис. 6. Спектрально-временной анализ вариаций значений  $Kp$ -индекса в период с 2007 до 2010 гг. в узкой полосе частот

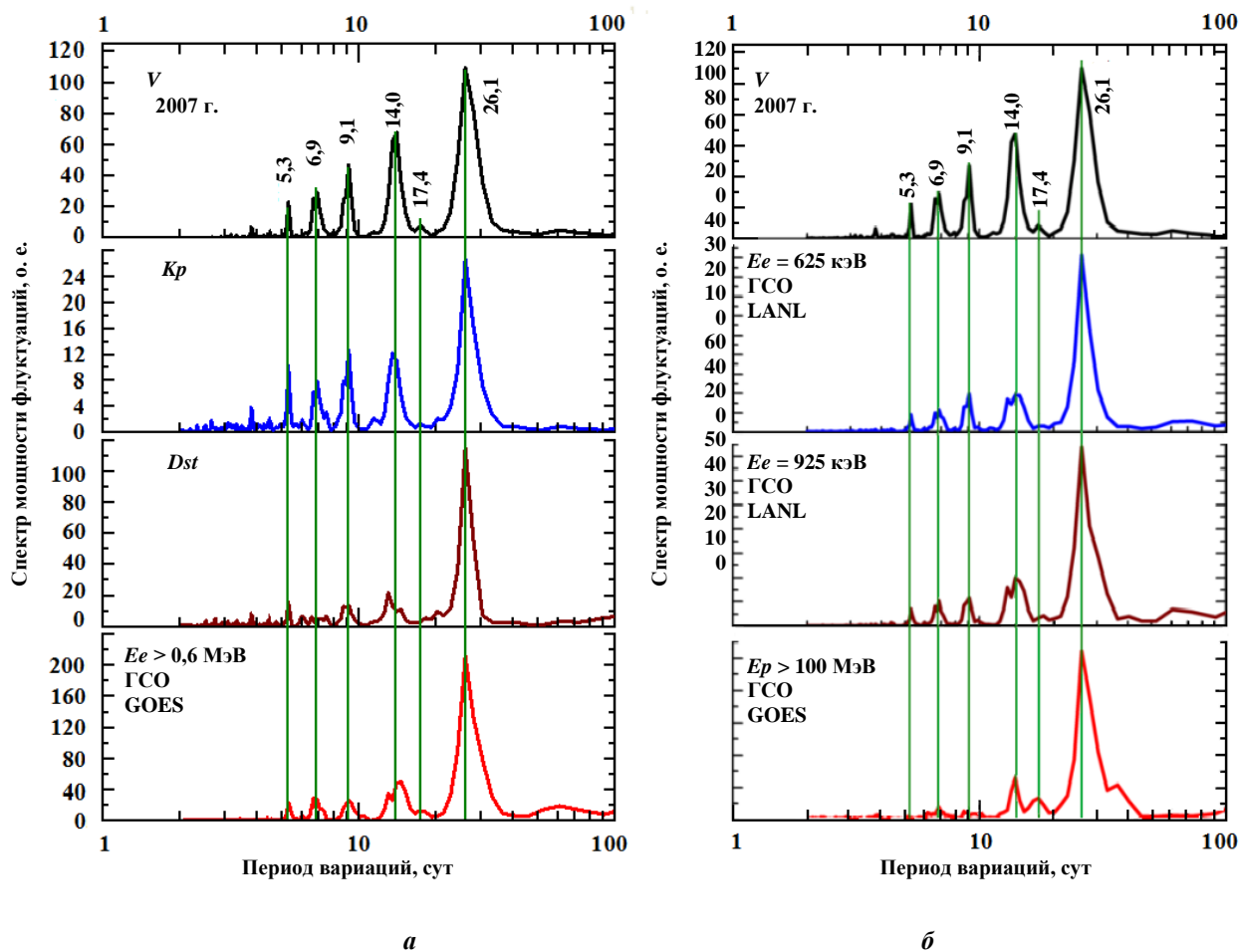


Рис. 7. Для периода с 1 января по 31 декабря 2007 гг. показаны спектры мощности флуктуаций скорости солнечного ветра вблизи магнитосферы Земли,  $Kp$ -индекса геомагнитной активности,  $Dst$ -вариаций; интегрального потока электронов на геостационарной орбите с  $Ee > 0,6$  МэВ (а); дифференциального потока электронов с  $Ee = 625$  кэВ и  $Ee = 925$  кэВ; интегрального потока протонов галактических космических лучей с  $Ep > 100$  МэВ на геостационарной орбите (б)

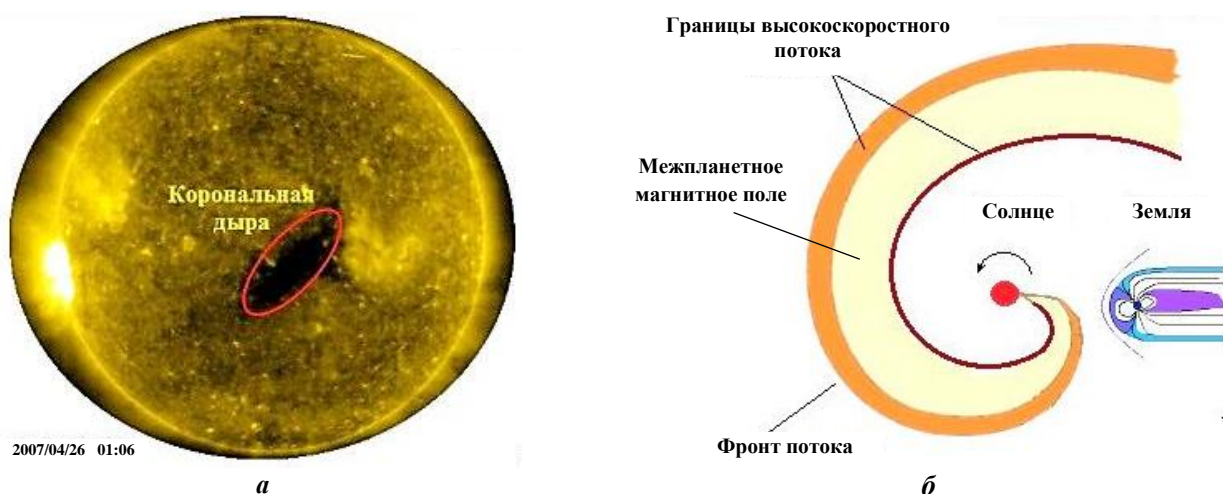


Рис. 8. Фотография Солнца в рентгеновских лучах (корональная дыра обведена красным) (а); схема струи рекуррентного высокоскоростного потока плазмы, вытекающая из корональной дыры, вдоль силовых линий межпланетного магнитного поля (б)

эту роль играют рекуррентные (повторяющиеся с каждым оборотом Солнца вокруг своей оси) высокоскоростные потоки солнечной плазмы, вытекающие из корональных дыр. Например, результатом такой работы является то, что изменение интенсивности потока частиц ГКЛ (см. рис. 8, б) происходит с тем же периодом, что и изменения скорости солнечного ветра.

Межпланетное магнитное поле неоднородно. Кроме спиралеобразного регулярного магнитного поля в межпланетном пространстве присутствуют магнитные неоднородности. Упрощенно мы можем представить их как магнитные облака разного масштаба. По этой причине все заряженные частицы, в том числе и частицы ГКЛ, рассеиваются на этих неоднородностях и распространяются в межпланетной среде только диффузионным путем. Заметим, что в межзвездной среде заряженные частицы также не могут распространяться прямолинейно, они тоже распространяются посредством диффузии, постоянно рассеиваются на магнитных неоднородностях в межзвездном пространстве.

Такие быстро движущиеся крупномасштабные структуры, как высокоскоростные рекуррентные потоки плазмы и ударные волны от солнечных вспышек имеют важную особенность, они ускоряют частицы, которые они выметают (выталкивают) из межпланетного пространства. Как теннисная ракетка передает часть своей кинетической энергии при ударе теннисному шару, так же ударная волна передает часть своей энергии частицам среды, с которой она сталкивается. Такой процесс для одной и той же частицы может повторяться многократно, каждый раз, когда частица, отразившись от ударной волны, рассеивается на магнитных неоднородностях ММП в области перед ударной волной и в результате рассеяния возвращается к ударной волне. При повторном столкновении с быстро движущейся ударной волной она получает новую порцию кинетической энергии. И это может повторяться снова и снова. С увеличением энергии частицы увеличивается длина свободного пробега частицы в межпланетном пространстве (интервал между двумя столкновениями с магнитными неоднородностями). Уско-

рение частицы прекращается, когда частица в результате многократного столкновения с ударной волной получает достаточное количество энергии, чтобы выйти из области ускорения [10 – 12]. Напомним, что частицы ГКЛ – это частицы ускоренные ударными волнами от вспышек сверхновых звезд. Происхождение частиц ГКЛ подробно рассмотрено в работе [11]. При столкновении высокоскоростного потока плазмы солнечного ветра с магнитосферой планеты часть кинетической энергии потока плазмы, посредством цепочки физических процессов, трансформируется в кинетическую энергию электронов радиационных поясов [13, 14]. Этим объясняется возрастание потоков релятивистских электронов в магнитосфере Земли во время мощных геомагнитных возмущений (см. рис. 8). Поясним, частицы называются релятивистскими, если их кинетическая энергия сравнима или больше их собственной энергии покоя  $E = mc^2$ . Для таких частиц необходимо учитывать релятивистские эффекты, поскольку они движутся со скоростями, близкими к скорости света [2].

### Выводы

1. Значительное возрастание геомагнитной активности в 2024 г. указывает на завершение почти 20-летнего периода низкой солнечной и геомагнитной активности.
2. Начиная от спада 23-го цикла до максимума 25-го цикла, был самый продолжительный период низкой геомагнитной активности за всю историю наблюдения.
3. На спаде 23-го и 24-го циклов спектр вариаций  $Kp$ -индекса геомагнитного поля был дискретный, существовало 5 выделенных частот.
4. На спаде 23-го цикла солнечной активности амплитуда  $Kp$ -индекса со временем на разных частотах менялась несинхронно.
5. На спаде 23-го цикла наблюдалось со временем несущественное смещение частоты вариации  $Kp$ -индекса в низкочастотную область.
6. В 2007 г. частоты  $Dst$ -вариаций,  $Kp$ -индекса, потоков релятивистских электронов внешнего радиационного пояса и потока частиц ГКЛ совпадают с частотами вариаций скорости солнечного ветра.

### Список источников

1. Space weather. Database of parameters of the magnetosphere and interplanetary medium [Электронный ресурс] // SPACE RESEARCH LABORATORY : [сайт]. URL : <http://d54x.ru/Space-weather-data.aspx> (дата обращения: 07.07.2025).
2. Безродных И. П., Тютнев А. П., Семенов В. Т. Радиационные эффекты в космосе. В 3-х частях. Часть 1. Радиация в околоземном космическом пространстве [Электронный ресурс]. М. : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2014. 106 с. URL : <http://d54x.ru/articles/02/201401.pdf> (дата обращения: 07.07.2025).
3. Хемминг Р. В. Цифровые фильтры. М. : Советское радио, 1980. 224 с.
4. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. М. : Мир, 1978. 848 с.

5. Ротанова Н. М. О спектрально-временном анализе значений элементов геомагнитного поля // Геомагнетизм и аэронавигация. 1981. Т. 21. № 3. С. 525–530.
6. Вариации потоков ионизирующих излучений в магнитосфере Земли с частотой вращения Солнца [Электронный ресурс] / И. П. Безродных [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2022. Т. 187. № 2. С. 34–42. URL : <https://jurnal.vniiem.ru/text/187/34-42.pdf> (дата обращения: 07.07.2025).
7. Влияние рекуррентных высокоскоростных потоков солнечного ветра на формирование структуры энергетических спектров электронов на геостационарной орбите [Электронный ресурс] / И. П. Безродных [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2017. Т. 156. № 1. С. 33–49. URL : <https://jurnal.vniiem.ru/text/156/33-49.pdf> (дата обращения: 07.07.2025).
8. Формирование периодических структур в потоках солнечного ветра и в магнитосфере Земли в период минимума солнечной активности 2006 – 2010 гг. [Электронный ресурс] / И. П. Безродных [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2015. Т. 145. № 2. С. 27–41. URL : <https://jurnal.vniiem.ru/text/145/27-41.pdf> (дата обращения: 07.07.2025).
9. Структура энергетических спектров потоков электронов внешнего радиационного пояса Земли и динамика поглощенной дозы радиации в период минимума солнечной активности в 2007 г. и 2009 г. [Электронный ресурс] / И. П. Безродных [и др.] // Материалы четвертой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. Приложение за 2016 год. М. : АО «Корпорация «ВНИИЭМ». 2017. С. 300–309. URL : <http://d54x.ru/articles/02/201702.pdf> (дата обращения: 07.07.2025).
10. Крымский Г. Ф. Регулярный механизм ускорения заряженных частиц на фронте ударной волны // Докл. АН СССР. 1977. Т. 234. № 6. С. 1306–1308.
11. Генерация космических лучей ударными волнами / Е. Г. Бережко [и др.]. Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1988. 182 с.
12. Исследование временных характеристик процесса ускорения заряженных частиц на ударном фронте / Г. Ф. Крымский [и др.] // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1978. Т. 42. № 5. С. 1070–1074.
13. Беспалов П. А., Трахтенгерц В. Ю. Альфвеновские мазоры. 1986. 190 с.
14. Потоки энергичных электронов вблизи магнитопаузы и на геостационарной орбите. Анализ экспериментальных результатов и механизм генерации / И. П. Безродных [и др.] // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1984. Т. 48. № 11. С. 2165–2167.

### References

1. Space weather. Database of parameters of the magnetosphere and interplanetary medium [Electronic resource] // SPACE RESEARCH LABORATORY : [website]. URL : <http://d54x.ru/Space-weather-data.aspx> (date of access: 07.07.2025).
2. Bezrodnykh I. P., Tyutnev A. P., Semenov V. T. Radiation effects in space. In 3 parts. Part 1. Radiation in near-Earth space [Electronic resource]. M. : JSC "VNIIEM Corporation", 2014. 106 p. URL : <http://d54x.ru/articles/02/201401.pdf> (date of access: 07.07.2025).
3. Hemming R. V. Digital filters. M. : Sovetskoe Radio, 1980. 224 p.
4. Rabiner L., Gould B. Theory and Application of Digital Signal Processing. M. : Mir, 1978. 848 p.
5. Rotanova N. M. On Spectral-Time Analysis of Geomagnetic Field Element Values // Geomagnetism and Aeronomy. 1981. Vol. 21. No. 3. Pp. 525–530.
6. Variations in Ionizing Radiation Fluxes in the Earth's Magnetosphere with the Sun's Rotation Frequency [Electronic resource] / I. P. Bezrodnykh [et al.] // Electromechanical Matters. VNIIEM studies. 2022. Vol. 187. No. 2. Pp. 34–42. URL : <https://jurnal.vniiem.ru/text/187/34-42.pdf> (date of access: 07.07.2025).
7. Influence of recurrent high-speed solar wind flows on the formation of the structure of electron energy spectra in the geostationary orbit [Electronic resource] / I. P. Bezrodnykh [et al.] // Electromechanical Matters. VNIIEM studies. 2017. Vol. 156. No. 1. Pp. 33–49. URL : <https://jurnal.vniiem.ru/text/156/33-49.pdf> (date of access: 07.07.2025).
8. Formation of periodic structures in solar wind flows and in the earth's magnetosphere during the minimum solar activity of 2006 – 2010 [Electronic resource] / I. P. Bezrodnykh [et al.] // Electromechanical Matters. VNIIEM studies. 2015. Vol. 145. No. 2. Pp. 27–41. URL : <https://jurnal.vniiem.ru/text/145/27-41.pdf> (date of access: 07.07.2025).
9. Structure of energy spectra of electron fluxes of the Earth's outer radiation belt and dynamics of the absorbed radiation dose during the minimum solar activity in 2007 and 2009 [Electronic resource] / I. P. Bezrodnykh [et al.] // Proceedings of the Fourth International Scientific and Technical Conference. "Actual Problems of Creating Space Systems for Remote Sensing of the Earth". Electromechanical Matters. VNIIEM studies. Supplement for 2016. M. : JSC "VNIIEM Corporation", 2017. P. 300–309. URL : <http://d54x.ru/articles/02/201702.pdf> (date of access: 07.07.2025).
10. Krymsky G. F. Regular mechanism of acceleration of charged particles at the shock wave front // Dokl. AN SSSR, 1977. Vol. 234. No. 6. Pp. 1306–1308.
11. Generation of cosmic rays by shock waves / E. G. Berezhko [et al.]. Novosibirsk : Nauka. Sib. otd-nie, 1988. 182 p.
12. Study of time characteristics of the process of acceleration of charged particles at the shock front / G. F. Krymsky [et al.] // Izv. AN SSSR, Ser. fiz. 1978. Vol. 42. № 5. P. 1070–1074.



13. Bepalov P. A., Trakhtengerts V. Yu. Alfven Mazors. 1986. 190 p.

14. Fluxes of energetic electrons near the magnetopause and in geostationary orbit. Analysis of experimental results and generation mechanism / I. P. Bezrodnykh [et al.] // Izv. USSR Academy of Sciences. Phys. Ser. 1984. Vol. 48. No. 11. Pp. 2165–2167.

*Поступила в редакцию 07.08.2025*

*The article was submitted 07.08.2025*

---

#### **Информация об авторах**

**Иннокентий Петрович Безродных** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, т. +7 (495) 333-20-00, e-mail: d54x@mail.ru;

**Александр Александрович Мусалитин** – старший научный сотрудник, т. +7 (495) 366-01-47, e-mail: d18188@mail.ru.

#### **Information about the authors**

**Innokenty Petrovich Bezrodnykh** – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, t. +7 (495) 333-20-00, e-mail: d54x@mail.ru;

**Alexander Aleksandrovich Musalitin** – Senior Researcher, t. +7 (495) 366-01-47, e-mail: d18188@mail.ru.