

КОСМИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА. КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ. ИССЛЕДОВАНИЕ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

УДК 523.9-7

АСИММЕТРИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В СЕВЕРНОМ И ЮЖНОМ ПОЛУШАРИЯХ ЗЕМЛИ

И. П. Безродных, М. В. Кожухов, А. А. Мусалитин

На основании анализа экспериментальных данных Kp -индекса геомагнитной активности, за период с 1 января 1932 года по 31 декабря 2023 года, показано, что геомагнитно-спокойные периоды бывают чаще зимой, а геомагнитно-возмущенные периоды бывают чаще летом. Отсутствие симметрии в амплитуде сезонных (зима – лето) вариаций возмущенности геомагнитного поля, указывает на то, что реакция геомагнитного поля на проявление солнечной активности в Северном и Южном полушариях Земли не одинакова. Известно, что степень возмущения геомагнитного поля зависит от проводимости среды, в которую погружены силовые линии магнитного поля. Площади океанов, льдов, суши и, соответственно, их суммарная проводимость в Северном и Южном полушариях различны. Вероятно, это является причиной асимметрии интенсивности геомагнитных возмущений в Северном и Южном полушариях.

Ключевые слова: геомагнитное поле, геомагнитная активность, солнечная активность, проводимость среды, асимметрия, полушария Земли.

Введение

Наше предположение, что динамика возмущенности геомагнитного поля в разных полушариях Земли может отличаться друг от друга, основано на открытии эффекта береговой линии, суть которого состоит в том, что очертания полярных сияний повторяют очертания береговой линии морского побережья [1 – 4]. Фактически этот эффект указывает на то, что динамика частиц, выпадающих из радиационного пояса Земли (РПЗ) в ионосферу [5], зависит от проводимости среды, в которую погружены силовые магнитные линии радиационного пояса. Если площадь морской поверхности, суши и ледяного покрова в Северном полушарии отличается от соответствующих площадей в Южном полушарии, то можно ожидать, что динамика выпадающих частиц из РПЗ и геомагнитная возмущенность также будут отличаться. Для проверки этого предположения достаточно исследовать сезонные (зима – лето) вариации геомагнитного поля. Если частота событий возмущений геомагнитного поля зимой отличается от частоты событий возмущений летом, то это можно считать доказательством того, что динамика физических процессов в магнитосфере Земли в Южном и Северном полушариях отличается друг от друга. Под частотой возмущений мы понимаем, как часто они происходили за последние 90 лет с определенной амплитудой. Под амплитудой возмущения мы понимаем амплитуду колебания (дрожание) силовых линий магнитного поля. В период геомагнитных возмущений мощность этих возмущений грубо можем оценить по амплитуде и скорости колебания магнитной стрелки компаса. Но это слишком упрощенно. В нашем случае для оценки степени возмущенности геомагнитного поля мы использовали 3-часовые значения Kp -индекса геомагнитной активности.

Анализ сезонных вариаций геомагнитного поля

Для анализа возмущенности геомагнитного поля использовались 3-часовые значения Kp -индекса геомагнитной активности за период с 1 января 1932 г. по 31 декабря 2023 г. [6]. Всего использовалось 268824 событий со значениями Kp от 0 до 9. На рис. 1 приведен спектр 3-часовых значений Kp -индекса. Наиболее часто (24087 раз по 3 часа) наблюдались периоды с низкой степенью возмущенности геомагнитного поля, соответствующей $Kp = 1$. Начиная с этого значения Kp , амплитуда спектра регулярно уменьшается с увеличением значения Kp . Но после $Kp = 8$ характер падения спектра меняется. Становится очевиден недостаток событий с экстремально большим возмущением геомагнитного поля $Kp = 9$.

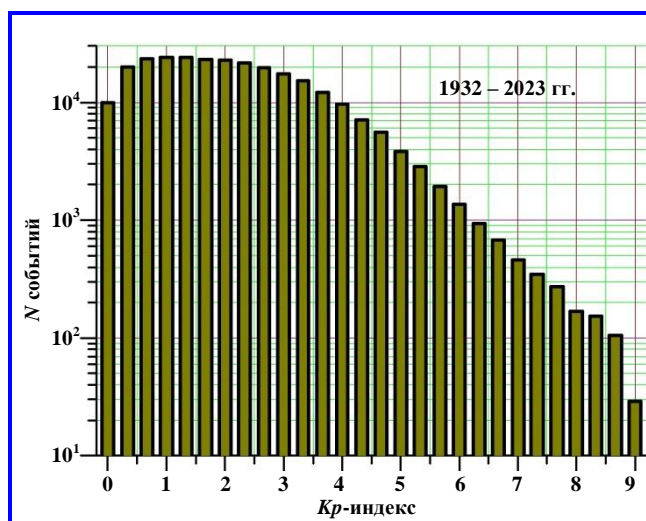


Рис. 1. Приведен спектр 3-часовых значений Kp -индекса за период с начала января 1932 г. по конец декабря 2023 г.

На рис. 2 показаны геомагнитные возмущения с $Kp = 7$ и до $Kp = 9$. Геомагнитная активность представляет собой реакцию на солнечную активность. Исходя из данных по геомагнитной активности, можно утверждать, насколько активно было Солнце в тот или иной период. Мы исследуем период с 1932 по 2023 гг. включительно. Период высокой солнечной активности (судя по степени возмущенности геомагнитного поля) наблюдался с 16 апреля 1938 г. по 30 октября 2003 г. [7]. **С конца 2003 г. начались ослабления солнечной и геомагнитной активностей**, это, по-видимому, объясняет недостаток событий со значением $Kp = 9$ в спектре, приведенном на рис. 1.

За весь период наблюдения за состоянием геомагнитного поля в 9918 случаях 3-часовые значения Kp были равны 0 [8]. Для этих периодов можно считать, что геомагнитное поле было спокойное. На рис. 3 показано распределение числа событий с $Kp = 0$ по месяцам. Если бы динамика электромагнитных процессов, отвечающих за возмущения геомагнитного поля в магнитосфере Земли в Северном и Южном полушариях, была одинаковой, то число геомагнитно-спокойных периодов зимой и летом было бы одинаково. Это основное условие симметрии в реакции Северного и Южного полушарий Земли на состояние солнечной активности. Но в реальности мы наблюдаем явное нарушение симметрии. На рис. 3 видно, что наибольшее число периодов со спокойным геомагнитным полем наблюдается в зимнее время. Когда в Северном полушарии зима, происходит чаще ослабление геомагнитной активности, но когда в Южном полушарии зима, ослабление геомагнитной активности происходит реже. Реакция геомагнитного поля на одни и те же условия в Южном и Северном полушариях совершенно различная.

Рассмотрим случаи, когда наблюдались слабые геомагнитные возмущения, например события, при которых $Kp = 1$. На рис. 4 показано распределение по месяцам числа событий, при которых 3-часовые значения Kp равны единице [9]. На этом рисунке мы снова наблюдаем нарушение симметрии. Когда в Северном полушарии лето, то довольно часто солнечная активность приводит к усилению геомагнитной возмущенности, но когда лето в Южном полушарии, солнечная активность реже приводит к усилению повышенной геомагнитной возмущенности до такого же уровня ($Kp = 1$). Обратим внимание, что именно в июле наблюдаются наиболее частые возмущения геомагнитного поля до значений $Kp = 1$. Приведенные экспериментальные данные подтверждают предположение, что при одних и тех же условиях возмущенность геомагнитного поля в Северном

и Южном полушариях различная. Это наблюдается в периоды, когда геомагнитное поле спокойное ($Kp = 0$) либо слабо возмущено ($Kp = 1$), то есть в этих случаях наблюдается нарушение симметрии процессов, протекающих в Северном и Южном полушариях Земли.

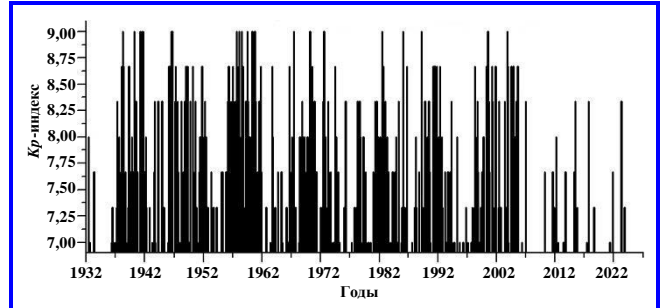


Рис. 2. Распределение по годам числа экстремально больших геомагнитных возмущений. Число событий со значением Kp -индекса от 7 до 9 включительно – 1533 3-часовых значений

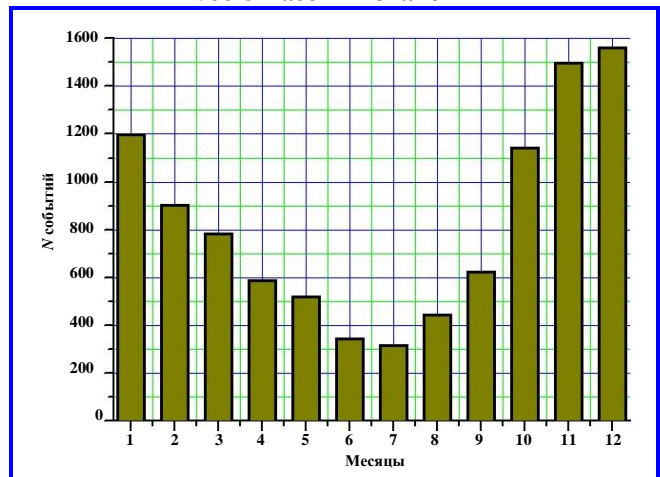


Рис. 3. Распределение по месяцам числа событий, при которых 3-часовые значения Kp -индекса равны нулю. Всего за период с 1932 по 2023 гг. наблюдалось 9918 событий

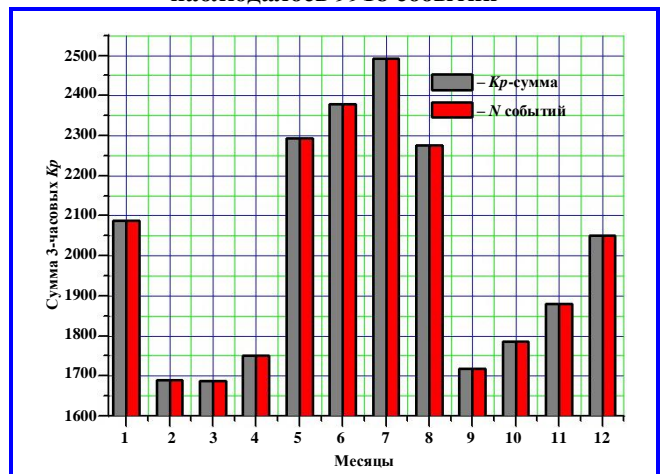


Рис. 4. Распределение по месяцам числа событий и суммы 3-часовых значений $Kp = 1$. Всего за период с 1932 по 2023 гг. наблюдалось 24087 событий

При увеличении геомагнитной возмущенности восстанавливается симметрия процессов, протекающих в Северном и Южном полушариях, и начинает проявляться сезонная зависимость (рис. 5). Реакция геомагнитного поля в Северном и Южном полушариях на одни и те же условия становится одинаковой. Но все еще (при $Kp = 3$) сезонная зависимость частоты геомагнитных возмущений проявляет себя достаточно слабо. На рис. 6 показано распределение по месяцам числа событий и суммы 3-часовых значений Kp , которые находились в пределах от 4 до 7 включительно. Всего за период с 1932 по 2023 гг. наблюдалось 34426 событий с такими значениями Kp -индекса. В отличие от событий с $Kp = 3$, в событиях с Kp от 4 до 7 хорошо видна сезонная (весна – осень) зависимость числа событий с такими значениями Kp . Это указывает на то, что реакция возмущения геомагнитного поля в Северном и Южном полушариях Земли на солнечную активность одинакова.

На рис. 7 показано распределение по месяцам числа событий с 3-часовыми значениями $Kp = 7$ и суммы 3-часовых значений $Kp = 7$ [10]. Всего за период с 1932 по 2023 гг. наблюдалось 462 события с таким значением Kp . Так же, как и на рис. 6, на данном рисунке хорошо видна сезонная (весна – осень) зависимость числа возмущений геомагнитного поля с такими значениями Kp -индекса. При экстремально больших возмущениях геомагнитного поля $Kp = 8$ и более характер распределения значений Kp -индекса по месяцам меняется.

Слабые геомагнитные возмущения со значениями $Kp = 1$ и меньше ассоциируются в основном с воздействием всплесков жесткого электромагнитного излучения Солнца на верхние слои атмосферы Земли. Это приводит к уменьшению сопротивления на дневной стороне ионосферы и перестройке токовой системы в магнитосфере Земли. Геомагнитные возмущения со значениями $Kp = 2$ и более в основном ассоциируются с воздействием на магнитосферу Земли рекуррентных высокоскоростных потоков плазмы солнечного ветра, нерекуррентных высокоскоростных потоков плазмы и межпланетных ударных волн, источником которых являются корональные дыры и солнечные вспышки. Вероятно, сезонная зависимость геомагнитных возмущений связана с положением геомагнитной оси относительно линии Земля – Солнце в сочетании с воздействием на магнитосферу Земли рекуррентных высокоскоростных потоков солнечной плазмы [11].

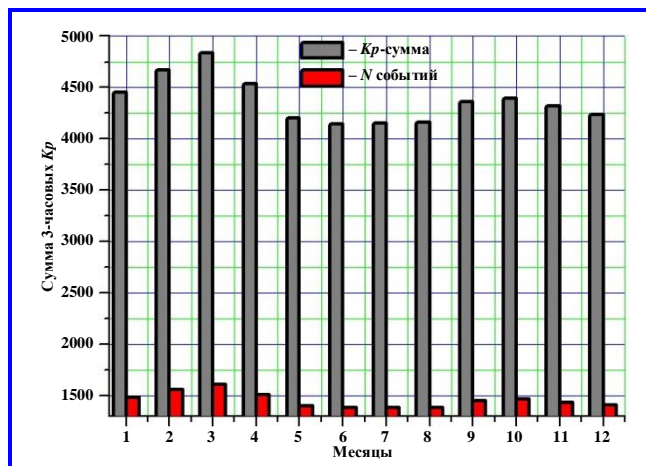


Рис. 5. Распределение по месяцам числа событий и суммы 3-часовых значений $Kp = 3$. Всего за период с 1932 по 2023 гг. наблюдалось 17485 событий

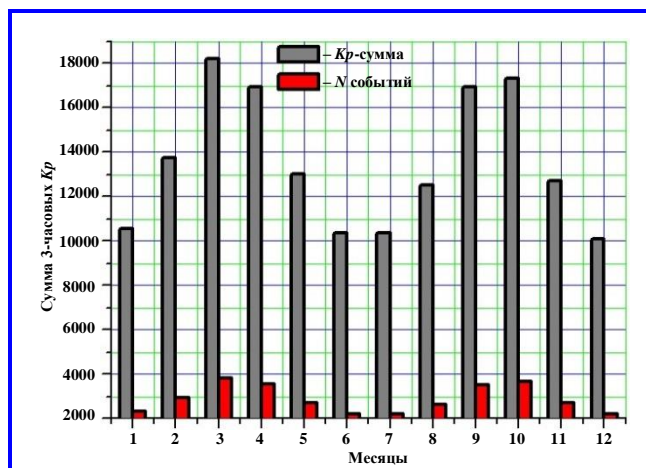


Рис. 6. Распределение по месяцам года числа событий и суммы 3-часовых значений $Kp = (4 - 7)$. Всего за период с 1932 по 2023 гг. наблюдалось 34426 событий с данными значениями Kp

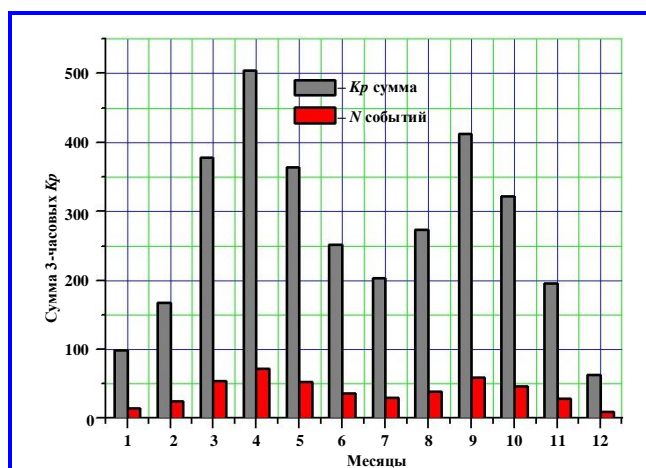


Рис. 7. Распределение по месяцам числа событий и суммы 3-часовых значений $Kp = 7$. Всего за период с 1932 по 2023 гг. наблюдалось 462 события

На рис. 8 показано распределение по месяцам числа событий и суммы 3-часовых значений сверхмощных возмущений геомагнитного поля со значениями $Kp = 8$. Всего за период с 1932 по 2023 гг. наблюдалось 169 таких событий. Обращает на себя внимание то, что сохраняется сезонная вариация и сверхмощные геомагнитные возмущения, в летнее время, наиболее часто наблюдались в июле.

На рис. 9 показано распределение по месяцам числа событий и суммы 3-часовых значений сверхмощных возмущений геомагнитного поля со значениями $Kp = 8,333$. Всего за период с 1932 по 2023 гг. наблюдалось 152 события.

Обращает на себя внимание то, что и в данном случае, сверхмощные геомагнитные возмущения, в летнее время, наиболее часто наблюдались в июле.

На рис. 10 показано распределение по месяцам года числа событий и суммы 3-часовых значений сверхмощных возмущений геомагнитного поля со значениями $Kp = 8,667$. Всего за период с 1932 по 2023 гг. наблюдалось 105 таких событий. Так же, как и в предыдущих случаях обращает на себя внимание то, что сверхмощные геомагнитные возмущения, в летнее время, наиболее часто наблюдались в июле.

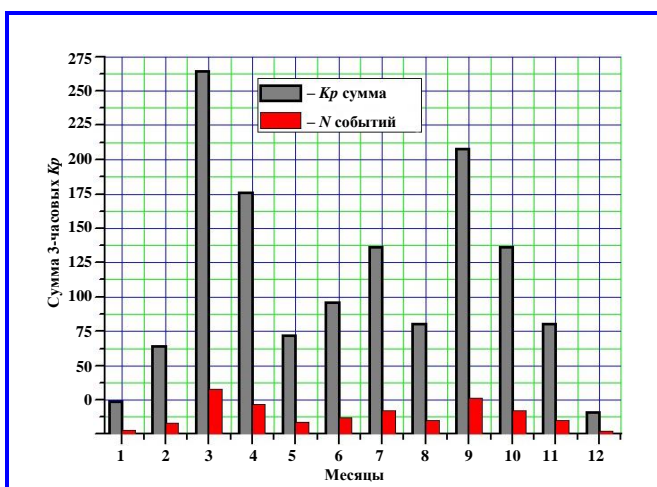


Рис. 8. Распределение по месяцам числа событий и суммы 3-часовых значений $Kp = 8$. Всего за период с 1932 по 2023 гг. наблюдалось 169 событий

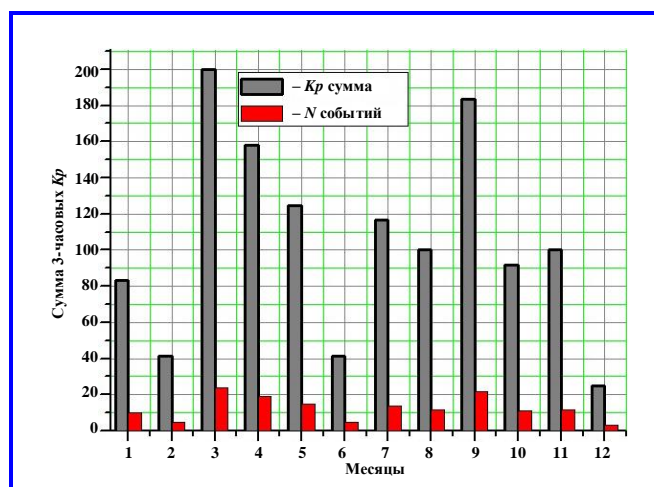


Рис. 9. Распределение по месяцам числа событий и суммы 3-часовых значений $Kp = 8,333$. Всего за период с 1932 по 2023 гг. наблюдалось 152 события

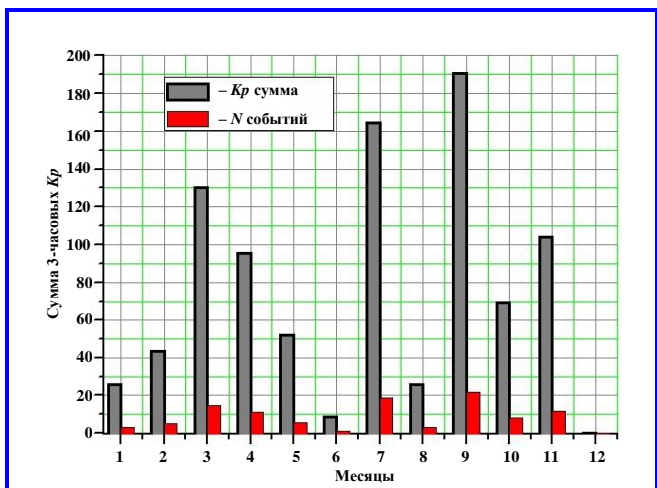


Рис. 10. Распределение по месяцам числа событий и суммы 3-часовых значений $Kp = 8,667$. Всего за период с 1932 по 2023 гг. наблюдалось 105 событий

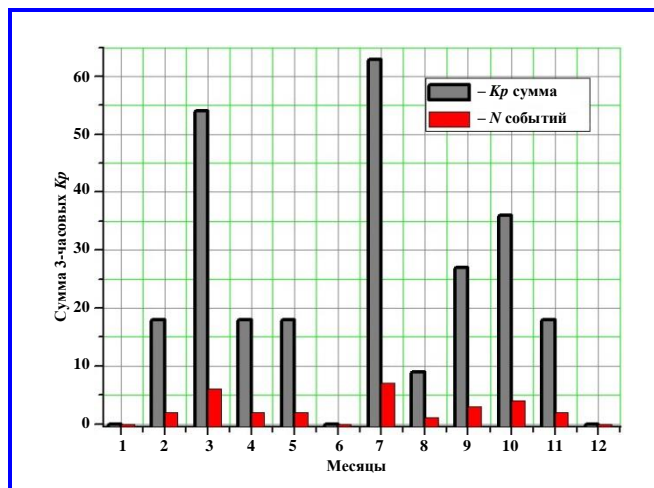


Рис. 11. Распределение по месяцам числа событий и суммы 3-часовых значений $Kp = 9$. Всего за период с 1932 по 2023 гг. наблюдалось 29 событий [7]

Данные, представленные на рис. 8 – 11, дают основание предполагать, что в летнее время с большей степенью вероятности сверхмощные геомагнитные возмущения следует ожидать в июле. То, что сверхмощные геомагнитные возмущения наиболее часто наблюдаются в июле, также указывает на различную реакцию геомагнитного поля в Северном и Южном полушариях Земли на проявление солнечной активности.

Из анализа данных геомагнитной активности за период с 1 января 1932 г. по 31 декабря 2023 г. следует, что с конца 2003 г. началось ослабление геомагнитной активности. Поскольку геомагнитная активность есть следствие солнечной активности, то можно утверждать, что с конца 2003 г. наблюдается ослабление и солнечной активности.

При слабой солнечной активности наблюдается нарушение симметрии отклика геомагнитного поля ($Kp = 1$ и менее) в Северном и Южном полушариях Земли на проявление солнечной активности. При мощной солнечной активности есть основание предполагать, что отклик геомагнитного поля ($Kp = 8$ и более) на солнечную активность также может быть не одинаков в северной и южной части магнитосферы Земли. Следует отметить, что для событий с $Kp = 8$ и более недостаточно статистики для более убедительного заключения.

Литература

1. Надубович, Ю. А. Береговой эффект в полярных сияниях / Ю. А. Надубович. – Москва : Наука, 1967. – 79 с.
2. Надубович, Ю. А. Морфологические исследования полярных сияний (практика и результаты) / Ю. А. Надубович; отв. ред. Н. И. Дзюбенко; Рос. АН, Сиб. отд-ние, Сиб. ин-т земного магнетизма, ионосферы

и распространения радиоволн. – Новосибирск : Наука ; Сиб. изд. фирма, 1992. – 381 с. : ил.

3. Мардерфельд, Б. Е. Береговой эффект в геомагнитных вариациях / Б. Е. Мардерфельд. – 1977. – 80 с.
4. Мардерфельд, Б. Е. Береговой эффект в геомагнитных вариациях и глубинное геоэлектрическое строение прибрежных районов Тихого океана / Б. Е. Мардерфельд. – Владивосток : ДВО АН СССР, 1989. – 180 с.
5. Безродных, И. П. Радиационные эффекты в космосе. В 3-х частях. Часть 1. Радиация в околоземном космическом пространстве / И. П. Безродных, А. П. Тютнев, В. Т. Семенов. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2014. – 106 с. – URL : <http://d54x.ru/articles/02/201401.pdf>.
6. [Индексы геомагнитной активности (Kp , ap), начиная с 1932 года по настоящее время] // Helmholtz-Zentrum Potsdam – Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ : [сайт]. – Potsdam, 2023. – URL : https://kp.gfz-potsdam.de/app/files/Kp_ap_since_1932.txt.
7. [Индексы геомагнитной активности ($Kp = 9$), начиная с 1932 по 2023 гг.] // SPACE RESEARCH LABORATORY : [сайт]. – URL : <http://d54x.ru/4/kp1932-2023-29-9.zip>.
8. [Индексы геомагнитной активности ($Kp = 0$), начиная с 1932 по 2023 гг.] // SPACE RESEARCH LABORATORY : [сайт]. – URL : <http://d54x.ru/4/kp1932-2023-9918-0.zip>.
9. [Индексы геомагнитной активности ($Kp = 1$), начиная с 1932 по 2023 гг.] // SPACE RESEARCH LABORATORY : [сайт]. – URL : <http://d54x.ru/4/kp1932-2023-24087-1.zip>.
10. [Индексы геомагнитной активности ($Kp = 7$), начиная с 1932 по 2023 гг.] // SPACE RESEARCH LABORATORY : [сайт]. – URL : <http://d54x.ru/4/kp1932-2023-462-7.zip>.
11. Динамика Kp -индекса геомагнитной активности для семи солнечных циклов (период 1932 – 2014 годов). Сезонные вариации / И. П. Безродных, Е. И. Морозова, А. А. Петрукович [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2018. – Т. 167. – № 6. – С. 48–56. – URL : <https://jurnal.vniem.ru/text/167/48-56.pdf>.

Поступила в редакцию 07.06.2024

Иннокентий Петрович Безродных, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, т. 8 (495) 333-20-00, e-mail: d54x@mail.ru. (ИКИ РАН).

Максим Владимирович Кожухов, кандидат технических наук, начальник лаборатории, т. 8 (495) 366-38-38, e-mail: includmax@gmail.com.

Александр Александрович Мусалитин, научный сотрудник, т. 8 (495) 366-01-47, e-mail: d18188@mail.ru. (АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

ASYMMETRY OF THE INTENSITY OF GEOMAGNETIC DISTURBANCES IN THE NORTHERN AND SOUTHERN HEMISPHERES OF THE EARTH

I. P. Bezrodnykh, M. V. Kozhukhov, A. A. Musalitin

Based on the analysis of experimental data of the Kp -index of geomagnetic activity for the period from January 1, 1932 to December 31, 2023, it is shown that geomagnetically quiet periods occur more often in winter, and geomagnetically disturbed periods occur more often in summer.

The absence of symmetry in the amplitude of seasonal (winter-summer) variations in the disturbance of the geomagnetic field indicates that the reaction of the geomagnetic field to the manifestation of solar activity in the northern and southern hemispheres of the Earth, under the same conditions, is different. It is known that the degree of disturbance of the geomagnetic field depends on the conductivity of the medium in which the magnetic field lines are immersed. The areas of oceans, ice, land, and, accordingly, their total conductivity in the northern and southern hemispheres are different. Probably, this is the causal asymmetry of the intensity of geomagnetic disturbances in the northern and southern hemispheres.

Key words: geomagnetic field, geomagnetic activity, solar activity, medium conductivity, asymmetry, hemispheres of the Earth.

References

1. Nadubovich, Yu. A. Coastal effect in polar lights / Yu. A. Nadubovich. – Moscow : Nauka, 1967. – 79 p.
2. Nadubovich, Yu. A. Morphological studies of polar lights: (Practice and results) / Yu. A. Nadubovich ; responsible editor N. I. Dzyubenko ; Rus. Academy of Sciences, Siberian Branch, Siberian Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation. – Novosibirsk : Nauka ; Sib. publishing house, 1992. – 381 p. : ill.
3. Marderfeld, B. E. Coastal effect in geomagnetic variations / B. E. Marderfeld. – 1977. – 80 p.
4. Marderfeld, B. E. Coastal effect in geomagnetic variations and deep geoelectric structure of coastal areas of the Pacific Ocean / B. E. Marderfeld. – Vladivostok : Far Eastern Branch of the USSR Academy of Sciences, 1989. – 180 p.
5. Bezrodnykh, I. P. Radiation effects in space. In 3 parts. Part 1. Radiation in near-Earth space / I. P. Bezrodnykh, A. P. Tyutnev, V. T. Semenov. – Moscow : JSC «VNIIEМ Corporation», 2014. – 106 p. – URL : <http://d54x.ru/articles/02/201401.pdf>.
6. [Geomagnetic activity indices (Kp , ap) from 1932 to the present] // Helmholtz-Zentrum Potsdam – Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ : [website]. – Potsdam, 2023. – URL : https://kp.gfz-potsdam.de/app/files/Kp_ap_since_1932.txt.
7. [Geomagnetic activity indices ($Kp = 9$) from 1932 to 2023] // SPACE RESEARCH LABORATORY : [website]. – URL : <http://d54x.ru/4/kp1932-2023-29-9.zip>.
8. [Geomagnetic activity indices ($Kp = 0$) from 1932 to 2023] // SPACE RESEARCH LABORATORY : [website]. – URL : <http://d54x.ru/4/kp1932-2023-9918-0.zip>.
9. [Geomagnetic activity indices ($Kp = 1$) from 1932 to 2023] // SPACE RESEARCH LABORATORY : [website]. – URL : <http://d54x.ru/4/kp1932-2023-24087-1.zip>.
10. [Geomagnetic activity indices ($Kp = 7$) from 1932 to 2023] // SPACE RESEARCH LABORATORY : [website]. – URL : <http://d54x.ru/4/kp1932-2023-462-7.zip>.
11. Dynamics of the geomagnetic activity index Kp for seven solar cycles (the period 1932 – 2014). Seasonal variations / I. P. Bezrodnykh, E. I. Morozova, A. A. Petrukovich [et. al] // Problems of Electromechanics. Proceedings of VNIIEМ. – Moscow : JSC «Corporation «VNIIEМ», 2018. – Vol. 167. – No. 6. – P. 48–56. – URL : <https://jurnal.vniiem.ru/text/167/48-56.pdf>.

Innokentii Petrovich Bezrodnykh, Candidate of Physics and Mathematics (Ph. D.), Senior Researcher,
t. 8 (495) 333-20-00, e-mail: d54x@mail.ru.

(Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IKI RAN)).

Maxim Vladimirovich Kozhukhov, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Head of Laboratory, t. 8 (495)366-38-38.
e-mail: includmax@gmail.com.

Aleksandr Aleksandrovich Musalitin, Researcher, t. 8 (495) 366-01-47, e-mail: d18188@mail.ru.
(JSC «VNIIEМ Corporation»).