

Геофизические явления в период всплеска солнечной активности в октябре – ноябре 2021 года

В. Л. Янчуковский, А. Ю. Белинская

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН
Новосибирск, 630090, Россия

E-mails: YanchukovskiyVL@ipgg.sbras.ru, BelinskayaAY@ipgg.sbras.ru

Отмечается начало нового 25-го цикла солнечной активности. Первый большой всплеск активности нового цикла охарактеризовался целой серией солнечных вспышек различного класса, которые наблюдались в октябре – ноябре 2021 г. Рассматривается реакция различных геофизических параметров на этот всплеск солнечной активности по результатам непрерывного мониторинга космических лучей, геомагнитного поля и ионосферы в Новосибирске. Солнечные вспышки из этой серии 1 и 2 ноября вызвали большое форбуш-понижение галактических космических лучей (до 13 % на средних широтах), крупнейшую за последние годы геомагнитную бурю и возмущения в ионосфере, а также увеличение числа и магнитуды землетрясений. Ионосферное возмущение, которое 1–3 ноября носило положительный характер, а после начала магнитной бури происходило длительное понижение критической частоты слоя F2 вплоть до 8 ноября, демонстрирует долготный эффект вдоль 52–55° с. ш.

Ключевые слова: солнечная активность, космические лучи, ионосфера, геомагнитная буря

Одобрена к печати: 14.06.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-297-301

Минимальное число солнечных пятен наблюдалось в декабре 2019 г., на основании чего международной группой экспертов было принято считать это время концом 24-го солнечного цикла (<https://www.nasa.gov/press-release/solar-cycle-25-is-here-nasa-noaa-scientists-explain-what-that-means>) и началом нового 25-го цикла солнечной активности (СА). Крупнейшие всплески солнечной активности за последние годы зарегистрированы в конце октября – ноябре 2021 г.

В последние два десятилетия наблюдается общее уменьшение СА, отмеченное на *рис. 1* линией тренда. Два последних цикла СА (23-й и 24-й) имеют максимумы, которые значительно ниже предыдущих 11-летних циклов.

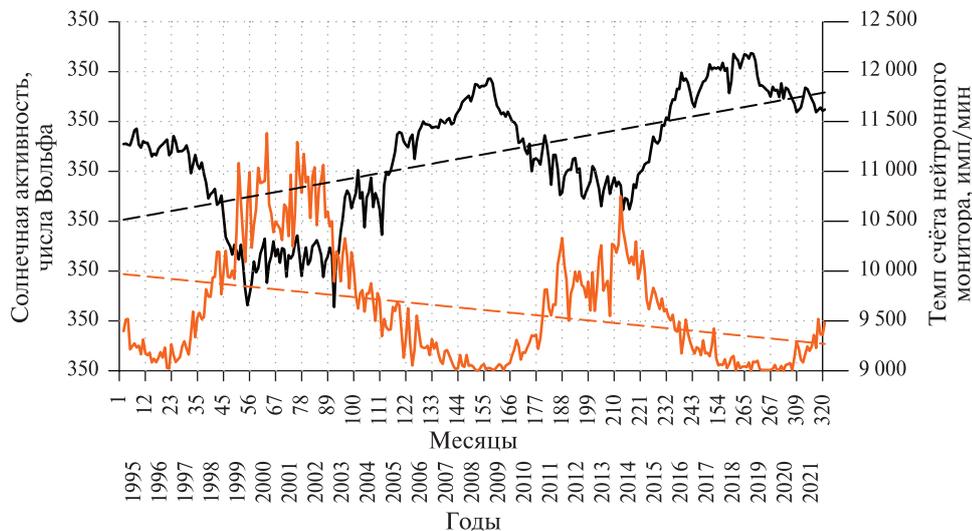


Рис. 1. Среднемесячные значения солнечных пятен (1) и темп счёта нейтронного монитора (2) за 1995–2021 гг.

На *рис. 1* показана СА, представленная среднемесячными числами Вольфа (числом пятен на Солнце) (<https://meteo-dv.ru/geospace/AverageMonthW>), и темп счёта нейтронного монитора 24NM-64 станции космических лучей «Новосибирск» (<http://193.232.24.200/nvbk/main.htm>) в течение последних двух циклов СА. Начало 25-го цикла СА отражается медленным ростом чисел Вольфа и в спаде интенсивности космических лучей, попадающих в атмосферу Земли. Если исходить из того, что скорость роста СА в начале цикла характеризует активность всего цикла, то 25-й цикл СА следует ожидать слабым, в максимуме не превышающем 24-й цикл. Резкое увеличение СА наблюдается с конца октября – начала ноября 2021 г. 28 октября за сутки было зарегистрировано 14 вспышек, из которых две были класса М и одна – класса Х. Все вспышки относятся к одной активной области под номером 2887 (http://www.wdcb.ru/stp/data/Solar_Flare_Events/Fl_XXV.txt). Однако, несмотря на целую серию вспышек, 31 октября на Земле наблюдалась слабая магнитная буря, которая классифицировалась по пятибалльной шкале как буря первого уровня. Ситуация меняется в начале ноября.

Из 20 всех зарегистрированных вспышек в первой половине ноября наблюдалось три сильных вспышки М-класса. Самая сильная из них, уровня М1.7, произошла 2 ноября около 03:00 UT (*англ.* Universal Time, всемирное время) (https://tesis.lebedev.ru/sun_flares.html?m=11&d=2&y=2021). По результатам измерений с помощью космических аппаратов (<http://www.swpc.noaa.gov/products/dscovr-schedule-tracking>) наблюдается возрастание скорости солнечного ветра от 350 до 800 км/с, а также резкий рост температуры и плотности межпланетной плазмы. Это является следствием выброса плотных корональных масс в результате солнечной вспышки.

Высокоскоростной поток плазмы солнечного ветра, распространяясь от Солнца, вызывает резкий спад интенсивности галактических космических лучей (ГКЛ), «выметая» их из окрестности Земли. Наблюдаемый эффект называется форбуш-эффектом космических лучей. На *рис. 2а* представлены результаты наблюдения Форбуш-понижения (ФП) ГКЛ с помощью нейтронного монитора 24NM-64 в Новосибирске в результате солнечной вспышки 2 ноября.

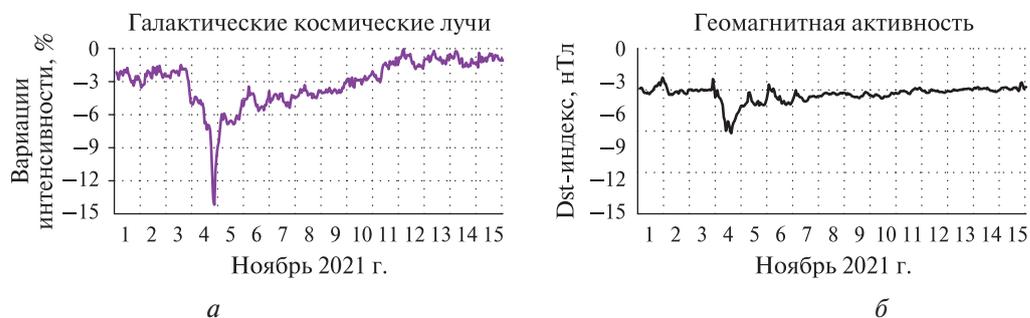


Рис. 2. Вариации галактических космических лучей (*а*) и Dst-индекс геомагнитной активности (*б*) в первой половине ноября 2021 г.

Перед ФП имеется небольшое предповышение – увеличение интенсивности ГКЛ непосредственно перед фронтом ударной волны. Фронт ФП представляет собой две ступени понижения интенсивности. Уменьшение интенсивности начинается после 16:00 UT 3 ноября. Первая ступень ФП продолжается до 23:00 UT 3 ноября и имеет спад интенсивности в 3,25 %. Вторая ступень понижения величиной в 9,25 % наблюдается до 19:00 UT 4 ноября. Таким образом, весь форбуш-эффект составил 12,5 %. Фаза минимума ФП приходится на 19:00 UT 4 ноября. После минимума до 01:00 UT 5 ноября происходит быстрое восстановление интенсивности на 8 %. Затем ФП входит в фазу медленного постепенного восстановления интенсивности ГКЛ.

Двухступенчатость ФП космических лучей, возможно, была вызвана последовательностью из двух сильных солнечных вспышек класса М, которые проследовали одна за другой 1 и 2 ноября. Фронт ударной волны, образованный высокоскоростным потоком плазмы сол-

нечного ветра, достиг магнитосферы Земли в конце 3 ноября. В результате передачи энергии солнечного ветра в магнитосферу 4 ноября на Земле началась магнитная буря (<http://ipg.space.ru/space-weather-review-03-11-2021.html>). Значительные изменения скорости и плотности солнечного ветра вызвали крупные изменения в токах, плазме и полях магнитосферы.

На *рис. 2б* за период с 1 по 15 ноября показан Dst-индекс геомагнитной активности (http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_realtime/202111/index.html), отражающий изменения кольцевого тока магнитосферы во время магнитной бури. Сильные бури обычно связаны с выбросами солнечной корональной массы (*англ.* coronal mass ejection — CME). В период главной фазы бури (4 ноября) Dst-индекс составил -100 нТл. Уменьшение горизонтальной составляющей геомагнитного поля вызывает уменьшение жёсткости геомагнитного обрезания для космических лучей в период геомагнитной бури. Это может вызывать некоторое снижение эффекта Форбуша космических лучей, наблюдаемых в атмосфере (Yanchukovsky et al., 2011). Планетарный Kp-индекс геомагнитной активности в течение первых трёх суток ноября соответствовал спокойным или слабо возмущённым значениям, не превышая 4. Однако в начале 4 ноября он скачком увеличился и превысил уровень 7. При этом Ap-индекс геомагнитной активности, отражающий среднесуточную планетарную амплитуду возмущения геомагнитного поля, составил 7,2 нТл. Это свидетельствует о сильной магнитной буре третьего уровня по 5-балльной шкале.

На *рис. 3* показаны вариации отклонений критической частоты слоя F2 от медианных значений (http://im.ipgg.sbras.ru/?page_id=20, <https://giro.uml.edu/didbase/scaled.php>) во время рассматриваемого периода по данным станций вдоль $52-55^\circ$ с. ш. Ионосферное возмущение демонстрирует долготный эффект: 1–3 ноября оно носило положительный характер и достигало 75 % для области $158-185^\circ$ в. д., тогда как в области $13-37^\circ$ в. д. едва превышало 25 %. После начала магнитной бури наблюдалось длительное понижение критической частоты слоя F2 вплоть до 8 ноября. Подобное поведение ионосферы отмечалось и для сильных магнитных бурь в 24-м цикле СА (см., например, работу (Chernigovskaya et al., 2021)).

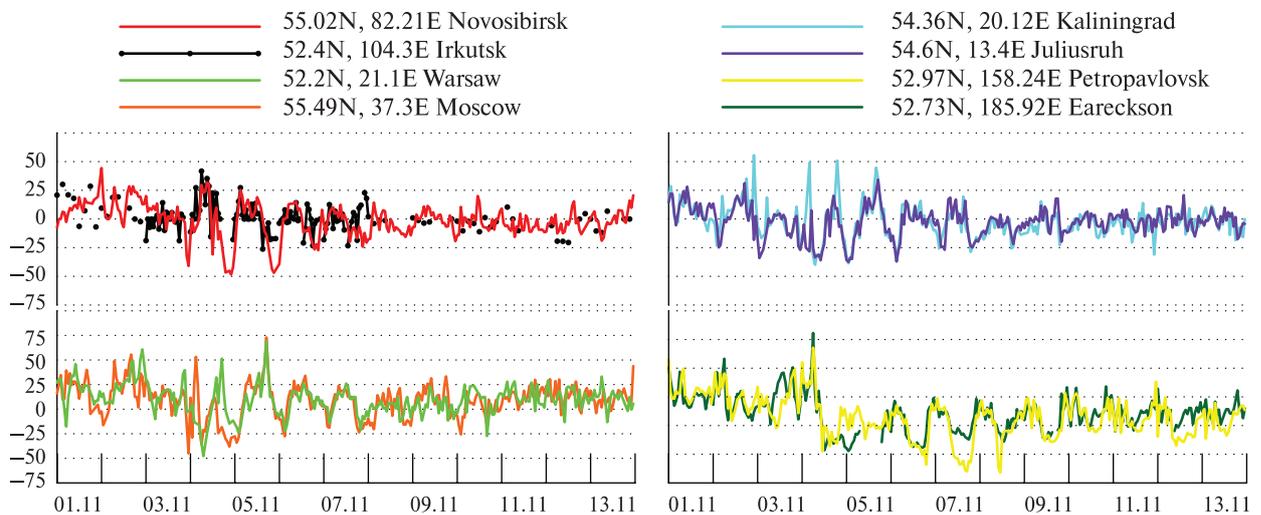


Рис. 3. Вариации отклонений критической частоты слоя F2 от медианных значений с 1 по 13 ноября вдоль $52-55^\circ$ с. ш.

На *рис. 2а* приведены вариации галактических космических лучей, наилучшим образом отражающих момент наибольшей реакции геофизических параметров на всплеск солнечной активности. На *рис. 4* (см. с. 300) представлены все зарегистрированные в этот период землетрясения, которые были отнесены в каталоге (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/browse/significant.php?year=2021>) к сильным («значимость» больше 600). «Значимость» землетрясения определяется комбинацией магнитуды, количества ответов «Вы почувствовали это» и уровня оповещения PAGER (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/nc73506045/pager>).

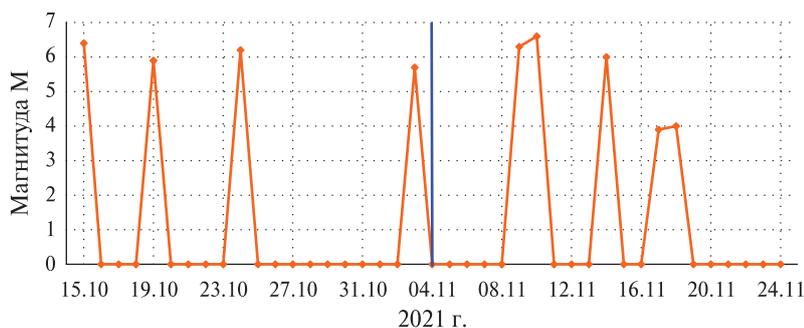


Рис. 4. Распределение числа сильных землетрясений в первой половине ноября 2021 г.

После рассматриваемого события наблюдается увеличение средней магнитуды землетрясений и их повторяемости. Это подтверждает результат, полученный ранее (Янчуковский, 2021), который показал, что число сильных землетрясений увеличивается после форбуш-понижений с некоторым запаздыванием на 6–8 сут.

Таким образом, первый мощный всплеск СА нового 25-го цикла, который ознаменовался целой серией вспышек различного класса в конце октября – начале ноября, вызвал большое форбуш-понижение ГКЛ (до 13 % на средних широтах), крупнейшую за последние годы геомагнитную бурю, возмущение в ионосфере, а также возрастание числа и магнитуды землетрясений. Наблюдаемый тренд СА в течение последних циклов, возможно, указывает на приближение к минимуму векового цикла СА (цикла Гляйсберга) или на наступление минимума Маундера.

Работа выполнена в рамках проекта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № FWZZ-2022-0019.

Литература

1. Янчуковский В. Л. Солнечная активность и сейсмичность Земли // Солнечно-земная физика. 2021. Т. 7. № 1. С. 84–97.
2. Chernigovskaya M. A., Shpynev B. G., Yasyukevich A. S., Khabituev D. S., Ratovsky K. G., Belinskaya A. Y., Stepanov A. E., Vyckov V. V., Grigorieva S. A., Panchenko V. A., Kouba D., Mielich J. Longitudinal variations of geomagnetic and ionospheric parameters in the Northern Hemisphere during magnetic storms according to multi-instrument observations // Advances in Space Research. 2021. V. 67. No. 2. P. 762–776. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.10.028>.
3. Yanchukovsky V. L., Kuz'menko V. S., Antsyz E. N. Results of Cosmic Ray Monitoring with a Multichannel Complex // Geomagnetism and Aeronomy. 2011. V. 51. No. 7. P. 893–896.

Geophysical phenomena during the solar activity surge in October – November 2021

V. L. Yanchukovsky, A. Yu. Belinskaya

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS
Novosibirsk 630090, Russia

E-mails: YanchukovskiyVL@ipgg.sbras.ru, BelinskayaAY@ipgg.sbras.ru

In the article, the authors analyze the beginning of a new 25th cycle of solar activity. The first big burst of activity of the new cycle consisted of a series of solar flares of various classes, which were observed in October – November 2021. The reaction of various geophysical parameters to this surge in solar

activity is considered based on the results of continuous monitoring of cosmic rays, the geomagnetic field and the ionosphere in Novosibirsk. Solar flares from this series on November 1 and 2 caused a large Forbush-decrease in galactic cosmic rays (up to 13 % at mid-latitudes), the largest geomagnetic storm and disturbances in the ionosphere in recent years, as well as an increase in the number and magnitude of earthquakes. The ionospheric disturbance, which was positive on November 1–3, and after the onset of the magnetic storm there was a prolonged decrease in the critical frequency of the F2 layer until November 8, demonstrates a longitude effect along 52–55° N.

Keywords: solar activity, cosmic rays, ionosphere, geomagnetic storm

Accepted: 14.06.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-297-301

References

1. Yanchukovsky V.L., Solar activity and Earth seismicity, *Solar-Terrestrial Physics*, 2021, Vol. 7, No. 1, pp. 67–77.
2. Chernigovskaya M.A., Shpynev B.G., Yasyukevich A.S., Khabituev D.S., Ratovsky K.G., Belinskaya A.Y., Stepanov A.E., Bychkov V.V., Grigorieva S.A., Panchenko V.A., Kouba D., Mielich J., Longitudinal variations of geomagnetic and ionospheric parameters in the Northern Hemisphere during magnetic storms according to multi-instrument observations, *Advances in Space Research*, 2021, Vol. 67, No. 2, pp. 762–776, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.10.028>.
3. Yanchukovsky V.L., Kuz'menko V.S., Antsyz E.N., Results of Cosmic Ray Monitoring with a Multichannel Complex, *Geomagnetism and Aeronomy*, 2011, Vol. 51, No. 7, pp. 893–896.