

Полугодовая вариация космических лучей и ионосферы

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

Рассматриваются полугодовая компонента сезонной вариации критической частоты слоя F2 ионосферы (foF2) и полугодовая вариация интенсивности космических лучей (КЛ). В анализе использованы данные ионосферных наблюдений на среднеширотных станциях Южного и Северного полушарий, соответственно Моусон и Новосибирск, и данные нейтронных мониторов сети Северного (Novosibirsk, Irkutsk, Moscow, Oulu) и Южного (Heranus, Potchefstroom, Sanae, Tsumeb) полушарий за период с 1969 по 2019 г. Выявлена полугодовая вариация параметра foF2 ионосферы. Она повторяет полугодовую вариацию интенсивности космических лучей. Основная причина возникновения полугодовой вариации интенсивности КЛ — наличие нейтрального слоя гелиосферы. Причина образования такой вариации в параметрах ионосферного слоя с максимумами в периоды равноденствия и минимумами в периоды солнцестояния далеко не так очевидна. Тем не менее эксперимент указывает, что такая вариация существует и представляет собой полугодовую волну с амплитудой около 20 %. Предлагается возможный механизм возникновения полугодовой компоненты: вероятно, она обусловлена изменениями нейтрального газа верхней атмосферы, которые вызваны метеорологическими эффектами нижней атмосферы, спровоцированными изменениями интенсивности космических лучей.

Ключевые слова: космические лучи, ионосфера, полугодовая вариация

Одобрена к печати: 26.10.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-286-290

Ионосфера подвержена многим и сложным вариациям. Изменения освещённости атмосферы Солнцем в течение суток или года приводят к возникновению суточных и годовых вариаций соответственно. Освещённость летнего полушария, естественно, значительно превышает освещённость зимнего. Эта зависимость вызывает годовую вариацию — с максимумом летом и минимумом зимой, или наоборот. Кроме того, результаты исследований (Ратовский и др., 2015; Zou et al., 2000) указывают на существование в сезонной вариации полугодовой компоненты. Причина возникновения полугодовой вариации с максимумами в периоды равноденствия и минимумами в периоды солнцестояния далеко не так очевидна, как другие колебания.

При изучении сезонной вариации ионосферы нами рассматривалась критическая частота слоя F2 (foF2). При этом использовались данные наблюдений среднеширотных ионосферных станций Новосибирск (54,6° с. ш., 83,2° в. д.) (http://im.ipgg.sbras.ru/?page_id=205) и Моусон (62,9° ю. ш., 62,9° в. д.) (<http://www.sws.bom.gov.au>) (австралийская антарктическая станция в Восточной Антарктиде на земле Мак-Робертсона) за полувековой период независимо от уровня геомагнитной и солнечной активности. Находились средние полуденные значения foF2 (за 12:00–16:00 по местному времени, так как достижение максимума суточного хода различается для различных сезонов и уровней солнечной активности (Белинская, Ловцова, 2019)) для каждого месяца каждого года, а затем усреднением за все годы выявлялась сезонная вариация этого параметра. Полученный результат приведён на *рис. 1а* (кривая 5) (см. с. 287) для станции NS355 (Новосибирск) и на *рис. 1б* (кривая 5) для станции MW26P (Моусон).

Сезонная вариация foF2 представляет собой полугодовую волну с амплитудой около 20 %. Максимумы параметра foF2 приходятся на март и октябрь, а минимумы — на июль и на декабрь — январь. Основной причиной образования верхних слоёв ионосферы (F2) выступает ультрафиолетовое излучение Солнца с длиной волны менее 100 нм, которое не может быть

источником полугодовой вариации. Ультрафиолетовое излучение Солнца проникает в атмосферу до высот порядка 140 км. Рентгеновское излучение Солнца с длиной волны 1–10 нм ионизирует атмосферу на высотах порядка 120 км. Однако этот ионизирующий атмосферу агент также не имеет полугодовой изменчивости.

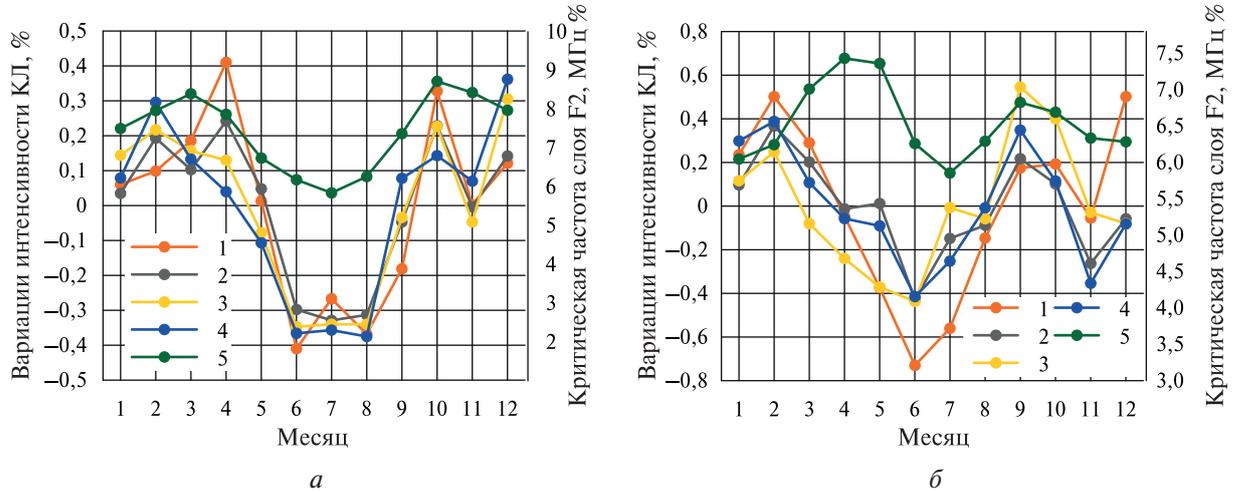


Рис. 1. Сезонная вариация интенсивности космических лучей и критической частоты слоя F2 ионосферы: *a* — по данным нейтронных мониторов северного полушария (1 — Novosibirsk, 2 — Irkutsk, 3 — Oulu, 4 — Moscow) и ионосферной станции NS355 (кривая 5); *б* — по данным нейтронных мониторов южного полушария (1 — Hermanus, 2 — Potchefstroom, 3 — Sanae, 4 — Tsumeb) и ионосферной станции MW26P (кривая 5)

На рис. 1 кривыми 1–4 представлена полугодовая вариация интенсивности космических лучей (КЛ), найденная также методом усреднения данных нейтронных мониторов по месяцам за весь период наблюдений 1968–2019 гг. (<http://www.nmdb.eu>). Были привлечены результаты наблюдений станций КЛ мировой сети Северного (Novosibirsk, Irkutsk, Moscow, Oulu) и Южного (Hermanus, Potchefstroom, Sanae, Tsumeb) полушарий. При этом использовались исправленные на метеорологические эффекты среднемесячные значения темпа счёта нейтронных мониторов. Максимумы наблюдаемой полугодовой вариации КЛ приходятся на февраль–март и октябрь. Теоретические и экспериментальные исследования природы годовой и полугодовой вариаций интенсивности КЛ рассматриваются, например, в работе (Крымский и др., 2012). Годовая и полугодовая вариации КЛ вызваны, с одной стороны, наличием гелиоширотного градиента плотности КЛ, который обусловлен существованием северно-южной асимметрии в низкоширотной гелиосфере, а с другой — наличием нейтрального слоя межпланетного магнитного поля. Поэтому максимумы полугодовой вариации КЛ приходятся на периоды равноденствия, когда Земля пересекает нейтральный слой межпланетного магнитного поля (ММП), а минимумы — на периоды солнцестояния. Полугодовая вариация интенсивности КЛ определяется положением и раствором нейтрального слоя гелиосферы.

Космические лучи на высотах от 100 км до земной поверхности становятся основным источником ионизации атмосферы, приводящей к существенным физическим изменениям в атмосферном воздухе. Образовавшиеся ионы участвуют во многих атмосферных процессах: формировании облачного покрова, осадков, образовании аэрозолей и прозрачности атмосферы, глобальной электрической цепи, циклогенезе на средних и высоких широтах (Кудрявцев, Юнгер, 2011; Harrison, Tammet, 2008; Marsh, Svensmark, 2000; Tinsley, 2012; Usoskin et al., 2010). К настоящему времени разработана достаточно совершенная модель ионизации атмосферы КЛ (CRIP) (Usoskin et al., 2010), которая признана международным стандартом для оценки ионизации, вызванной КЛ. Это надёжный инструмент для изучения эффектов ионизации в атмосфере КЛ, что позволяет понимать характер связи интенсивности КЛ

и погодных явлений с точки зрения количественного механизма, отвечающего за наблюдаемые корреляции. Представленные механизмы воздействия КЛ на погодные явления объясняют, как ионизация атмосферы КЛ приводит к изменениям температуры и давления и, следовательно, к изменению атмосферной циркуляции, с помощью которой полученная тепловая энергия распределяется в атмосфере. Изменения атмосферной циркуляции приводят к значительным изменениям атмосферных процессов. Изменчивые процессы в нижней атмосфере оказывают влияние на верхнюю атмосферу (Данилов и др., 1987). Ветры в верхней атмосфере, представляющие собой движение нейтрального газа, глобальны по масштабу и медленно меняются во времени (Красовский, 1975). Горизонтальные ветры могут приводить к возникновению полугодовых вариаций нейтрального состава атмосферы. Регулярный зональный ветер в ионосфере, таким образом, проявляет метеорологическую природу. Метеорологическое воздействие на ионосферу снизу может зависеть от уровня солнечной активности, вариаций параметров геомагнитного поля, параметров волновых возмущений в нижней и средней атмосфере (Данилов и др., 2013; Rishbeth et al., 2000).

Таким образом, наблюдаемая полугодовая вариация параметра f_oF2 ионосферы может быть обусловлена изменениями нейтрального газа верхней атмосферы, которые вызваны метеорологическими эффектами нижней атмосферы, спровоцированными изменениями интенсивности космических лучей.

Работа выполнена в рамках проекта Минобрнауки Российской Федерации № 0331-2019-0013 и использует экспериментальные данные УНУ-85 «Российская национальная сеть станций космических лучей».

Литература

1. Белинская А. Ю., Ловцова Н. Н. Долгопериодные вариации критической частоты ионосферного слоя F2 в 23 солнечном цикле // *Modern Science*. 2019. № 5–2. С. 120–124.
2. Данилов А. Д., Казимировский Э. С., Вергасова Г. В., Хачикян Г. Я. Метеорологические эффекты в ионосфере. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 268 с.
3. Данилов А. А., Крымский Г. Ф., Макаров Г. А. Геомагнитная активность как отражение процессов в магнитосферном хвосте. 1. Источник суточной и полугодовой вариаций геомагнитной активности // *Геомагнетизм и аэрномия*. 2013. Т. 53. № 4. С. 469–475.
4. Красовский В. И. Штили и штормы в верхней атмосфере. М.: Наука, 1975. 136 с.
5. Крымский Г. Ф., Кривошапкин П. А., Герасимова С. К., Гололобов П. Ю. Анизотропия и плотность космических лучей в окрестности нейтральной поверхности межпланетного магнитного поля // *Письма в астроном. журн.* 2012. Т. 38. № 9. С. 677–680.
6. Кудрявцев И. В., Юнгер Х. Вариации прозрачности атмосферы под действием галактических космических лучей как возможная причина их влияния на формирование облачности // *Геомагнетизм и аэрномия*. 2011. Т. 51. № 5. С. 668–676.
7. Ратовский К. Г., Ойнац А. В., Медведев А. В. Сходства и различия регулярных вариаций параметров F2-слоя полярной и среднеширотной ионосферы в Восточно-Сибирском секторе // *Солнечно-земная физика*. 2015. Т. 1. № 2. С. 70–79.
8. Harrison R. G., Tamm H. Ions in the terrestrial atmosphere and other solar system atmospheres // *Space Science Reviews*. 2008. V. 137. P. 107–118.
9. Marsh N. D., Svensmark H. Low clouds properties influenced by cosmic rays // *Physical Review Letters*. 2000. V. 85. P. 5004–5007.
10. Rishbeth H., Sedgemore-Schulthess K. J. F., Ulich T. Annual and semiannual variations in the ionospheric F2-layer: II. Physical discussion // *Annales Geophysicae*. 2000. V. 18. P. 945–956.
11. Tinsley B. A. A working hypothesis for connections between electrically-induced changes in cloud microphysics and storm vorticity, with possible effects on circulation // *Advances in Space Research*. 2012. V. 50. P. 791–805.
12. Usoskin I. G., Kovaltsov G. A., Mironova I. A. Cosmic ray induced ionization model CRAC: CR11: an extension to the upper atmosphere // *Geophysical Research*. 2010. V. 115. Iss. D10. Art. No. D10302. 6 p.
13. Zou L., Rishbeth H., Muller-Wodarg I. C. F., Aylward A. D., Nillward G. H., Fuller-Rowell T. J., Idenden D. W., Moffett R. J. Annual and semiannual variations in the ionospheric F2-layer. 1. Modelling // *Annales Geophysicae*. 2000. V. 18. P. 927–944.

Semi-annual variation of cosmic rays and ionosphere

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

The semi-annual component of the seasonal variation of the critical frequency of the ionosphere layer F2 (foF2) and the semi-annual variation in the intensity of cosmic (CR) rays are considered. The analysis used ionospheric observations at mid-latitude stations of the Southern Mazon (code MW26P, 62.9° S, 62.9° E) and Northern Novosibirsk (code NS355, 54.6° N, 83.2° E) hemispheres and neutron data monitors of the network of the Northern (Novosibirsk, Irkutsk, Moscow, Oulu) and Southern (Hermanus, Potchefstroom, Sanae, Tsumeb) hemispheres for the period from 1969 to 2019. A semi-annual variation of the ionosphere foF2 parameter was revealed. It repeats a six-month variation in the intensity of cosmic rays. The main reason for the appearance of a semi-annual variation in the CR intensity is the presence of a neutral heliosphere layer. The reason for this variation in the parameters of the ionospheric layer with maxima at the equinox and minima at the solstice is far from obvious. However, the experiment indicates that such a variation exists and is a semi-annual wave with an amplitude of about 20 %. A possible mechanism of its occurrence is proposed: it may be due to changes in the neutral gas of the upper atmosphere, which are caused by meteorological effects of the lower atmosphere, instigated by changes in the intensity of cosmic rays.

Keywords: cosmic rays, ionosphere, semi-annual variation

Accepted: 26.10.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-286-290

References

1. Belinskaya A. Yu., Lovtsova N. N., Dolgoperiodnye variatsii kriticheskoi chastoty ionosfernogo sloya F2 v 23 solnechnom tsikle (Long-period variations of the critical frequency of the ionospheric layer F2 in the 23rd solar cycle), *Modern Science*, 2019, No. 5(2), pp. 120–124.
2. Danilov A. D., Kazimirovskii E. S., Vergasova G. V., Khachikyan G. Ya., *Meteorologicheskie efekty v ionosfere* (Meteorological effects in the ionosphere), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1987, 268 p.
3. Danilov A. A., Krymskii G. F., Makarov G. A., Geomagnetnaya aktivnost' kak otrazhenie protsessov v magnetosfernom khvoste. 1. Istochnik sutochnoi i polugodovoi variatsii geomagnitnoi aktivnosti (Geomagnetic activity as a reflection of processes in the magnetospheric tail: 1. The source of diurnal and semiannual variations in geomagnetic activity), *Geomagnetism and Aeronomy*, 2013, Vol. 53, No. 4, pp. 469–475.
4. Krasovskii V. I., *Shtili i shtormy v verkhnei atmosfere* (Calms and storms in the upper atmosphere), Moscow: Nauka, 1975, 136 p.
5. Krymskii G. F., Krivoschapkin P. A., Gerasimova S. K., Gololobov P. Yu., Anizotropiya i plotnost' kosmicheskikh luchej v okrestnosti neutral'noi poverkhnosti mezhplanetnogo magnitnogo polya (Anisotropy and density of cosmic rays in the vicinity of the neutral surface of the interplanetary magnetic field), *Pis'ma v astronomicheskii zhurnal*, 2012, Vol. 38, No. 9, pp. 677–680.
6. Kudryavtsev I. V., Yunger X., Variatsii prozrachnosti atmosfery pod deistviem galakticheskikh kosmicheskikh luchej kak vozmozhnaya prichina ikh vliyaniya na formirovanie oblachnosti (Variations in atmospheric transparency under the action of galactic cosmic rays as a possible cause of their effect on the formation of cloudiness), *Geomagnetism and Aeronomy*, 2011, Vol. 51, No. 5, pp. 668–676.
7. Ratovskii K. G., Oinats A. V., Medvedev A. V., Skhodstva i razlichiya regulyarnykh variatsii parametrov F2-sloya polyarnoi i sredneshirotnoi ionosfery v Vostochno-Sibirskom sektore (Similarities and differences of regular variations of parameters of the F2 layer of the polar and mid-latitude ionosphere in the East Siberian sector), *Solnechno-zemnaya fizika*, 2015, Vol. 1, No. 2, pp. 70–79.
8. Harrison R. G., Tamm H., Ions in the terrestrial atmosphere and other solar system atmospheres, *Space Science Reviews*, 2008, Vol. 137, pp. 107–118.
9. Marsh N. D., Svensmark H., Low clouds properties influenced by cosmic rays, *Physical Review Letters*, 2000, Vol. 85, pp. 5004–5007.

10. Rishbeth H., Sedgemore-Schulthess K. J. F., Ulich V., Annual and semiannual variations in the ionospheric F2-layer: II. Physical discussion, *Annales Geophysicae*, 2000, Vol. 18, pp. 945–956.
11. Tinsley B. A., A working hypothesis for connections between electrically-induced changes in cloud microphysics and storm vorticity, with possible effects on circulation, *Advances in Space Research*, 2012, Vol. 50, pp. 791–805.
12. Usoskin I. G., Kovaltsov G. A., Mironova I. A., Cosmic ray induced ionization model CRAC: CRII: an extension to the upper atmosphere, *Geophysical Research*, 2010, Vol. 115, Iss. D10, Art. No. D10302, 6 p.
13. Zou L., Rishbeth H., Muller-Wodarg I. C.F., Aylward A. D., Nillward G. H., Fuller-Rowell T.J., Iden-Den D.W., Moffett R.J., Annual and semiannual variations in the ionospheric F2-layer. 1. Modelling, *Annales Geophysicae*, 2000, Vol. 18, pp. 927–944.