

УДК 524.1-52

ИССЛЕДОВАНИЕ СУТОЧНОГО ХОДА ПОТОКА РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ GOES-13 И GOES-14

¹А.А. Абуни, ¹М.А. Абунина, ¹А.В. Белов, ¹Н.С. Шлык, ¹И.И. Прямушкина,
²О.Н. Крякунова, ²Н.Ф. Николаевский

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Москва, Троицк, Россия
abunin@izmiran.ru

²Институт ионосферы, Алматы, Казахстан

INVESTIGATION OF DIURNAL VARIATIONS IN RELATIVISTIC ELECTRON FLUX USING GOES-13 AND GOES-14 SPACECRAFT DATA

¹A.A. Abunin, ¹M.A. Abunina, ¹A.V. Belov, ¹N.S. Shlyk, ¹I.I. Pryamushkina,
²O.N. Kryakunova, ²N.F. Nikolayevskiy

¹Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS, Moscow, Troitsk, Russia
abunin@izmiran.ru

²Institute of the Ionosphere, Almaty, Kazakhstan

Аннотация. Одной из задач солнечно-земной физики является исследование поведения электронов в околоземном космическом пространстве. В данной работе исследуется суточный ход потока релятивистских электронов с энергиями более 2 МэВ на геостационарной орбите с учетом местоположения космических аппаратов GOES-13 и GOES-14. Это позволит в дальнейшем более точно прогнозировать поведение потока этих частиц.

Ключевые слова: солнечно-земные связи, высокоэнергичные магнитосферные электроны.

Abstract. The study of electrons' behavior in near-Earth space is one of problems of solar-terrestrial physics. In this study, diurnal variations in relativistic electron flux with energies above 2 MeV in geostationary orbit are investigated taking into account the location of GOES-13 and GOES-14 spacecraft. This will make it possible to predict the behavior of electron flux more accurately.

Keywords: solar-terrestrial relations, high-energy magnetospheric electrons.

ВВЕДЕНИЕ

Потоки высокоэнергичных электронов с энергиями более 2 МэВ на геостационарной орбите являются важнейшим аспектом при анализе состояния космической погоды [Белов и др., 2017; Gaidash et al., 2017]. Это связано с тем, что данные релятивистские частицы могут вызывать сбои в работе космических аппаратов вплоть до их полной потери (см., например, [Reagan et al., 1983; Baker, 2001; Wrenn et al., 2002; Белов и др., 2004; Webb, Allen, 2004; Wrenn, 2009]). Высокоэнергичные электроны могут вызывать, например, глубокий диэлектрический заряд космических аппаратов, ускорять деградацию солнечных батарей и т. д.

Известно множество работ, посвященных изучению физики процессов генерации этих частиц (см., например, [Baker et al., 1998; Reeves et al., 1998; Vassiliadis et al., 2005; Thorne, 2010; Meredith et al., 2015; Потапов, 2017; Лазутин, 2018]), а также методам прогнозирования поведения потока высокоэнергичных электронов (см., например, [Mathie, Mann, 2000; Kessel, 2008; Degtyarev et al., 2009; Потапов, 2016; Белов и др., 2017]). Несмотря на множество проведенных в этой области исследований, до сих пор нет полного понимания того, каким образом происходит генерация этих частиц в околоземном пространстве во время межпланетных возмущений. Тем не менее, существуют модели, позволяющие достаточно хорошо прогнозировать поведение этих частиц. Большинство этих моделей опираются на информацию о состоянии солнечного ветра и уровне геомагнитной активности.

Целью данной работы является исследование суточного хода потока релятивистских электронов для дальнейшего учета полученных зависимостей при прогнозировании поведения этих частиц.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

В качестве основной анализируемой характеристики поведения электронов магнитосферного происхождения на геостационарной орбите был выбран измеряемый на космических аппаратах серии GOES поток этих частиц с энергиями более 2 МэВ. В частности, анализировались данные с космических аппаратов GOES-13 (орбитальная позиция или местоположение приблизительно равняется 75° W) и GOES-14 (орбитальная позиция — 105° W). Для анализа использовались данные 2010–2017 гг. (GOES-13) и 2010–2020 гг. (GOES-14).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для примера на рис. 1 изображено поведение потока электронов с энергиями более 2 МэВ по данным GOES-13 за период с 14 по 24 ноября 2016 г. При детальном рассмотрении данных можно выделить суточную волну потока высокоэнергичных частиц. Это связано с местоположением космического аппарата. Суточную волну можно увидеть практически всегда, за исключением тех дней, когда значения потока частиц находятся на уровне фоновых значений или в момент прихода мощных межпланетных возмущений.

При анализе была получена усредненная суточная кривая за период с 2010 по 2017 г. по данным GOES-13

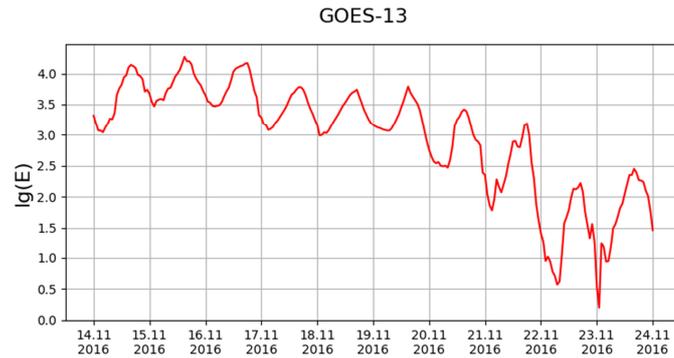


Рис. 1. Поведение потока электронов с энергиями более 2 МэВ по данным GOES-13 за период с 14 по 24 ноября 2016 г.

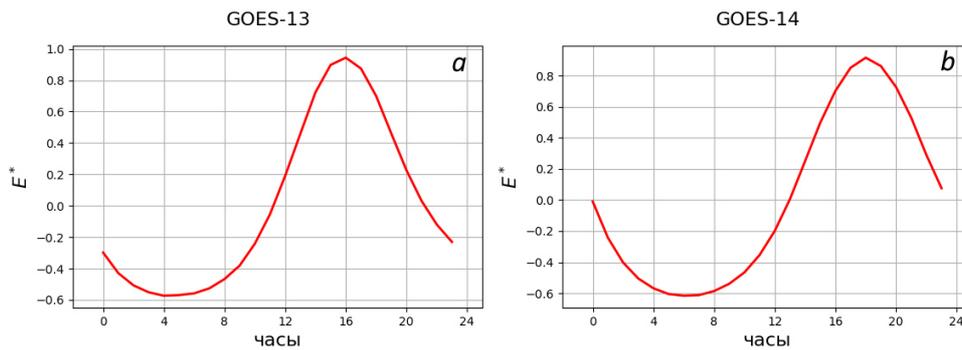


Рис. 2. Суточный ход потока электронов, полученный путем усреднения часовых данных: *a* — по данным GOES-13 (орбитальная позиция $\sim 75^\circ$ W, 2010–2017 гг., всего 2647 дней); *b* — по данным GOES-14 (орбитальная позиция $\sim 105^\circ$ W, 2010–2020 гг., всего 1345 дней)

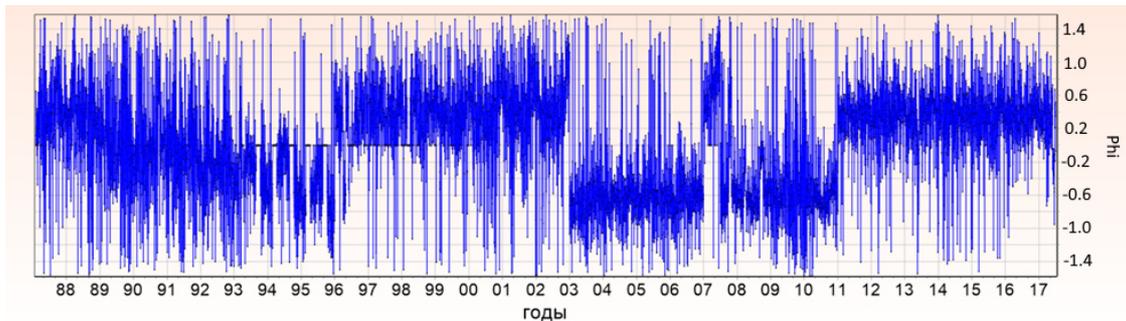


Рис. 3. Поведение фазы суточной вариации логарифма потока релятивистских электронов в 1987–2017 гг.

(рис. 2, *a*) и за период с 2010 по 2020 г. по данным GOES-14 (рис. 2, *b*). По оси ординат отложен поток электронов, нормированный следующим образом:

$$E^* = \sum_{h=1}^{24} \frac{E_h - \bar{E}}{\bar{E}},$$

где E_h — поток электронов за конкретный час в сутках, \bar{E} — усредненное значение потока электронов за сутки. Таким образом, при усреднении использовались данные за 2647 дней (рис. 2, *a*). Видно, что максимум суточной волны приходится на 16 UT.

Следует отметить, что при изменении местоположения космического аппарата будет изменяться и фаза. На рис. 2, *b* представлена усредненная суточная кривая по данным GOES-14 (орбитальная позиция $- 105^\circ$ W). Из-за пропусков в данных было рассмотрено всего 1345 дней. Максимум суточной волны для GOES-14 сдвинут на два часа вправо относительно максимума суточной волны, полученной по

данным GOES-13, и приходится на ~ 18 UT. В обоих случаях волна достаточно выраженная.

Если же вычислить фазу суточной вариации логарифма потока электронов за более длительный период, можно увидеть ее значительные изменения (рис. 3). Это объясняется тем, что положение космических аппаратов серии GOES в определенные периоды времени изменялось. Если же рассматривать данные только одного конкретного аппарата, будет хорошо видна стабильность фазы, а ее достаточно редкие, но большие изменения связаны с низкими значениями амплитуды вариаций потока электронов в отдельные дни, а также с приходом мощных межпланетных возмущений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как отмечалось выше, существует ряд моделей, которые позволяют прогнозировать поведение потока электронов с энергиями более 2 МэВ на геоста-

ционарной орбите. Зная суточную вариацию потока этих частиц, можно более точно прогнозировать его поведение. Кроме того, в дальнейшем при помощи гармонического анализа планируется получить в аналитическом виде функцию, отражающую суточный ход потока высокоэнергичных электронов. Это поможет учитывать местоположение космических аппаратов в прогностических моделях и тем самым улучшить качество прогнозов.

Работа поддержана Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (грант № AP08855916).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белов А.В., Вилорези Дж., Дорман Л.И. и др. Влияние космической среды на функционирование искусственных спутников Земли. *Геомагнетизм и аэронавтика*. 2004. Т. 44, № 4. С. 502–510.
- Белов А.В., Крякунова О.Н., Абунин А.А. и др. Особенности поведения высокоэнергичных магнитосферных электронов в 1987–2007 гг. *Известия РАН: Сер. физическая*. 2017. Т. 81, № 2. С. 244–247.
- Лазутин Л.Л., Дмитриев А.В., Суворова А.В. Динамика электронного радиационного пояса во время магнитных возмущений и в спокойное время. *Солнечно-земная физика*. 2018. Т. 4, № 1. С. 51–60.
- Потапов А.С. Релятивистские электроны внешнего радиационного пояса и методы их прогноза (обзор). *Солнечно-земная физика*. 2017. Т. 3, № 1. С. 46–58.
- Потапов А.С., Рьжакова Л.В., Цэгмэд Б. Метод прогнозирования потока релятивистских электронов на геостационарной орбите. *Вестник СибГАУ*. 2016. Т. 17, № 3. С. 611–617.
- Baker D.N. Satellite anomalies due to space storms. *Space Storms and Space Weather Hazards*. 2001. Vol. 38. P. 285–311.
- Baker D.N., Pulkkinen T.I., Li X., Kanekal S.G., et al. Coronal mass ejections, magnetic clouds, and relativistic magnetospheric electron events: ISTR. *J. Geophys. Res.* 1998. Vol. 103, no. A8. P. 17279–17291.
- Degtyarev V.I., Kharchenko I.P., Potapov A.S., et al. Qualitative estimation of magnetic storm efficiency in producing relativistic electron flux in the Earth's outer radiation belt using geomagnetic pulsations data. *Adv. Space Res.* 2009. Vol. 43. P. 829–836.
- Gaidash S.P., Belov A.V., Abunina M.A., Abunin A.A. Space weather forecasting at IZMIRAN. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2017. Vol. 57, no. 7. P. 869–876.
- Mathie R.A., Mann I.R. A correlation between extended intervals of ULF wave power and storm-time geosynchronous relativistic electron flux enhancements. *Geophys. Res. Lett.* 2000. Vol. 27. P. 3261–3264.
- Meredith N.P., Horne R.B., Isles J.D., Rodriguez J.V. Extreme relativistic electron fluxes at geosynchronous orbit: Analysis of GOES $E > 2$ MeV electrons. *Space Weather*. 2015. Vol. 13, iss. 3. P. 170–184.
- Reagan J.B., Meyerott R.E., Gaines E.E., et al. Space charging currents and their effects on spacecraft systems. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*. 1983. Vol. EI-18. P. 345–348.
- Reeves G.D., Baker D.N., Belian R.D., et al. The global response of relativistic radiation belt electrons to the January 1997 magnetic cloud. *Geophys. Res. Lett.* 1998. Vol. 17, iss. 25. P. 3265–3268.
- Thorne R.M. Radiation belt dynamics: The importance of wave-particle interactions. *Geophys. Res. Lett.* 2010. Vol. 37, iss. 22. P. L22107.
- Vassiliadis D., Fung S.F., Klimas A.J. Solar, interplanetary, and magnetospheric parameters for the radiation belt energetic electron flux. *Geophys. Res. Lett.* 2005. Vol. 110, iss. A4. CiteID A04201. DOI: [10.1029/2004JA010443](https://doi.org/10.1029/2004JA010443).
- Webb D.F., Allen J.H. Spacecraft and ground anomalies related to the October–November 2003 solar activity. *Space Weather*. 2004. Vol. 2, iss. 3. CiteID S03008. DOI: [10.1029/2004SW000075](https://doi.org/10.1029/2004SW000075).
- Wrenn G.L. Chronology of «killer» electrons: Solar cycles 22 and 23. *J. Atm. Solar-Terr. Phys.* 2009. Vol. 71, iss. 10-11. P. 1210–1218.
- Wrenn G.L., Rodgers D.J., Ryden K.A. A solar cycle of spacecraft anomalies due to internal charging. *Ann. Geophys.* 2002. Vol. 20, iss. 7. P. 953–956.