

УДК 520.6.07

Doi: 10.31772/2712-8970-2025-26-2-291-299

Для цитирования: Радиационная обстановка на средней круговой орбите во время экстремальной магнитной бури в мае 2024 года / М. Д. Шелепов, В. В. Иванов, С. Г. Кочура и др. // Сибирский аэрокосмический журнал. 2025. Т. 26, № 2. С. 291–299. Doi: 10.31772/2712-8970-2025-26-2-291-299.

For citation: Shelepov M. D., Ivanov V. V., Kochura S. G. et al. [Radiation conditions in medium circular orbit during the extreme magnetic storm in may 2024]. *Siberian Aerospace Journal*. 2025, Vol. 26, No. 2, P. 291–299. Doi: 10.31772/2712-8970-2025-26-2-291-299.

Радиационная обстановка на средней круговой орбите во время экстремальной магнитной бури в мае 2024 года

М. Д. Шелепов^{1*}, В. В. Иванов¹, С. Г. Кочура¹, И. А. Максимов¹,
К. В. Молчанов², В. Ю. Прокопьев²

¹Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

²Новосибирский национальный исследовательский государственный университет
Российская Федерация, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1

*E-mail: shelepovmd@iss-reshetnev.ru

Аннотация. В данной статье описаны результаты мониторинга радиационной обстановки на средней круговой орбите, полученные по данным экспериментального комплекса контроля дозы (ЭККД) космического аппарата (КА) разработки АО «РЕШЕТНЁВ» с круговой орбитой высотой $H = 8070$ км. В статье проводится сравнение экспериментально полученных данных ЭККД с расчетными данными, полученными в ходе летной эксплуатации за два года исследования, а также рассматривается влияние экстремального геомагнитного возмущения в мае 2024 г. на скорость набора поглощенной дозы. Следует отметить, что данная орбита для российских разработчиков КА является малоизученной с точки зрения воздействия факторов космического пространства.

Метод проведения эксперимента заключается в создании различных условий массовой защиты для каждого из девяти датчиков. Массовая защита варьируется благодаря установке стальной решетки с различными толщинами ячеек. Таким образом, каждый чувствительный элемент находится в уникальных условиях облучения – массовая защита ослабляет поток ионизирующих излучений и изменяет их спектр (по-разному для каждого вида излучения).

При освоении нового типа орбиты для эксплуатации КА, актуальной является задача обеспечения стойкости бортовой аппаратуры и КА в целом к воздействию факторов ионизирующего излучения космического пространства, характерных на данной орбите. Для этого необходимо экспериментальное подтверждение или уточнение на базе полученных натурных данных расчетной радиационной модели воздействия.

Основной задачей, которая решается в статье, является проведение мониторинга уровней интегральной накопленной дозы за различными защитами при воздействии ионизирующего излучения космического пространства на орбите 8070 км и сравнение результатов экспериментальных данных с расчетными оценками, проведенными по ОСТ134-1044-2007.

В статье отражены результаты проведенных впервые в отечественной практике долговременных измерений поглощенной дозы ионизирующего излучения для КА с такой орбитой. В результате измерений было установлено, что после экстремальной магнитной бури происходит значительное увеличение скорости набора дозы. Это привело к тому, что зарегистрированная за 722 дня доза превышает расчетное значение.

Ключевые слова: космический аппарат, радиационные эффекты, мониторинг радиационной обстановки, ионизирующее излучение космического пространства, магнитная буря, полупроводниковый чувствительный элемент.

Radiation conditions in medium circular orbit during the extreme magnetic storm in may 2024

M. D. Shelepov^{1*}, V. V. Ivanov¹, S. G. Kochura¹, I. A. Maksimov¹,
K. V. Molchanov², V. U. Prokopyev²

¹JSC “Information Satellite Systems” Academician M. F. Reshetnev Company”
52, Lenin St., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation

²Novosibirsk State University
1, Pirogova St., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

*E-mail: shelepovmd@iss-reshetnev.ru

Abstract. This article describes the results of monitoring the radiation situation in a medium circular orbit, obtained from the data of the experimental dose control complex (EDCC) of the spacecraft, developed by JSC “Reshetnev”, with a circular orbit at an altitude of $H=8070$ km. The article compares the experimentally obtained EDCC data with the calculated data, obtained during flight operation over two years of research. It should be noted that this orbit is poorly studied by Russian spacecraft developers in terms of the impact of space factors. Also considers the effect of the extreme geomagnetic disturbance in May 2024 on the rate of accumulation of the absorbed dose.

The method of conducting the experiment consists of creating different conditions of mass protection for each of the nine sensors. The mass protection is varied by installing a steel grid with different cell thicknesses. Thus, each sensitive element is in unique irradiation conditions – mass protection weakens the flux of ionizing radiation and changes its spectrum (differently for each type of radiation).

When developing a new type of orbit for spacecraft operation, the task of ensuring the resistance of on-board equipment and the spacecraft as a whole to the effects of ionizing radiation factors of outer space, typical for this orbit, is relevant. For this, experimental confirmation or refinement of the calculated radiation model of impact based on the obtained in-kind data is necessary.

The main task solved in the article is to monitor the levels of the integral accumulated dose behind various protections when exposed to ionizing radiation of outer space at an orbit of 8070 km and to compare the results of experimental data with the calculated estimates carried out according to OST134-1044-2007.

The article reflects the results of long-term measurements of the absorbed dose of ionizing radiation for a spacecraft with such an orbit. As a result of the measurements, it was established that after an extreme magnetic storm, there is a significant increase in the rate of dose accumulation. This led to the dose recorded for 722 days exceeding the calculated value

Keywords: spacecraft, radiation effects, radiation monitoring, ionizing radiation of outer space, magnetic storm, semi-conductor-sensing element.

Введение

Экспериментальный комплекс контроля дозы (ЭККД) предназначен для контроля влияния радиационных воздействий на космический аппарат (КА) [1; 2]. ЭККД обеспечивает измерения уровней поглощённых доз ионизирующих излучений космического пространства.

ЭККД выполнен в виде моноблока, включающего в себя матрицу модулей регистрации интегральной накопленной дозы (матрица МРИНД). Регистрация ионизирующих излучений производится с помощью идентичных чувствительных элементов МРИНД, расположенных по сетке 3×3 . Под воздействием радиации в чувствительном элементе происходит деградация проводимости канала во встроенном полевом транзисторе. Таким образом, измеряя падение напряжения на чувствительном элементе при пропускании через него постоянного тока можно судить о величине интегральной накопленной дозы радиации.

Идея эксперимента заключается в создании различных условий массовой защиты для каждого из девяти МРИНД. Массовая защита варьируется благодаря установке стальной решетки с различными толщинами ячеек. Таким образом, каждый чувствительный элемент находится

в уникальных условиях облучения – массовая защита ослабляет поток ионизирующих излучений и изменяет их спектр (по-разному для каждого вида излучения).

В данной статье приведены результаты измерения дозовых нагрузок ионизирующего излучения за различными массовыми защитами на орбите с высотой $H = 8070$ км за период с 23.10.22 по 14.10.2024 (722 дня). Данный период приходится на первую половину 25-го солнечного цикла [3] и характеризуется повышенной гелиофизической и геомагнитной активностью. Так, в мае 2024 г. была зарегистрирована сильнейшая за последние 20 лет магнитная буря [4]. В статье рассмотрен эффект влияния данной бури на радиационную обстановку на орбите КА. При анализе использовались значения геомагнитных индексов Dst и Kp, а также данные спутников с круговыми орбитами $H = 20000$ км и $H = 36000$ км.

Результаты измерений

На рис. 1 приведены данные ЭККД за 722 дня и их сравнение с теоретической оценкой (методика расчета теоретических значений приведена в [5]): датчик 0,3 мм – исключен (достигнут предел измеряемой дозы); датчик 1 мм – исключен; датчик 7,5 мм – показания меньше расчетного значения в 1,38 раз; для остальных датчиков зарегистрированная поглощенная доза превышает расчетную $\approx$ в 1,5 раза.

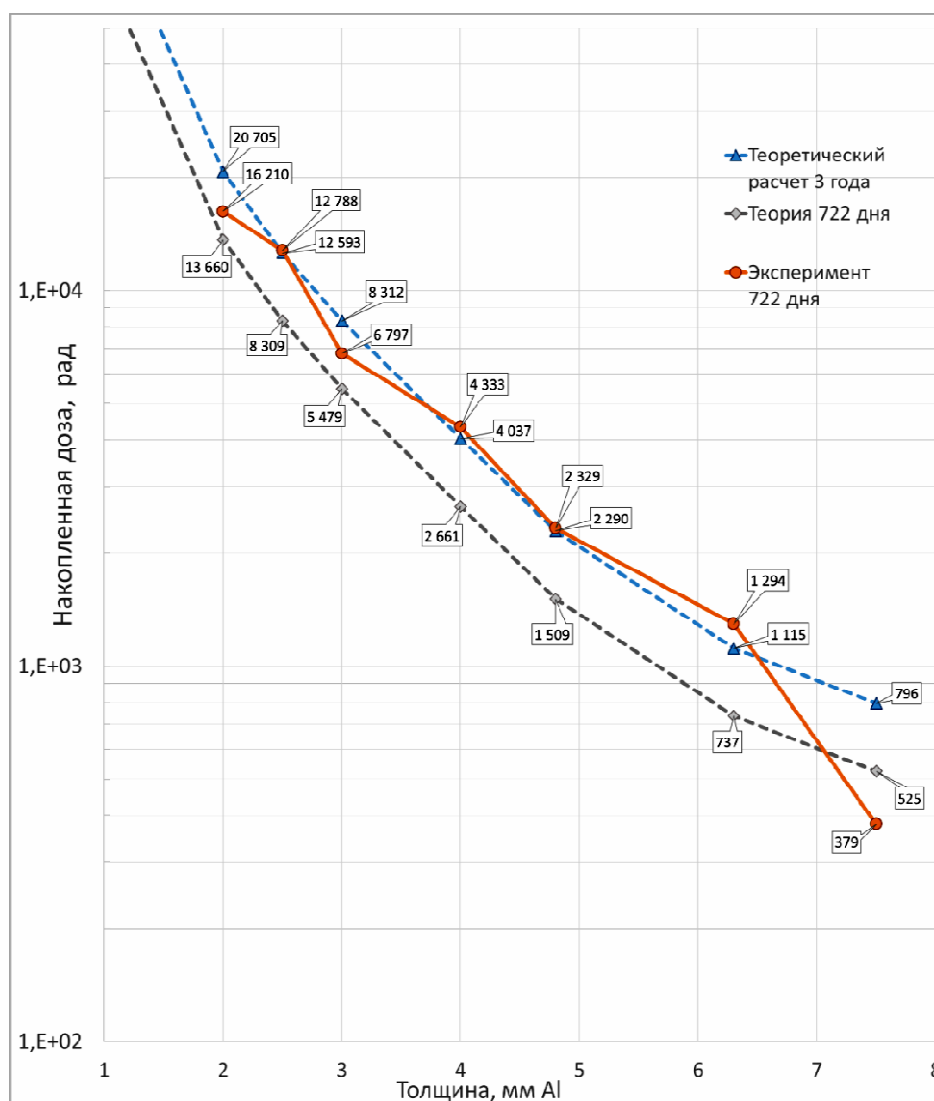


Рис. 1. Данные ЭККД за 722 дня

Fig. 1. EDCC data for 722 days

На рис. 2 приведены графики набора дозы в зависимости от времени для различных защит ЭККД. Из графиков видно, что скорость набора дозы резко возросла после экстремальной магнитной бури 10 мая и сохранялась на высоком уровне в период между 12.05.24 и 30.06.24. Аномально быстрый набор дозы в этот период стал причиной превышения расчетных значений. Для определения механизмов влияния геомагнитного возмущения на радиационную обстановку, нами были рассмотрены данные потоков частиц ионизирующего излучения с КА на круговых орбитах различной высоты.

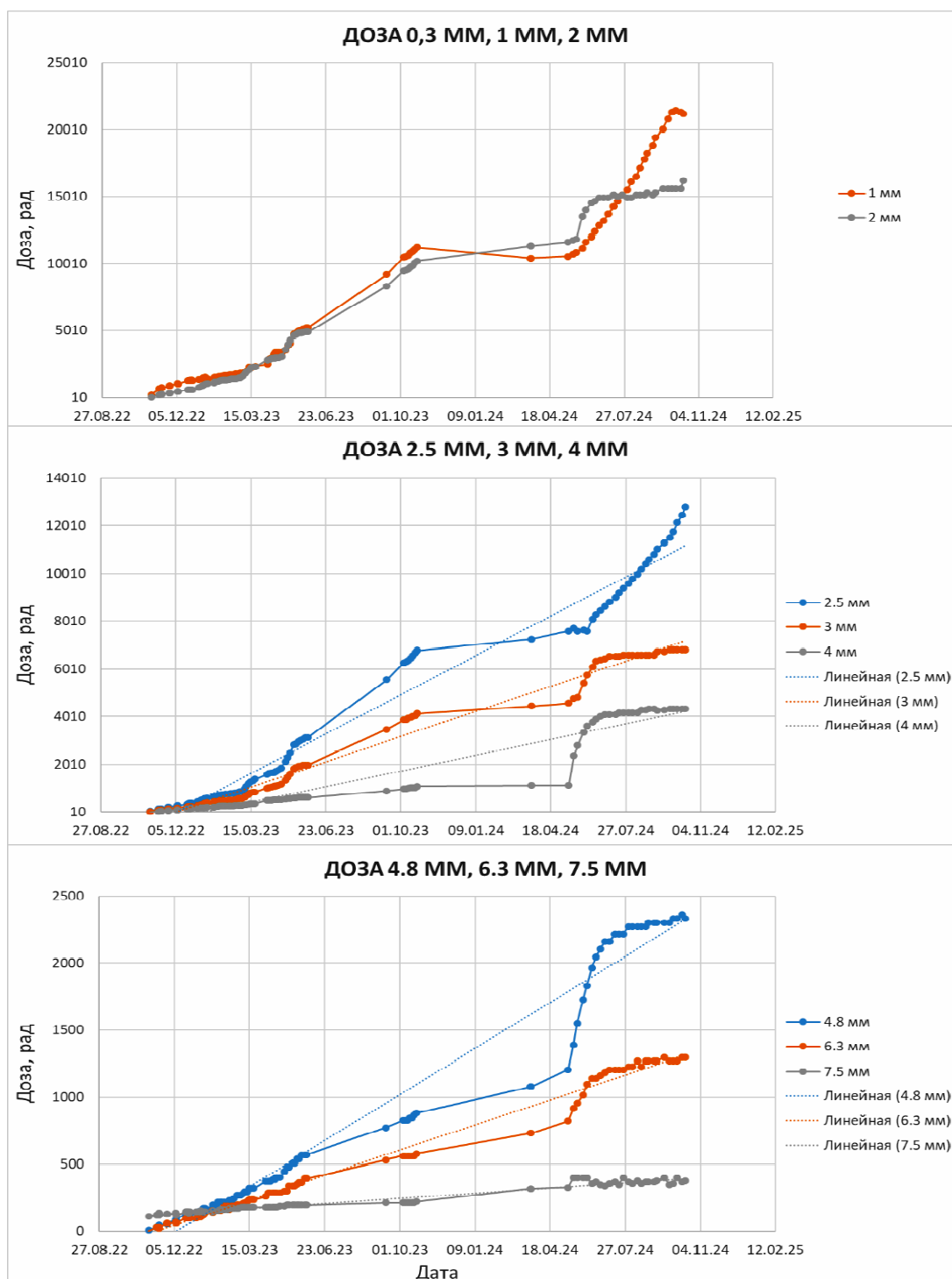


Рис. 2. Набор дозы ЭККД в зависимости от времени для различных защит (в мм алюминия)

Fig. 2. Dose set of EDCC depending on time for different protections (in mm of aluminum)

На рис. 3 приведены уровни потоков протонов солнечных космических лучей (СКЛ) по данным КА «GOES» [6] (геостационарная орбита), значения Dst-индекса геомагнитной активности, уровни потоков высокоэнергетичных ($E > 2$ Мэв) электронов на геостационарной орбите и орбите 20000 км.

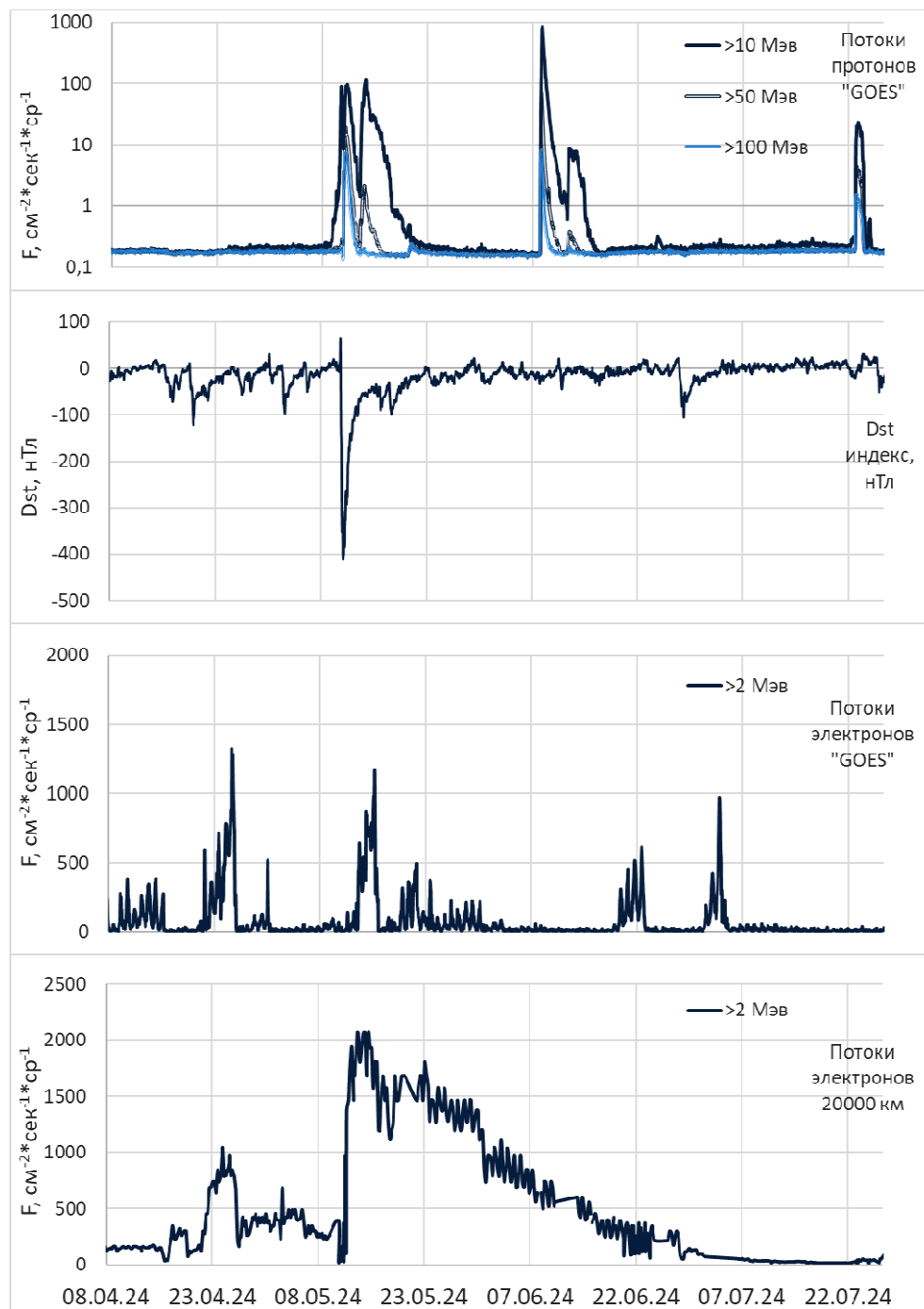


Рис. 3. Уровни потоков протонов СКЛ по данным КА «GOES», Dst-индекс геомагнитной активности, уровни потоков высокоэнергетичных электронов на геостационарной орбите и орбите 20000 км

Fig. 3. Levels of proton fluxes of the SCR according to the GOES spacecraft data, Dst index of geomagnetic activity, levels of high-energy electron fluxes in the geostationary orbit and the 20000 km orbit

Как видно по рис. 3, 11.05.2024 было зарегистрировано значительное повышение уровня потоков протонов СКЛ (в 45 раз больше фона для протонов с $E > 100$ Мэв), за которым последовала мощнейшая магнитная буря (Dst достигал -412 нТл). Вследствие этой магнитной бури возросли потоки высокоэнергетичных электронов внешнего радиационного пояса Земли (РПЗ). Однако видно, что поток электронов на геостационарной орбите быстро убывает, в то время как поток на орбите 20000 км сохраняет значение $>1500 \text{ см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ вплоть до 30.05.24. Такая динамика может объясняться смещением области РПЗ с наибольшей концентрацией электронов (максимум РПЗ) ближе к Земле. Подобная ситуация описывается в [7–10]. В этом случае геостационарная орбита уже не будет попадать в область РПЗ. А при достаточно сильном смещении в область РПЗ может попасть орбита 8070 км, что могло бы объяснить аномально высокую скорость набора дозы на данной орбите.

Динамика радиационных поясов

Согласно закономерности, связывающей положение максимума внешнего РПЗ в L-координатах (L-параметр Мак-Илвайна) с Dst -индексом геомагнитного возмущения [7],

$$|Dst_{\max}| = 2,75 * 10^4 / L_{\max}^4. \quad (1)$$

Так, для $Dst = -412$ максимум РПЗ должен опуститься на $L_{\max} = 2,85$. При этом значение максимума в спокойные периоды $L_{\max} \approx 4$. Орбита 8070 км в районе экватора достигает $L = 2,25$, т. е. ниже, чем предполагаемое положение максимума внешнего РПЗ после бури. Динамика радиационных поясов во время магнитных бурь схожей амплитуды описана в [11], где отмечается возможность формирования нового максимума РПЗ в диапазоне L от 2,3 до 3. Так, во время бури 24.03.1991 ($Dst = -300$ нТл) сформировался пик пояса электронов с $E > 8$ Мэв на $L = 2,3$, и с $E \approx 2$ Мэв на $L = 3,1$ [12].

Также во время сильных магнитных бурь возможен захват протонов внутренним РПЗ с формированием в области $2 < L < 2,5$ дополнительного максимума протонов с энергиями 20–70 Мэв [13; 14]. По данным КА CRRES [15], после бури в марте 1991 г. на $L \approx 2,8$ сформировался новый пояс протонов с энергиями в десятки Мэв, эквивалентный стабильному РПЗ, имеющему максимум на $L \approx 1,5$.

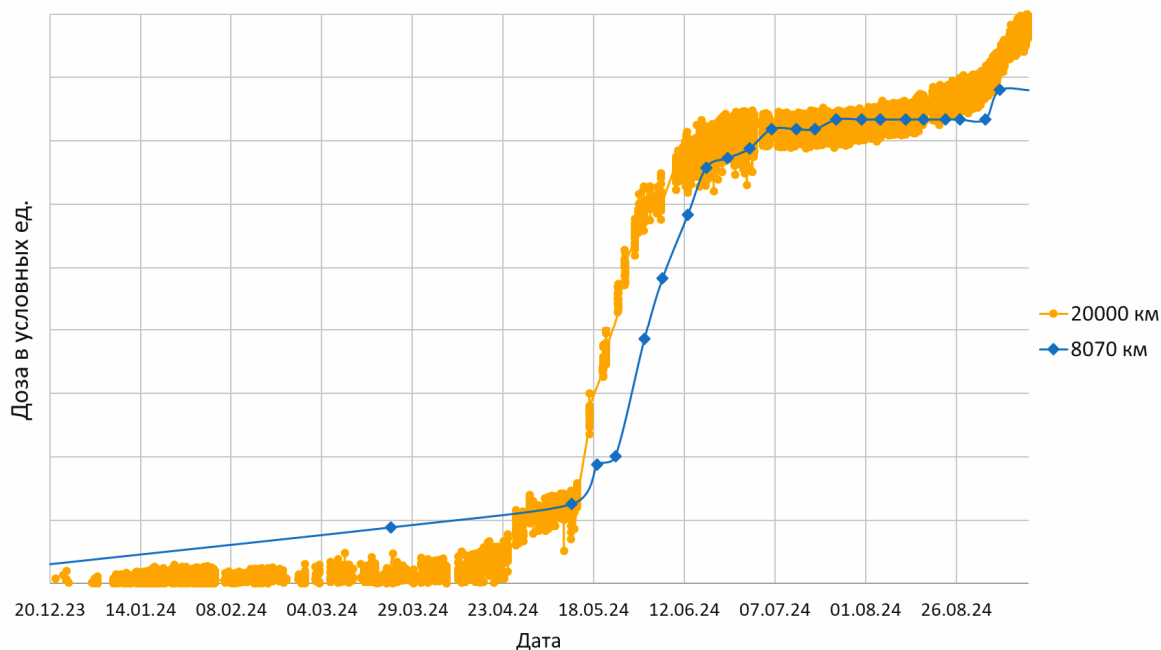


Рис. 4. Набор дозы в зависимости от времени для различных орбит

Fig. 4. Dose set depending on time for different orbits

Так как в ЭККД отсутствует аппаратура для регистрации потоков частиц ионизирующего излучения, для определения динамики смещения положения РПЗ целесообразно провести сравнение динамики скорости набора дозы на КА, находящихся на орбитах 20000 и 8070 км за период 20.12.23 – 26.08.24 (рис. 4). Для данного сравнения графики были отнормированы так, чтобы совпадал перепад значений в период между 12.05.24 и 13.07.24.

Как видно из графиков, на 20000 км скорость набора дозы резко повышается сразу после бури, при этом на 8070 км рост скорости начинается примерно через 11 дней. Такая динамика может объясняться постепенным смещением РПЗ с последующей стабилизацией напряженности магнитного поля Земли и восстановлением положения РПЗ до предбурового уровня.

Заключение

Радиационная обстановка на средней круговой орбите $H = 8070$ км является малоизученной, поэтому ее исследование представляет значительный интерес для разработчиков космической техники, эксплуатируемой на данной орбите. В статье отражены результаты проведенных впервые в отечественной практике долговременных измерений поглощенной дозы ионизирующего излучения для КА с такой орбитой. В результате измерений было установлено, что после экстремальной магнитной бури происходит значительное увеличение скорости набора дозы. Это привело к тому, что зарегистрированная за 722 дня доза превышает расчетное значение с погрешностью не более 10 %: для защит 2 и 3 мм – в 1,18 и 1,24 раз соответственно, для защит 2,5 и 4,8 мм – в 1,54 раз, для защиты 4 мм – в 1,62 раз, для защиты 6,3 мм – в 1,75 раз. По мнению авторов, эти процессы могут быть обусловлены изменением напряженности магнитного поля Земли с последующим смещением границ радиационных поясов.

Библиографические ссылки

1. Балашов С. В., Иванов В. В., Максимов И. А. Мониторинг условий эксплуатации космических аппаратов посредством бортовой аппаратуры контроля негативных факторов // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2003. С. 41–42.
2. Тестоедов Н. А., Кочура С. Г., Максимов И. А. Система мониторинга уровней воздействия космической среды на космические аппараты разработки АО «Информационные спутниковые системы» // Вестник СибГАУ. 2015. Т. 16, № 4. С. 849–856.
3. SpaceWeatherLive [Электронный ресурс]. URL: www.spaceweatherlive.com/ru/solnechnaya-aktivnost/solnechnyy-cikl.html (дата обращения: 18.02.2025).
4. Магнитная буря 10-12 Мая 2024 года, ИКИР ДВО РАН [Электронный ресурс]. URL: www.ikir.ru/ru/News/news_0353.html (дата обращения: 18.02.2025).
5. ОСТ 123-1044 – изменение 1. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование космических аппаратов. Методы расчёта радиационных условий на борту космических аппаратов и установления требований по стойкости радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов к воздействию заряженных частиц космического пространства естественного происхождения. 2017.
6. Центр анализа космической погоды НИИЯФ МГУ [Электронный ресурс]. URL: <https://swx.sinp.msu.ru> (дата обращения: 18.02.2025).
7. Тверская Л. В. О границе инжекции электронов в магнитосферу Земли // Геомагнетизм и аэронавигация. 1986. Т. 26, № 5. С. 864–865.
8. Возрастание солнечных протонов и динамика внешнего радиационного пояса электронов во время солнечных экстремальных событий в декабре 2006 г. / Л. В. Тверская, С. В. Балашов, Н. Н. Веденькин и др. // Геомагнетизм и аэронавигация. 2008. Т. 48, № 6. С. 751–758.
9. Контроль радиационной обстановки на высокоапогейных космических аппаратах / Н. А. Власова, И. В. Гецелев, Т. А. Иванова и др. // Космонавтика и ракетостроение. 2003. Вып. 1(30). 6 с.

10. Мониторинг радиационной обстановки на геостационарной орбите в максимуме 23-го цикла солнечной активности / Т. А. Иванова, Н. Н. Павлов, И. А. Рубинштейн и др. // Физические проблемы экологии (экологическая физика). 2001. № 6. С. 12–20.
11. Модель космоса : науч.-информ. изд-е ; в 2 т. / под ред. М. И. Панасюка, Л. С. Новикова. Т. 1: Физические условия в космическом пространстве. М. : КДУ, 2007. С. 526–547.
12. Multisatellite characterization of the large energetic electron fluxes increase at L=4–7, in the five-day period following the March 24, 1991 solar energetic particle event / J. C. Ingraham, T. E. Cayton, R. D. Belian et al. // Workshop on the Earth's Trapped Particle Environment. AIP Conf. Proc. 1996. P. 103–108.
13. Тверская Л. В. Динамика радиационных поясов Земли // ВМУ. Сер. 3: Физика. Астрономия. 2010. № 4. С. 12–17.
14. Observation and simulation of the rapid formation of a new electron radiation belt during March 24, 1991 SSC / X. Li, M. K. Hudson, J. B. Blake et al. // Workshop on the Earth's Trapped Particle Environment. AIP Conf. Proc. 1996. P. 109–118.
15. Identification of an unexpected space radiation hazard / J. B. Blake, M. S. Gussenhoven, E. G. Mullen, R. W. Fillius // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1992. Vol. 39. P. 1761–1765.

References

1. Balashov S. V., Ivanov V. V., Maksimov I. A. [Monitoring the operating conditions of spacecraft using onboard equipment for monitoring negative factors]. *Voprosi atomnoi nauki i tekhniki. Seriya: fizika radiatsionnogo vozdeistviya na radioelektronnuyu apparaturu*. 2003, Vol 4, P. 41–42 (In Russ.).
2. Testodov N. A., Kochura S. G., Maksimov I. A. [System for monitoring the levels of impact of the space environment on spacecraft developed by Information Satellite Systems]. *Vestnik SibGAU*. 2015, Vol. 14, No. 4, P. 849–856 (In Russ.).
3. Space Weather Live. Available at: www.spaceweatherlive.com/ru/solnechnaya-aktivnost/solnechnyy-cikl.html (accessed: 18.02.2025).
4. *Magnitnaya buriya 10-12 Maya 2024 goda* [Magnetic storm May 10–12, 2024] (In Russ.). Available at: www.ikir.ru/ru/News/news_0353.html (accessed: 18.02.2025).
5. [Industry standard 123-1044 Devices and equipment of spacecraft. Methods for calculating radiation conditions on board spacecraft and establishing requirements for the resistance of spacecraft electronic equipment to the effects of charged particles of natural origin in outer space. 2017 (In Russ.).
6. Centr analiza kosmicheskoi pogody NIIYAF MGU. Available at: <https://swx.sinp.msu.ru> (accessed: 18.02.2025).
7. Tverskaya L. V. [About the Limit of Electron Injection into the Earth's Magnetosphere]. *Geomagnetizm i aeronomiya*. 1986, Vol. 26, No. 5, P. 864–865 (In Russ.).
8. Tverskaya L. V., Balashov S. V., Vedenkin N. N. et al. [Solar proton enhancement and outer electron radiation belt dynamics during the solar extreme events of December 2006]. *Geomagnetizm i aeronomiya*. 2008, Vol. 48, No. 6. P. 751–758 (In Russ.).
9. Vlasova N. A., Getselev I. V., Ivanova T. A. et al. [Monitoring the radiation environment on high-apogee spacecraft]. *Kosmonavtika i raketostroenie*. 2003, Vol. 1(30), P. 6 (In Russ.).
10. Ivanova T. A., Pavlov N. N., Rubinshtein I. A. et al. [Monitoring the radiation situation in geostationary orbit at the maximum of the 23d solar activity cycle]. *Fizicheskie problemi ekologii (ekologicheskaya fizika)*. 2001, No. 6, P. 12–20 (In Russ.).
11. Panasyuk M. I., Novikov L. S. *Model' kosmosa* [Model of Space]. Moscow, KDU Publ., 2007, Vol. 2, P. 526–547.
12. Ingraham J. C., Cayton T. E., Belian R. D. et al. Multisatellite characterization of the large energetic electron fluxes increase at L=4–7, in the five-day period following the March 24, 1991 solar energetic particle event. *Workshop on the Earth's Trapped Particle Environment. AIP Conf. Proc.* 1996, P. 103–108.

13. Tverskaya L. V. [Dynamics of the Earth's radiation belts]. *VMU. Seriya 3. Fizika. Astronomiya*. 2010, No. 4, P. 12–17 (In Russ.).
14. Li X., Hudson M. K., Blake J. B. et al. [Observation and simulation of the rapid formation of a new electron radiation belt during March 24, 1991 SSC]. *Workshop on the Earth's Trapped Particle Environment. Ed. by Reeves G.D. AIP Conf. Proc.* 1996, P. 109–118.
15. Blake J. B., Gussenhoven M. S., Mullen E. G., Fillius R. W. Identification of an unexpected space radiation hazard. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1992, Vol. 39, P. 1761–1765.

© Шелепов М. Д., Иванов В. В., Кочура С. Г.,
Максимов И. А., Молчанов К. В., Прокопьев В. Ю., 2025

Шелепов Марк Дмитриевич – кандидат физико-математических наук, инженер-конструктор 2 категории; АО «РЕШЕТНЁВ». E-mail: shelepovmd@iss-reshetnev.ru. <https://orcid.org/0000-0003-3940-4937>.

Иванов Владимир Васильевич – кандидат технических наук, заместитель начальника отдела; АО «РЕШЕТНЁВ». E-mail: ivanov@iss-reshetnev.ru. <https://orcid.org/0009-0009-0127-4162>.

Кочура Сергей Григорьевич – кандидат технических наук, доцент, заместитель генерального конструктора по электрическому проектированию и системам управления космическими аппаратами; АО «РЕШЕТНЁВ». E-mail: kochura@iss-reshetnev.ru. <https://orcid.org/0009-0009-0844-8487>.

Максимов Игорь Александрович – доктор технических наук, начальник отдела; АО «РЕШЕТНЁВ». E-mail: mia@iss-reshetnev.ru. <https://orcid.org/0009-0005-5953-4909>.

Молчанов Константин Владимирович – инженер 2 категории отдела аэрокосмических исследований; Новосибирский государственный университет. E-mail: K.molchanov@nsu.ru. <https://orcid.org/0009-0002-6560-3649>.

Прокопьев Виталий Юрьевич – заведующий отделом аэрокосмических исследований; Новосибирский государственный университет. E-mail: vprok@cosmos.nsu.ru. <https://orcid.org/0000-0001-9314-5492>.

Shelepov Mark Dmitrievich – Cand. Sc., Design engineer of the 2 category; JSC “Reshetnev”. E-mail: shelepovmd@iss-reshetnev.ru. <https://orcid.org/0000-0003-3940-4937>.

Ivanov Vladimir Vasilievich – Cand. Sc., Deputy Head of Department; JSC “Reshetnev”. E-mail: ivanov@iss-reshetnev.ru. <https://orcid.org/0009-0009-0127-4162>.

Kochura Sergei Grigorievich – Cand. Sc., Deputy General Designer of electrical engineering and control systems of spacecraft; JSC “RESHETNEV”. E-mail: kochura@iss-reshetnev.ru. <https://orcid.org/0009-0009-0844-8487>.

Maksimov Igor Aleksandrovich – Dr. Sc., Head of Department; JSC “Reshetnev”. E-mail: mia@iss-reshetnev.ru. <https://orcid.org/0009-0005-5953-4909>.

Molchanov Konstantin Vladimirovich – Engineer of the 2 category; Novosibirsk State University. E-mail: K.molchanov@nsu.ru. <https://orcid.org/0009-0002-6560-3649>.

Prokopyev Vitaly Yuryevich – Head of Department; Novosibirsk State University. E-mail: vprok@cosmos.nsu.ru. <https://orcid.org/0000-0001-9314-5492>.

Статья поступила в редакцию 22.04.2025; принята к публикации 12.05.2025; опубликована 30.06.2025
The article was submitted 22.04.2025; accepted for publication 12.05.2025; published 30.06.2025

Статья доступна по лицензии Creative Commons Attribution 4.0
The article can be used under the Creative Commons Attribution 4.0 License