

УДК 524.1

ПЛАНЕТАРНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПО ДАННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТА ДЭПРОН НА ИСЗ ЛОМОНОСОВ

© 2022 г. И. А. Золотарев^{1, *}, В. В. Бенгин^{1, 2}, Б. Ю. Юшков¹, О. Ю. Нечаев¹, В. Л. Петров¹, И. В. Яшин¹

¹Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Институт медико-биологических проблем РАН, Москва, Россия

*zolotarev@srd.sinp.msu.ru

Поступила в редакцию 10.06.2021 г.

После доработки 04.08.2021 г.

Принята к публикации 10.10.2021 г.

На ИСЗ *Ломоносов* в 2016–2017 гг. были проведены дозиметрические исследования радиационной обстановки на круговой орбите высотой около 500 км и наклоном 98°. Исследования проводились с помощью прибора ДЭПРОН, в котором использовались два полупроводниковых детектора, расположенных за защитой 0.54 и 0.81 г/см² алюминия. Получено планетарное распределение мощности поглощенной дозы ионизирующего излучения на высоте полета ИСЗ *Ломоносов*, которое было разделено на 4 характерных области: зона низких и средних широт, зона Южно-Атлантической аномалии, зона внешнего радиационного пояса Земли и высокоширотная зона полярных шапок. Определены среднесуточные значения мощностей дозы, регистрируемых в течение суток в каждой из этих областей. Наиболее сильные вариации (до порядка величины) испытывает суточная доза во внешнем поясе. Подтверждена связь вариаций мощности дозы во внешнем поясе с уровнем геомагнитной возмущенности.

DOI: 10.31857/S0023420622020078

ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени выполнен огромный объем экспериментальных и теоретических исследований радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве (ОКП) [1, 2]. Тем не менее, вопросы изучения радиационных условий в космосе продолжают привлекать внимание исследователей и вызывают дискуссии о возможностях развития дозиметрии в космосе и взаимной проверки дозиметрических измерений [3, 4]. Один из аспектов исследований – дозиметрические измерения за малой толщиной защиты. В период с октября 2014 по январь 2016 г. такие исследования были проведены на внешней поверхности *МКС* в рамках эксперимента *EXPOSE-R2* [5]. Дозиметрические измерения проводились полупроводниковыми детекторами за защитой 0.3 г/см². Было показано наличие существенных вариаций мощности дозы в высокоширотных частях траектории полета *МКС*. Во время этого эксперимента зарегистрированы более высокие уровни дозы во внешнем радиационном поясе, которые авторы связывают с повышенной солнечной и геомагнитной активностью.

Результаты эксперимента с прибором ДЭПРОН (Дозиметр Электронов ПРОтонов и Нейтронов, [6]) на ИСЗ *Ломоносов*, проведенного позже, позволили заметно расширить охват областей ОКП, в которых проведен мониторинг радиационных условия, за счет более высокого наклона орбиты. В статье представлены результаты дозиметрических измерений, выполненных за малой толщиной защиты на ИСЗ *Ломоносов*, который был запущен 28.IV.2016 на круговую солнечно-синхронную орбиту высотой 550 км с наклоном 98° [7]. Орбита спутника позволила регулярно, на каждом витке проводить измерения мощности дозы на высокоширотных участках траектории в зоне внешнего радиационного пояса Земли.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Прибор ДЭПРОН представляет собой дозиметр, построенный на основе двух полупроводниковых кремниевых детекторов Д1 и Д2 толщиной 300 мкм каждый (см. рис. 1). Прибор не имел коллиматора, геометрический фактор каждого детектора размером 1 × 1 см оценивается величи-

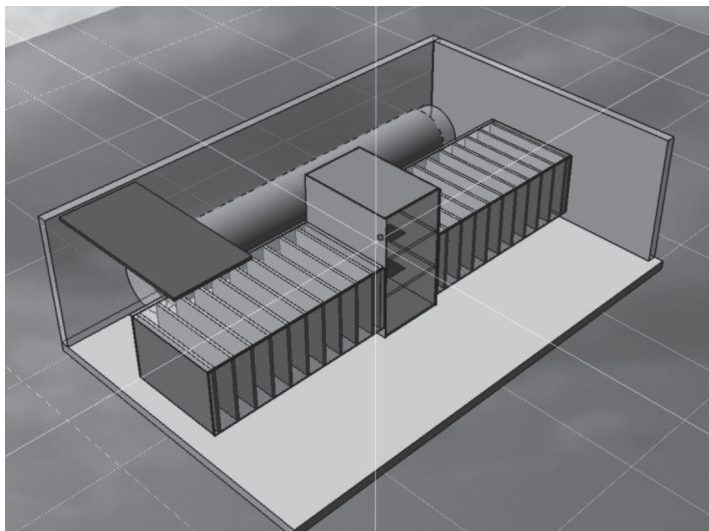


Рис. 1. Модель прибора ДЭПРОН, часть деталей корпуса удалена для лучшего обзора двух полупроводниковых детекторов (обозначены темным тоном).

ной 2π см². Минимальная защищенность детектора Д1 составляет 0.54 г/см² (верхняя крышка прибора из алюминия толщиной 2 мм), детектора Д2 0.81 г/см² за счет алюминиевого модератора толщиной 1 мм, установленного между детекторами. Для детектора Д1 расчетная энергия регистрируемых электронов превышает 1.25 МэВ, для Д2 – 1.75 МэВ [8]. Минимальная расчетная энергия регистрируемых протонов составляет около 20 МэВ для Д1 и около 25 МэВ для Д2.

За время работы спутника прибор ДЭПРОН работал в непрерывном режиме измерений с $25.V.2016$ до $29.XI.2016$. Полученная информация содержит скорости счета заряженных частиц и тепловых нейтронов и поглощенные дозы от заряженных частиц, измеренные каждую секунду, а также суммарные спектры энерговыделения, накопленные за 5 минут. База данных измерений ДЭПРОН доступна по адресу [<http://lomonosov.sinp.msu.ru/>]. На рис. 2 показаны усредненные значения поглощенной дозы для верхнего детектора ДЭПРОН.

Мы провели пространственное разделение данных по зонам с различными значениями геомагнитных координат: область Южно-Атлантической аномалии (ЮАА) – внутреннего радиационного пояса Земли (РПЗ), напряженность магнитного поля $B < 0.21$; область внешнего РПЗ (ВП), параметр Мак-Илвайна $3 < L < 7$; область полярных шапок (ПШ) $L > 7$; и область низких и средних широт (НСШ) $L < 3$, $B > 0.21$.

Для каждой зоны были получены суточные значения мощности поглощенной дозы за время работы прибора в непрерывном режиме. Значения суточной дозы в ЮАА существенно зависят

от координат конкретных пересечений этой области и наличия/отсутствия информации в этот момент. Поэтому мы исключили из дальнейшего рассмотрения дни с неполной информацией: менее 80% экспозиционного времени в сутки, и выключениями прибора более чем на 30 мин. Оставшиеся данные были откорректированы, чтобы уменьшить влияние на результаты пропадания отдельных участков измерений. Для этого значения суточных доз, полученных для каждой из рассматриваемых зон, делились на долю времени нахождения ИСЗ в зоне, в течение которой данные измерений поступали. Так, например, если в течение суток ИСЗ находился в зоне низких и средних широт 20 ч, из них за 18 ч были получены данные, которые в сумме показали дозу 9 мГр, то откорректированное значение вычисляется как: 9 мГр ($20/18$) = 10 мГр.

Откорректированные таким образом значения далее будем называть масштабированными. На рис. 3 показаны суточные значения масштабированной поглощенной дозы для верхнего и нижнего детекторов в выбранных областях. Для каждого из параметров были получены функции распределения и рассчитаны их статистические характеристики.

В табл. 1 приведены медианы, минимальные и максимальные значения распределений поглощенных доз в различных областях за время непрерывной работы прибора с конца мая до конца ноября 2016 г. Для нормально распределенных данных приведены также среднее значения. Как можно видеть, для таких величин средние значения практически совпадают с медианными.

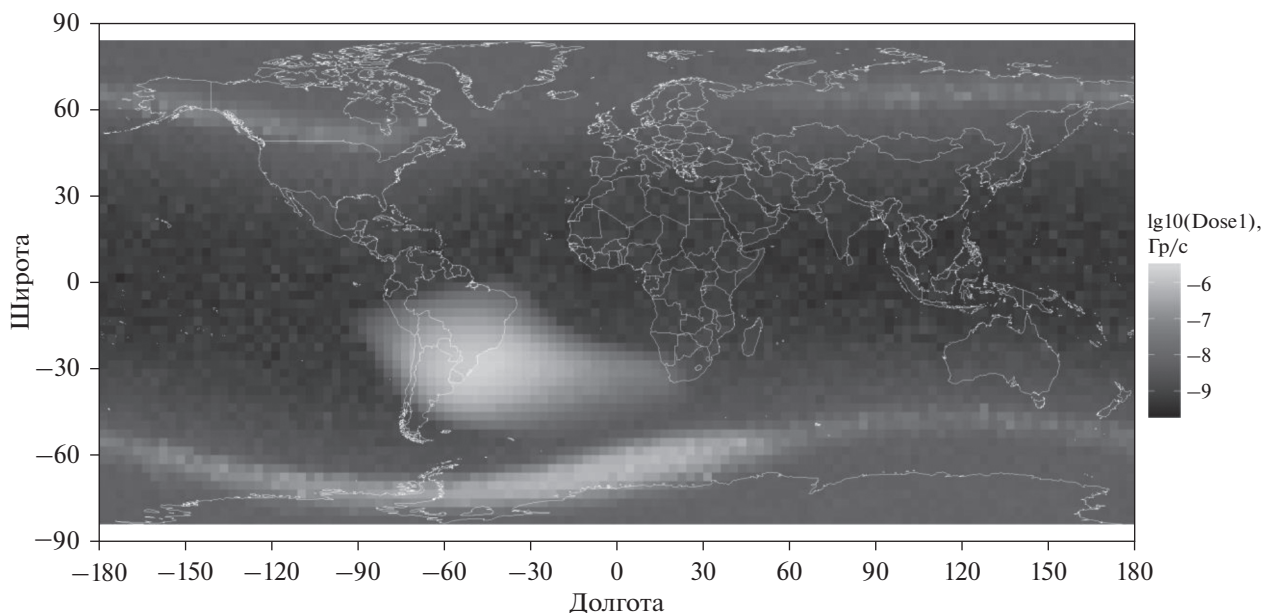


Рис. 2. Географическое распределение поглощенной дозы ДЭПРОН за июнь 2016. Яркость заливки соответствует десятичному логарифму мощности дозы в верхнем детекторе Д1 – Гр/с. Защищенность верхнего детектора Д1 равна 0.54 г/см².

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Дозы радиации в области НСШ и в области ПШ обусловлена, в основном, частицами галактических космических лучей (ГКЛ), обладающими значительной проникающей способностью, а также вкладом альбедного излучения [2]. Поэтому разница доз между первым и вторым детектором незначительная. Для области ПШ разница обусловлена также отсутствием солнечных протонных событий во время проведения измерений [9].

В зоне ЮАА регистрируются, в основном, протоны внутреннего радиационного пояса, спектр которых заметно мягче, чем у ГКЛ. Это сказывается и на разнице доз между первым и вторым детектором. Отношение медианных значений составляет около 56%.

В зоне ВП, где доза обусловлена воздействием электронов, разница доз между первым и вторым детектором составляет больше порядка величины.

Как видно из графиков, представленных на рис. 3, доза в зоне ВП испытывает значительные вариации во времени.

По данным измерений снаружи МКС значения суточной поглощенной дозы во время геомагнитных возмущений могут в 7 раз превышать среднесуточную дозу [10]. По данным ДЭПРОН максимальное значение во ВП 3.3 мГр, оно превосходит суточную медианную дозу во всех областях (1.4 мГр) в 2.5 раза и связано с возмущенной геомагнитной обстановкой.

Эффект известен по работам Л.В. Тверской. Так, по результатам измерений потоков частиц на ИСЗ GLONASS в декабре 2006 г. [11] было показана

Таблица 1. Суточная доза в различных областях. Период измерений прибора с 25.V.2016 до 29.XI.2016

		Область низких и средних широт	Область полярных шапок	Область ЮАА	Внешний радиационный пояс
Верхний детектор, мкГр/сут	Минимум	45	41	460	81
	Медиана	56	47	767	558
	Максимум	85	67	1050	3300
Нижний детектор, мкГр/сут	Минимум	35	35	279	30
	Медиана	42	41	432	42
	Максимум	48	47	557	137
	Среднее	42	41	430	—

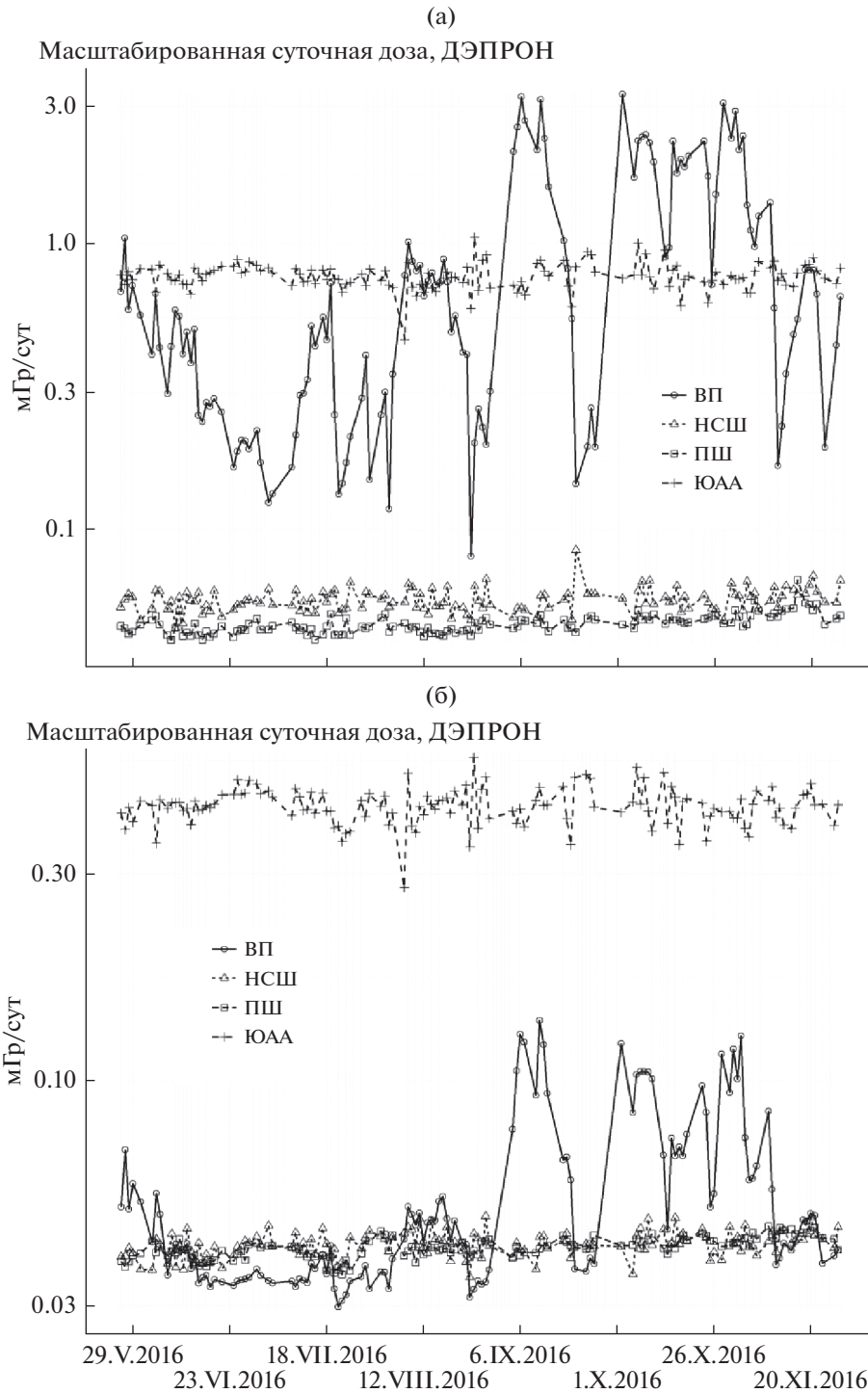


Рис. 3. Масштабированная суточная доза, в верхнем (а) и нижнем (б) детекторе ДЭПРОН за 2016. Защищенность верхнего детектора – 0.54 г/см^2 , нижнего – 0.81 г/см^2 . По оси ординат – мГр/сут.

но, что поток релятивистских электронов во внешнем РПЗ падает на несколько часов в начале бури, определенному по падению Dst индекса, а затем потоки возрастают на порядок и медленно, в течение месяца, снижаются. При этом авторы [11] отмечают одновременное снижение потоков релятивистских электронов и дозы во внешнем РПЗ.

Для суточных доз во ВП по измерениям ДЭПРОН было проведено сравнение геомагнитной обстановки и условий в солнечном ветре (СВ) для поиска предпосылок к изменениям. Мы включили в сравнение геомагнитные индексы Dst и планетарный индекс Kp . Данные сопоставлены на рис. 4.

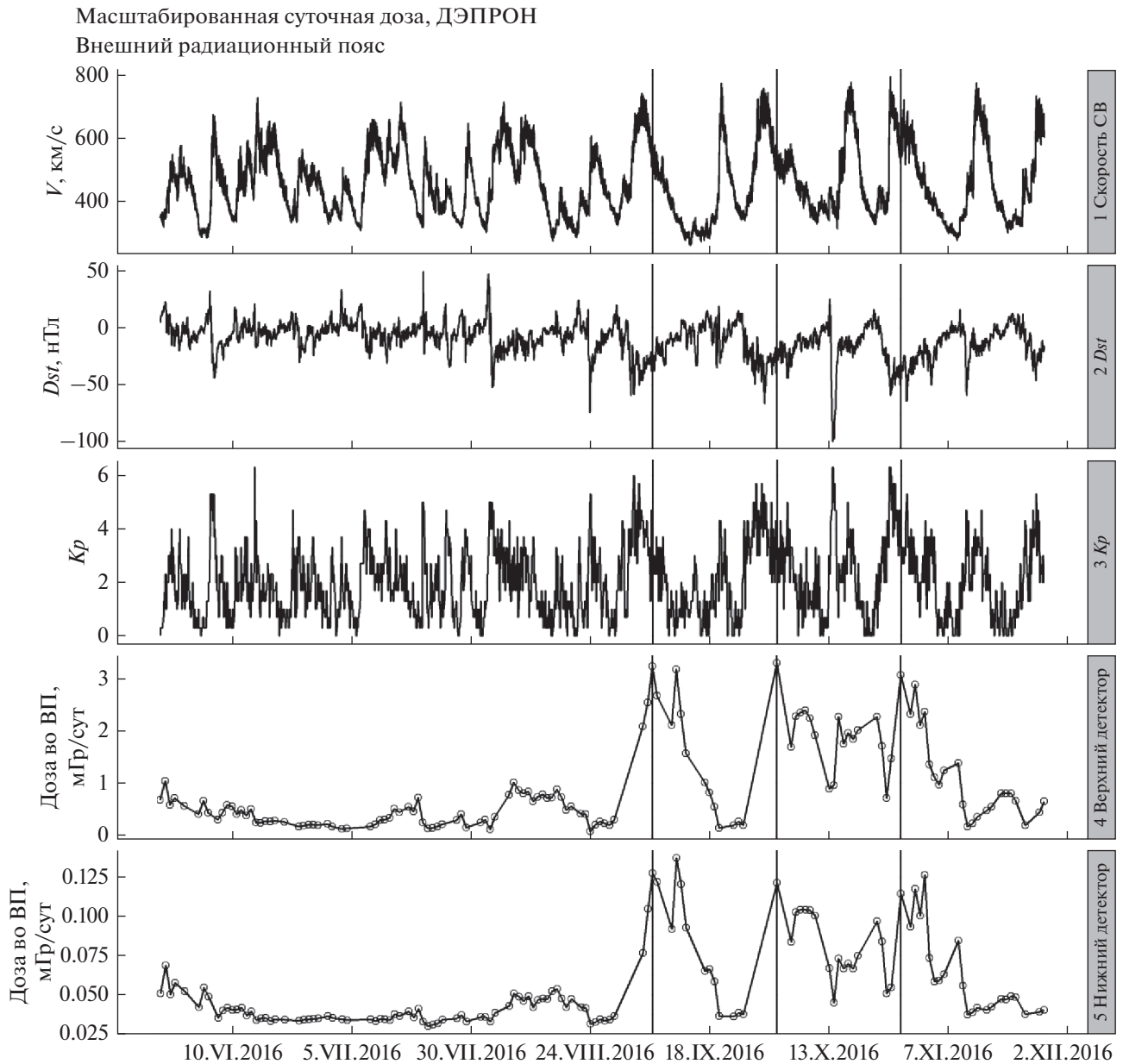


Рис. 4. Масштабированная суточная доза в ВП. Первая панель – скорость солнечного ветра (V), км/с, вторая панель – геомагнитный индекс – Dst , нТл. Третья панель – планетарный индекс, Kp . Четвертая панель – доза по ВП в верхнем детекторе ДЭПРОН. Нижняя панель – доза во ВП в нижнем детекторе ДЭПРОН.

На рис. 4 видна периодичность повышенных доз во ВП, длительность периода примерно равна 25 дней (период выделен на рисунках в сетке). Вертикальными линиями мы выделили три характерных случая регистрации максимальной дозы во ВП. Максимумы суточной дозы во ВП наблюдаются через несколько дней после прихода высокоскоростного потока СВ. Максимумы высокоскоростного потока зарегистрированы за 3 дня до выделенных моментов максимальной дозы во ВП.

Три выделенных момента находятся на фазе медленного восстановления после минимумов в Dst индексе. Длительность понижения в Dst индексе составляет от 5 до 7 дней до пика в дозе во ВП. При этом начало понижения в Dst плавное, продолжается 3–4 дня. Нами замечено, что величина суточной дозы во ВП согласуется с усредненным – Dst за предшествующие 4 дня.

Выделенные моменты попадают на время спада Kp индекса после длительных возмущений до величины Kp 4–5. Длительность возрастания Kp

индекса составляет от 5 до 7 дней до максимума в дозе во ВП.

До сентября 2016 г. наблюдаются резкие скачки в индексе *Dst*, но отсутствуют длительные понижения. Мы не наблюдаем максимумов в дозе во внешнем поясе после прихода высокоскоростных потоков. Мы связываем это с различной геоэффективностью потоков СВ до и после сентября 2016.

ВЫВОДЫ

Данное исследование позволило выявить особенности радиационной обстановки и вклад в суточную мощность дозы на разных участках траектории ИСЗ *Ломоносов*. Для менее защищенного детектора (0.54 г/см^2) медиана дозы в НСШ области составила 56 мкГр/сут, а в области ПШ 47 мкГр/сут. Основную дозовую нагрузку составляют пересечения внешнего РПЗ – медиана 558 мкГр/сут – и ЮАА 767 мкГр/сут. При этом суточная доза во ВП испытывает изменения на порядок величины.

Для более защищенного детектора (0.81 г/см^2) средняя доза в ЮАА составила 430 мкГр/сут, на участках ПШ и НСШ доза составила 42 мкГр/сут.

Подтверждена связь вариации дозы во ВП со возрастанием скорости солнечного ветра и минимумами *Dst* индекса. Максимумы дозы во ВП наблюдаются через несколько дней после прихода высокоскоростных потоков СВ, на фазе восстановления после плавных минимумов в *Dst* индексе и после максимумов в *Kp* индексе. Существенным фактором формирования высокого уровня суточной дозы во ВП является длительность понижения *Dst* составила 5–7 дней.

Полученные результаты представляют практический интерес в свете обсуждающихся планов создания пилотируемой станции, наклонение орбиты которой может быть больше, чем 51.6° .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Омхольт А., Хольтер О., Эгеланд А.* Космическая геофизика. М.: МИР, 1976.
2. *Галкин В.И.* Модель космоса. Т. 1. Излучение на малых высотах / Под ред. М.И. Панасюк, Л.С. Новиков. М.: КДУ, 2007.
3. *Hellweg C. et al.* Round Table Discussion – Part 1: The Future of Space Radiation Research // 42nd COSPAR Sci. Assem. 2018. V. 42. P. F2.2-31-18.
4. *Benton E.R. et al.* 5.2.2 Intercomparison of Radiation Detectors and Dosimeters for Use in Manned Space Flight // *Radioisotopes*. 2019. V. 68. № 6. P. 411–418.
5. *Dachev T.P. et al.* Overview of the ISS Radiation Environment Observed during the ESA EXPOSE-R2 Mission in 2014–2016 // *Sp. Weather*. 2017. V. 15. № 11. P. 1475–1489.
6. *Benghin V.V. et al.* An Experiment in Radiation Measurement Using the Depron Instrument // *Space Sci. Rev.* 2018. V. 214. № 1. P. 9.
7. *Sadovnichii V.A. et al.* “Lomonosov” Satellite – Space Observatory to Study Extreme Phenomena in Space // *Sp. Sci. Rev.* 2017. V. 212. P. 1705–1738.
8. Взаимодействие электронов с веществом. Определение пробега электронов β -распада методом поглощения [Электронный ресурс]. URL: http://nuclphys.sinp.msu.ru/p/zad_04.pdf
9. *Базилевская Г.А. и др.* Характерные особенности солнечных космических лучей в 21–24-м циклах солнечной активности по данным каталогов солнечных протонных событий // *Геомагнетизм и аэронаука*. 2021. Т. 61. № 1. С. 8–15.
10. *Dachev T.P.* Relativistic electron precipitation bands in the outside radiation environment of the International space station // *J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys.* 2018. V. 177. P. 247–256.
11. *Тверская Л.В. и др.* Возрастания солнечных протонов и динамика внешнего радиационного пояса электронов во время сильных солнечных событий в декабре 2006 г. // *Геомагнетизм и аэронаука*. 2008. Т. 48. № 6. С. 751–758.