

РАДИАЦИОННЫЕ УСЛОВИЯ НА ОРБИТЕ И ПОВЕРХНОСТИ МАРСА

И.П. Безродных, Е.И. Морозова,
А.А. Петрукович
(ИКИ РАН)
В.Т. Семёнов
(ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»)

Для минимума солнечной активности сделана оценка поглощённой дозы радиации на орбите и поверхности Марса. Рассмотрен вариант оптимальной дозовой нагрузки для пилотируемых космических аппаратов, когда массовая толщина защиты формируется за счёт корпуса аппарата и дополнительных элементов, обеспечивающих жизнедеятельность экипажа. Показано, что на орбите Марса поглощённая доза радиации под сферическим экраном из алюминия массовой толщиной 20 г/см^2 составляет величину около $0,4 \text{ рад/год}$ от частиц солнечных космических лучей (СКЛ), в случае сверхмощной солнечной вспышки, аналогичной вспышкам 11.05.1959 и 12.11.1960 гг., уровень радиации не превысит 5 рад за вспышку. Поглощённая доза от частиц галактических космических лучей (ГКЛ) на орбите Марса под сферическим экраном 20 г/см^2 равна $\sim 10 \text{ рад/год}$.

На поверхности Марса доза радиации от частиц СКЛ равна $\sim 0,11 \text{ рад/год}$ и от частиц ГКЛ порядка $\sim 5,1 \text{ рад/год}$ (с учётом вторичных частиц). В случае сверхмощной солнечной вспышки поглощённая доза радиации на поверхности Марса увеличится на $\sim 2 \text{ рад}$. По результатам оценок сделан вывод, что атмосфера Марса эффективно защищает планету от космической радиации. Приведённые расчёты могут быть основой для оценки радиационных условий при планировании полётов к Марсу в период минимума солнечной активности 2018 – 2022 гг.

Ключевые слова: Марс, марсианская атмосфера, радиация, космические лучи, космические аппараты.

Введение

При планировании полётов пилотируемых космических аппаратов (КА) радиационные условия являются одним из основных факторов, определяющих возможность реализации проектов и длительности их активного функционирования. Радиационная обстановка в межпланетном пространстве формируется потоками галактических космических лучей (ГКЛ) и потоками солнечных космических лучей (СКЛ): частицами, ускоренными в солнечных вспышках и на ударных волнах. Временные и даже пространственные изменения потоков ГКЛ и СКЛ тесно связаны с изменением солнечной активности (СА) и, в частности, с периодическим изменением СА – 11-летним солнечным циклом. Потоки ГКЛ изменяются в противофазе с СА (максимальны вблизи минимума активности). Потоки СКЛ отражают изменение СА (нарастают на фазе роста СА, спадают на фазе спада СА и максимальны вблизи максимума).

Основной задачей при расчёте радиационных дозовых нагрузок является выбор для заданных радиационных условий оптимальной защиты от воздействия радиации на элементы КА и экипаж. Оптимальная защита предполагает не только уменьшение поглощённой дозы радиации, но и уменьшение её воздействия на защищаемый объект, т. е. уменьшение эквивалентной дозы (ухудшение качества радиации).

Для оценки поглощённой дозы обычно используют единицы измерения сГр (сантигрей) или рад

($1 \text{ рад} = 1 \text{ сГр} = 100 \text{ эрг/г}$), но при этом не учитывается качество радиации. Эквивалентная доза равна произведению поглощённой дозы на коэффициент качества w . Коэффициент качества зависит от энергии и типа частиц. Для электронов $w = 1$, для нейтронов $0,1 - 2 \text{ МэВ}$ $w = 10$, для протонов $>2 \text{ МэВ}$ $w = 5$, для α -частиц и тяжёлых ядер $w = 20$. Эквивалентная доза измеряется в единицах Звт ($1 \text{ зиверт} = 100 \text{ сГр}$ умноженное на коэффициент качества).

Оценки радиационных условий и расчёт дозовых нагрузок на орбите Марса и на поверхности Марса были выполнены по данным о потоках частиц вблизи минимума СА. Эти данные можно использовать для оценки радиационных условий для минимума СА, ожидаемого в 2018 – 2022 гг.

Оценка поглощённой дозы радиации на орбите Марса

Солнечные космические лучи. На рис. 1 показаны результаты оценки поглощённой дозы радиации на орбите Марса от частиц СКЛ за один год. Для расчёта использовались пересчитанные для орбиты Марса ($1,5 \text{ а. е.}$) средние данные о потоках частиц для минимума СА, полученные в измерениях на орбите Земли [1].

На орбите Марса внутри КА под защитой из алюминия массовой толщиной в 10 г/см^2 поглощённая доза радиации от частиц СКЛ вблизи минимума СА равна $\sim 1 \text{ рад/год}$, при толщине защиты в 20 г/см^2 поглощённая доза от частиц СКЛ около $0,4 \text{ рад/год}$. Следует отметить, что использование защиты $\sim 20 \text{ г/см}^2$ будет достаточно эффективно

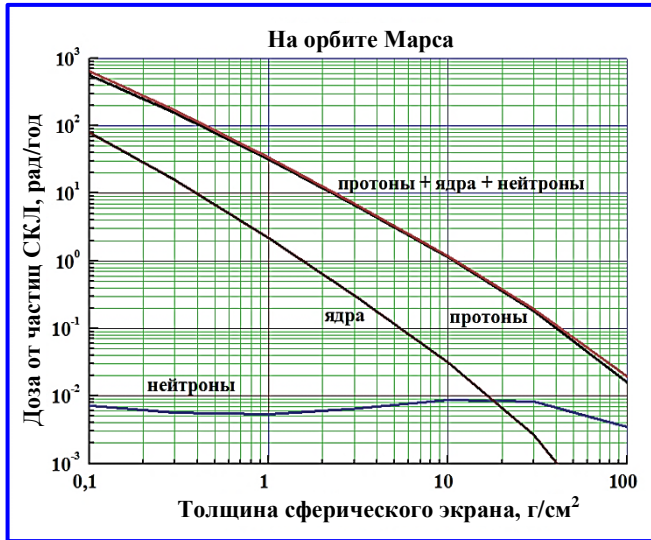


Рис. 1. Вклад в поглощённую дозу радиации различных компонент СКЛ внутри сферы из алюминия на орбите Марса для минимума СА

Таблица 1

Верхняя оценка поглощённой дозы радиации на орбите Марса от частиц СКЛ сверхмощных солнечных вспышек

Толщина экрана из AL, г/см ²	Доза на орбите Марса от СКЛ, рад	
	11 мая 1959 г.	12 ноября 1960 г.
1	200	100
3	50	25
5	30	20
10	12	10
20	5	5

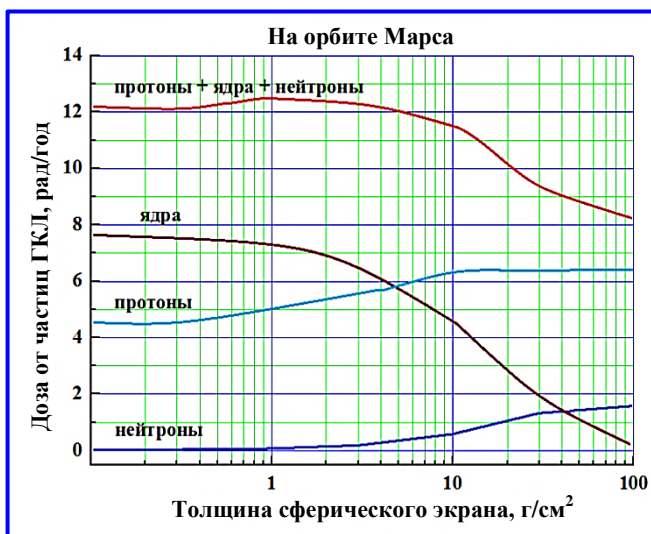


Рис. 2. Ожидаемая поглощённая доза радиации за год внутри сферы из алюминия от частиц ГКЛ в период близкий к минимуму СА

и в условиях максимума СА, даже если произойдёт сверхмощная солнечная вспышка (с потоками протонов от $\geq 5 \cdot 10^9$ до $\leq 5 \cdot 10^{10}$ частиц/см² с энергией частиц >30 МэВ).

Вероятность возникновения хотя бы одной сверхмощной солнечной вспышки в течение года в 24 цикле СА не превышает величины 0,008 [2]. Но если предположить, что в этот период произойдёт хотя бы одна сверхмощная вспышка с энергетическим спектром частиц, аналогичным спектрам солнечных вспышек 11.05.1959 и 12.11.1960 гг. [3], то поглощённая доза за вспышку на орбите Марса будет соответствовать значениям, приведенным в табл. 1, и за защитой экрана 20 г/см² не превысит 5 рад.

Галактические космические лучи. На рис. 2 приведены результаты оценки поглощённой дозы радиации за год внутри сферы из алюминия на орбите Марса от частиц ГКЛ. Использовались данные, рассчитанные для минимума СА спектры ГКЛ на орбите Марса [4]. В диапазоне толщин защитного экрана от 0,1 до 10 г/см² поглощённая доза радиации составляет величину около 12 рад/год. Следует ожидать, что практически все сбои и возможные отказы в работе электронных устройств КА на орбите Марса в период близкий к минимуму СА будут связаны с тяжёлыми ядрами и высокоэнергичными протонами ГКЛ [5]. Под радиационной защитой менее 3 г/см² поглощённая доза определяется в основном ядрами гелия и более тяжёлыми ядрами, под сферическим экраном массовой толщиной 20 г/см² доза от ядер ГКЛ уменьшается более чем в 2,5 раза (от ~8 до 3 рад/год), при этом полная доза радиации определяется в основном протонами. При толщине защитного экрана 40 г/см² доза от ядер ГКЛ уменьшается в 4 раза (от ~8 до 2 рад/год). При дальнейшем увеличении толщины защиты уменьшение поглощённой дозы от ядер ГКЛ замедляется, так как при увеличении толщины увеличивается вероятность образования от высокоэнергичных протонов ливней частиц, способных повлиять на работу электронных систем [5]. В связи с этим радиационную защиту толщиной в 40 г/см² можно рекомендовать как оптимальную защиту от частиц ГКЛ.

Оценка поглощённой дозы радиации на поверхности Марса

Для оценки дозы радиации на поверхности Марса необходимо знать распределение количества вещества (атмосферы) над поверхностью. Атмосфера Марса на 95% состоит из углекислого га-

за, остальные 5% это пары воды и другие газовые компоненты. Модель распределения над поверхностью Марса газа CO_2 приведена на рис. 3 [6]. Количество вещества атмосферы (CO_2) в течение суток меняется в пределах, ограниченных двумя кривыми на рисунке. Реальное распределение вещества над поверхностью Марса зависит не только от газовой составляющей, но и от пылевой составляющей атмосферы. Распределение пыли на поверхности и в атмосфере Марса зависит от географического положения и метеоусловий (сезонов) [7, 8]. Пыль играет важную роль в защите поверхности Марса от космической радиации. Оценки влияния плотности атмосферы (с учётом пылевой составляющей) на дозовые нагрузки от частиц ГКЛ и СКЛ приведены в работе [9]. Доза радиации от частиц ГКЛ слабо зависит от высоты и вариации дозы на поверхности, связанная с вариациями пылевой составляющей, менее 0,1%. Доза радиации от частиц ГКЛ (с учётом вторичных частиц) при плотности атмосферы $19,6 \text{ г/см}^2$ составляет $\sim 163 \text{ мкГр/сутки}$, что в годовом исчислении $\sim 6 \text{ рад}$. Атмосфера Марса является достаточно надёжной защитой для основной массы частиц потоков СКЛ. Поглощённая доза зависит не только от величины потока частиц, но в значительной степени от жёсткости спектра и плотности атмосферы. В работе [9] для четырёх мощных вспышек вычислены дозовые нагрузки на поверхности Марса. Например, для мощной солнечной вспышки сентября 1989 г. при изменении плотности атмосферы в 4,7 раза (от $6,25$ до $29,4 \text{ г/см}^2$) поглощённая доза уменьшается в 4,6 раз. События с большим потоком частиц и мягким спектром более чувствительны к присутствию пыли в атмосфере. В частности пока-

зано, что вариации дозы на поверхности, связанные с вариациями пылевой составляющей, для частиц СКЛ не превышают 10 – 15%.

Следует отметить, что все вычисления в работе [9] сделаны для вертикальной атмосферы при вертикальном профиле плотности. Однако для изотропных потоков частиц необходимо учитывать угловое распределение проходимого частицами вещества атмосферы. Суммарное количество вещества атмосферы, включая пыль, в вертикальном направлении по-видимому, может составлять не менее 25 г/см^2 , а в направлении на горизонт с учётом пылевой составляющей величина атмосферы не менее 50 г/см^2 . Используя эти данные и данные распределения потоков частиц на орбите Марса, можно оценить уровень радиации на поверхности Марса. Однако взаимодействие высокоэнергичных частиц СКЛ и ГКЛ с атмосферой и грунтом Марса (это в основном кремний 44% SiO_2 и железо 16,8% FeO) приводит к появлению значительных потоков вторичных частиц. Наиболее опасными являются частицы с высоким коэффициентом качества, например, у нейтронов с энергией $0,1 - 2 \text{ МэВ}$ $w = 10$.

На рис. 4 приведены результаты расчёта энергетических спектров нейтронов, образованных в результате взаимодействия частиц СКЛ и ГКЛ с ядрами атомов атмосферы и марсианского грунта. На этом же рисунке представлены результаты оценки поглощённой дозы радиации от нейтронов. На поверхности Марса вблизи минимума СА суммарный поток вторичных нейтронов за год, созданных частицами ГКЛ, почти в 100 раз больше потока нейтронов, созданных частицами СКЛ. Поглощённая доза от нейтронов ГКЛ ($1,1 \text{ рад/год}$)

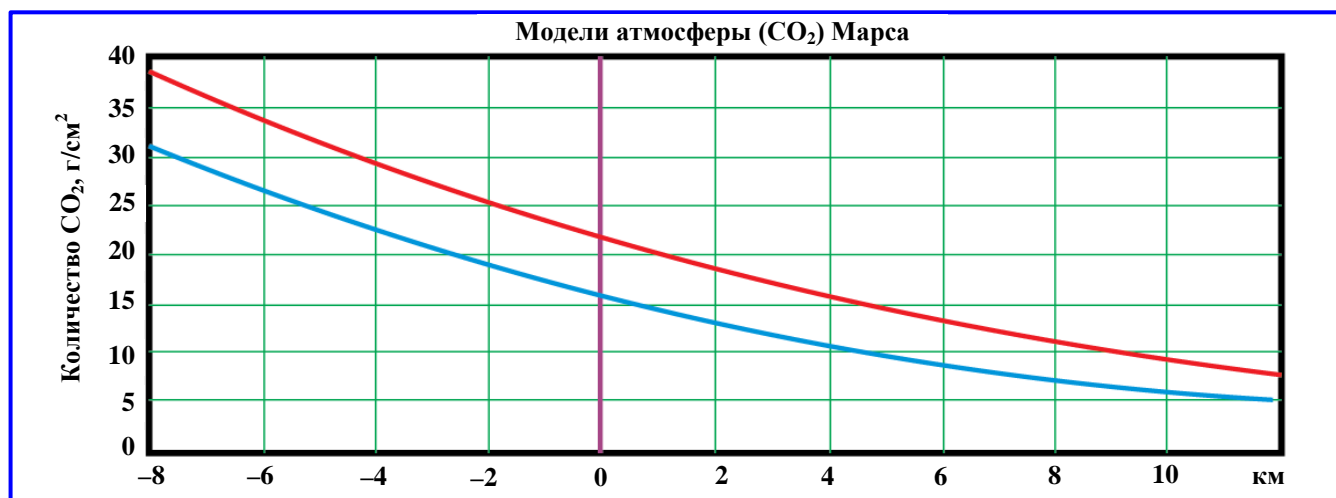


Рис. 3. Модель вертикального распределения количества газа CO_2 над поверхностью Марса разработана по данным измерений КА NASA (Simonsen, 1997 [6], за 0 км принята высота, соответствующая «уровню моря»)

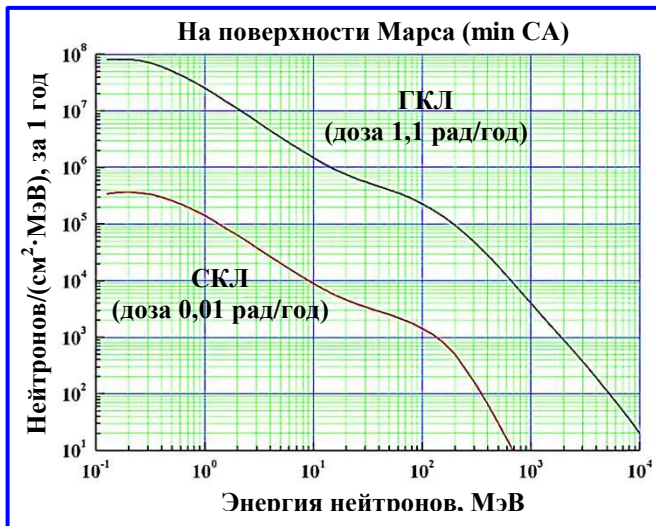


Рис. 4. Спектры нейтронов, сформированные вследствие взаимодействия частиц ГКЛ и СКЛ с атомами атмосферы и грунта Марса

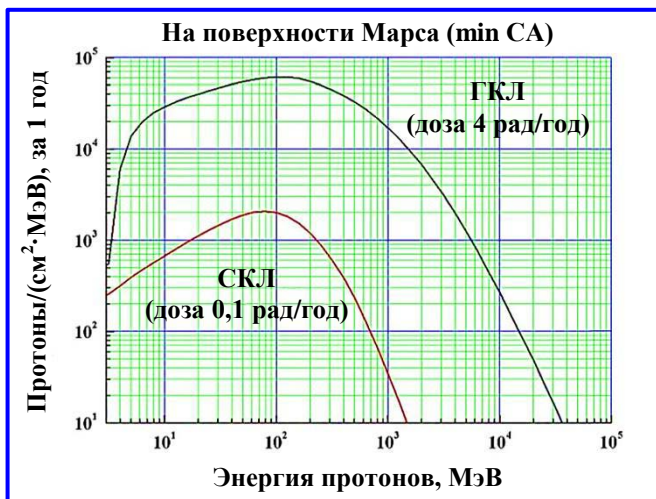


Рис. 5. Спектры протонов ГКЛ и СКЛ и поглощённая доза радиации на поверхности Марса

также на два порядка больше (0,01 рад/год).

На рис. 5 приведены результаты расчёта суммарных энергетических спектров первичных и вторичных заряженных частиц (протонов) СКЛ и ГКЛ. При расчёте учитывалась зависимость энергетических спектров потоков частиц от количества вещества, проходимого частицами в атмосфере Марса. При изменении угла прихода потока частиц от нуля до 90° количество вещества меняется от 25 до 50 г/см². На этом же рисунке представлены результаты оценки поглощённой дозы радиации. На поверхности Марса, вблизи минимума СА поглощённая доза радиации от заряженных частиц ГКЛ (4 рад/год).

В период, близкий к минимуму СА, поглощённая доза радиации на поверхности Марса, в основ-

ном, определяется потоками частиц ГКЛ. Суммарная поглощённая доза на поверхности Марса от потоков частиц СКЛ и ГКЛ, включая потоки вторичных заряженных частиц и нейтронов, равна ~5,2 рад/год, это при среднем коэффициенте качества радиации $w = 5$ соответствует эквивалентной дозе 0,26 Зв/год.

Атмосфера достаточно надёжно защищает поверхность Марса от частиц СКЛ и существенно уменьшает дозовые нагрузки от наиболее опасной ядерной компоненты ГКЛ. Даже сверхмощные солнечные вспышки, аналогичные вспышкам 11.05.1959 и 12.11.1960 гг. дают увеличение поглощённой дозы радиации на поверхности Марса не более чем на ~2 рад.

Расчётные значения поглощённой дозы радиации приведены в табл. 2.

Выводы

Выбор радиационной защиты от ионизирующих излучений в космических условиях всегда является результатом компромисса между требованием обеспечить необходимый уровень радиационной безопасности и существующим ограничением общей массы вещества защитного экрана. Для космической станции, находящейся на орбите Марса в период минимума СА, оптимальная толщина радиационной защиты из алюминия от частиц СКЛ составляет величину ~20 г/см². При такой толщине защитного экрана поглощённая доза радиации от частиц СКЛ равна ~0,4 рад/год. Даже в случае маловероятного события – сверхмощной солнечной вспышки защитный экран толщиной в 20 г/см² позволит снизить уровень радиации до ~5 рад за вспышку. Данная толщина радиационного экрана позволяет уменьшить поглощённую дозу радиации от ядер гелия и более тяжёлых ядер ГКЛ более чем 2,5 раза, до ~3 рад/год. Суммарная доза радиации от всех видов частиц ГКЛ уменьшится на ~16% и составит ~10 рад/год. При увеличении толщины защиты происходит уменьшение вклада в поглощённую дозу наиболее опасной ядерной компоненты ГКЛ. Заметим, что для орбиты Марса толщина защиты в 40 г/см² является, по-видимому, оптимальной: полная поглощённая доза от всех видов частиц ГКЛ уменьшается на ~25%, а доза от ядерной (наиболее опасной) компоненты уменьшается в два раза, с 3 до 1,5 рад/год. При этом существенно ухудшается качество радиации, уменьшается средний коэффициент качества. Радиация с низким качеством гораздо более безопасна для электронных систем и биологических объектов, чем радиация с высоким качеством.

Таблица 2

Расчётные значения поглощённой дозы радиации (рад/год) на орбите (защита 20 г/см²) и на поверхности Марса (атмосфера от 25 до 50 г/см²) для периода минимума СА. Для сравнения указаны дозы от сверхмощной солнечной вспышки 11 мая 1959 г.

СКЛ		ГКЛ		Сверхмощная солнечная вспышка 11 мая 1959 года	
Орбита	Поверхность	Орбита	Поверхность	Орбита	Поверхность
~0,4	~0,1	~10	~5,1	~5	~2

Атмосфера Марса эффективно защищает поверхность планеты от потоков частиц СКЛ и существенно ослабляет потоки частиц ГКЛ. Суммарная поглощённая доза на поверхности Марса от потоков СКЛ и ГКЛ, включая вторичные заряженные частицы (частицы ливней и нейтроны) в период минимума СА будет составлять величину около 5,2 рад/год. При качестве радиации $w = 5$ эквивалентная доза радиации около 0,26 Звт/год. При сверхмощной солнечной вспышке (маловероятное событие) доза радиации на поверхности Марса увеличится на ~2 рад.

Поскольку электронная компонента частиц ГКЛ и СКЛ много меньше потоков протонов, то вкладом в поглощённую дозу радиации вторичного жёсткого электромагнитного излучения электронов можно пренебречь.

Приведённые расчёты могут стать основой для оценки радиационных условий при планировании полётов к Марсу в минимуме СА 2018 – 2022 гг.

Литература

1. SPENVIS (2013), SPENVIS: The European Space Agency (ESA) Space Environment System, <http://www.spennis.oma.be>.

2. Ионизирующие излучения космического пространства и их воздействия на бортовую аппаратуру космических аппаратов / под науч. ред. докт. техн. наук, проф. Г. Г. Райкунова. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2013. – 256 с.

3. Ядерные взаимодействия в защите космических кораблей / О. Д. Бриль, А. И. Вихров, С. С. Городков [и др.]. – М. : АТОМИЗДАТ, 1968. – 264 с.

4. Badhwar-O'Neill 2010 galactic cosmic ray model / P. O'Neill // IEEE Trans. Nucl. Sci., 2010. – 57(6). – P. 3148 – 3153.

5. Радиационные условия на орбите КА «Ионосфера» / И. П. Безродных, Е. И. Морозова, А. А. Петрукович, [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М. : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2011. – Т. 123. – № 4. – С. 19 – 28.

6. Simonsen L. C., Analysis of Lunar and Mars Habitation Modules for the Space Exploration Initiative, Chapter-4 in Shielding Strategies for Human Space Exploration / Ed. J. W. Wilson, J. Miller, A. Konradi, and F. A. Cucinotta. – NASA CP-3360. – 1997. – С. 43 – 77.

7. P. J. Gierasch, R. M. Goodi The effect of dust on the temperature of the Martian atmosphere / P. J. Gierasch, R. M. Goodi // J. Atmos. Sci. – 1972. – 29. – P. 400 – 402.

8. A climate database for Mars / J. L. Lewis, M. Collins, P. L. Read at all // J. Geophys. Res. – 104 (E10). – 24. – 177-24, 194. – 1999.

9. Influence of dust loading on atmospheric ionizing radiation on Mars / Ryan B. Norman, Guillaume Gronoff, and Christopher J. Mertens // Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 2014. – V. 119. – 452 – 461.

Поступила в редакцию 12.02.2014

Иннокентий Петрович Безродных, канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотрудник, т. (495) 333-38-38, e-mail: d54x@mail.ru.

Евгения Ивановна Морозова, канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотрудник, т. (495) 333-20-00, e-mail: morozova.evgeniya2012@yandex.ru.

Анатолий Алексеевич Петрукович, член-корреспондент РАН, зав. отделом, т. (495) 333-32-67, e-mail: apetruko@iki.rssi.ru.

Владимир Тимофеевич Семёнов, начальник лаборатории, т. (495) 366-38-38, e-mail: vniiem@vniiem.ru.