АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК, 2024, том 58, № 4, с. 373–383

УДК 551.521.6: 53.087.4

НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИАЦИИ НА БОРТУ TGO ЭКЗОМАРС В 2018–2023 г.

© 2024 г. Й. Семкова[a,*], В. Бенгин[b,], Р. Колева[a], К. Крастев[a], Ю. Матвейчук[a], Б. Томов[a], Н. Банков[a], С. Малчев[a], Ц. Дачев[a], В. Шуршаков[b], С. Дробышев[b], И. Митрофанов[c***], Д. Головин[c], А. Козырев[c], М. Литвак[c], М. Мокроусов[c]**

[a] Институт космических исследований и технологии Болгарской академии наук, София, Болгария
[b] Государственный научный центр Российской Федерации
Институт медико-биологических проблем РАН, Москва, Россия
[c] Институт космических исследований РАН, Москва, Россия
*e-mail: *jsemkova@stil.bas.bg; **v_benghin@mail.ru; ***mitrofanov@np.cosmos.ru*

Поступила в редакцию 12.12.2024 г.
После доработки 12.02.2024 г.
Принята к публикации 16.02.2024 г.

В статье дано краткое описание дозиметра Liulin-MO, который входит в состав прибора FREND (Fine Resolution Epithermal Neutron Detector), установленного на космическом аппарате TGO (Trace Gas Orbiter) миссии ExoMars-2016. С апреля 2018 г. TGO работает на орбите вокруг Марса. Представлены данные о радиационной обстановке на орбите Марса на фазе спада 24-го цикла солнечной активности и фазе роста 25-го цикла. В рассматриваемый период наблюдался максимум потока и мощности дозы, обусловленный галактическими космическими лучами (ГКЛ). В период с июля 2021 г. по март 2023 г. дозиметром Люлин-МО зарегистрировано восемь возрастаний потоков частиц и мощности дозы от солнечных протонных событий (СПС). Представлены данные о радиационной обстановке во время СПС на орбите Марса в июле 2021 г. – марте 2022 г., когда Марс находился на противоположной по отношению к Земле стороне от Солнца. Проведено сравнение потоков частиц, измеренных на орбитах около Земли и Марса.

Ключевые слова: орбита Марса, доза радиации, солнечная активность, галактические космические лучи, солнечные протонные события

DOI: 10.31857/S0320930X24040018, **EDN**: LVIPUT

ВВЕДЕНИЕ

Как хорошо известно (Frank и др., 1965; Grigoriev и др., 1965; National Research Council., 1967; Мирошниченко, Петров, 1985), космическая радиация является одним из неблагоприятных факторов, ограничивающих возможности пилотируемых полетов за пределами магнитосферы Земли. Исследованию различных аспектов параметров космической радиации и ее воздействия на аппаратуру и живые системы посвящено очень большое количество публикаций. Отметим здесь только некоторые из них (National Research Council., 1970; Панасюк, Новиков, 2007; Шафиркин, Григорьев, 2009; Durante, Cucinotta, 2011). Одним из направлений стало экспериментальное изучение радиационной обстановки применительно к задаче подготовки пилотируемого полета к Марсу. Соответствующих экспериментальных данных значительно меньше, чем для околоземного пространства. Наиболее значимыми являются результаты, полученные с использованием прибора RAD на космическом аппарате MSL (Hassler и др., 2014; Zeitlin и др., 2013; Guo и др., 2015). С помощью этого прибора были получены характеристики радиационной обстановки во время перелета Земля – Марс, а также на поверхности Марса во время работы в составе марсохода Curiosity (Guo и др.,

2017; 2021). Нейтронная компонента радиации во время перелета к Марсу, на орбите и на поверхности Марса была исследована и с помощью наблюдений приборов HEND/Mars Odyssey, DAN/MSL (Litvak и др., 2020; 2021; Митрофанов и др., 2023). Эксперимент с прибором Liulin-MO в составе космической миссии ExoMars ESA, часть результатов которого представлена в данной статье, пополняет весьма немногочисленные экспериментальные данные о параметрах потока частиц и мощности поглощенной дозы космического излучения в пространстве вблизи Марса. Целью исследований, проводимых с использованием прибора Liulin-MO, являются:

– измерение потока частиц, мощности поглощенной и эквивалентной дозы от галактических и солнечных космических лучей, а также вторичной радиации для пилотируемых полетов в межпланетном пространстве и на орбите вокруг Марса;
– получение данных для верификации и анализа моделей радиационной обстановки и оценок радиационного риска для экипажей будущих космических экспедиций;
– миссия TGO ExoMars представила уникальную возможность провести измерения характеристик космической радиации на фазе спада 24-го и фазе роста 25-го циклов солнечной активности.

Описания миссии ExoMars, прибора FREND, в состав которого входит дозиметр Liulin-MO, а также самого прибора Liulin-MO и полученных с его помощью результатов были представлены в публикациях (Mitrofanov и др., 2018; Semkova и др., 2018; 2021). В данной публикации мы представляем недавно полученные результаты, включая измерения во время солнечных протонных событий (СПС) в 2021–2023 г.. Для удобства восприятия и обеспечения связанности изложения приводим здесь краткую информацию о миссии ExoMars, приборе FREND, устройстве и принципе работы прибора Liulin-MO.

ОПИСАНИЕ ПРИБОРА LIULIN-MO

Космический аппарат TGO Российско-Европейского проекта ExoMars (Trace Gas Orbiter) был запущен 14 марта 2016 г. Основной задачей проекта является регистрация малых составляющих марсианской атмосферы, в том числе метана. Одной из задач проекта является картирование распространенности воды в верхнем слое грунта, для чего в состав научной аппаратуры TGO был включен прибор FREND (Fine Resolution Epithermal Neutron Detector). Дозиметр Liulin-MO является составной частью прибора FREND. Чувствительными элементами дозиметра являются полупроводниковые детекторы. В приборе установлены четыре кремниевых детектора площадью 2 см^2, толщиной 300 мкм. Детекторы размещены таким образом, что образуют две пары расположенных один напротив другого детекторов, как это показано на рис. 1.

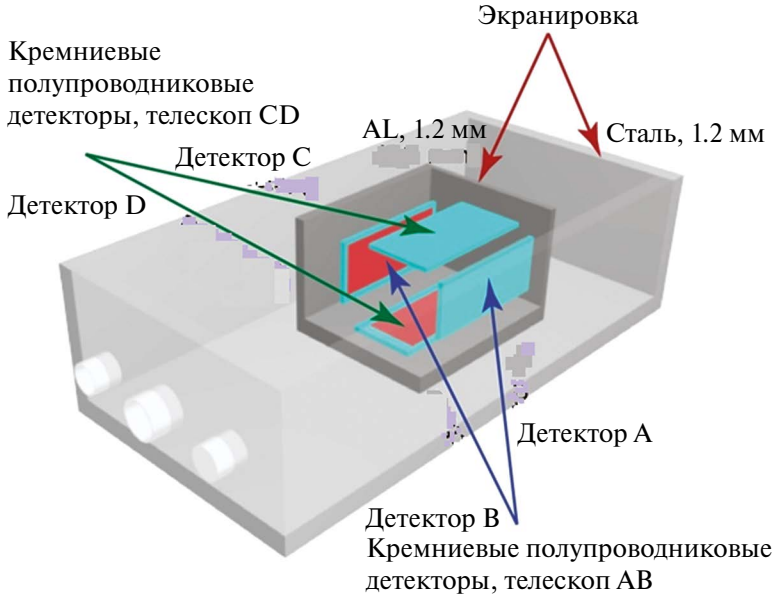

Рис. 1. Схематическое изображение расположения детекторов в приборе Liulin-MO (Semkova и др., 2021).

Каждая пара расположенных один напротив другого детекторов образует телескоп, позволяющий при включении сигналов детекторов на совпадение выделить из всего потока регистрируемых частиц только те, направление движения которых не сильно отклоняется от направления нормали к детекторам. В каждом телескопе один детектор обеспечивает регистрацию энерговыделений частиц со сравнительно малыми ионизационными потерями, а второй – большими. Сигналы с детекторов поступают на предусилители, логические схемы обработки, амплитудно-цифровые преобразователи и микроконтроллер. Информация с микроконтроллера передается в прибор FREND и далее через системы КА на Землю. Подробное описание прибора Liulin-MO и логики его работы представлены в публикации (Semkova и др., 2018). Выходной информацией прибора являются число частиц и суммарное энерговыделение в каждом из детекторов, регистрируемое каждую минуту, а также спектры энерговыделений в детекторах, регистрируемые каждый час. Кроме того, регистрируются также значения числа частиц и энерговыделений в детекторах для частиц, давших совпадения в парах детекторов, образующих телескоп.

Экранировка детекторов с различных направлений крайне неоднородна. А она имеет весьма существенное значение для условий регистрации излучения.

Прибор Liulin-MO смонтирован непосредственно под коллиматором прибора FREND, как это показано на рис. 2. Его защищенность со стороны днища довольно значительна, а с противоположной стороны определяется только элементами конструкции самого Liulin-MO.

Защищенность детекторов была рассчитана на основе документации на приборы Liulin-MO, FREND, а также данных о конструкции ExoMars. Распределение покрывает диапазон от 0.9 до 178 г/см^2. На основе полученного распределения была рассчитана функция экранированности детекторов, которая представляет собой плотность вероятности P встретить толщину защиты, равную аргументу функции при движении в случайно выбранном направлении. Этому распределению толщины экранировки соответствует зависимость эффективной площади регистрации протонов от их энергии. Функции экранированности детекторов и соответствующие им зависимости эффективной площади регистрации протонов от их энергии представлены на рис. 3. Минимальное значение энергии

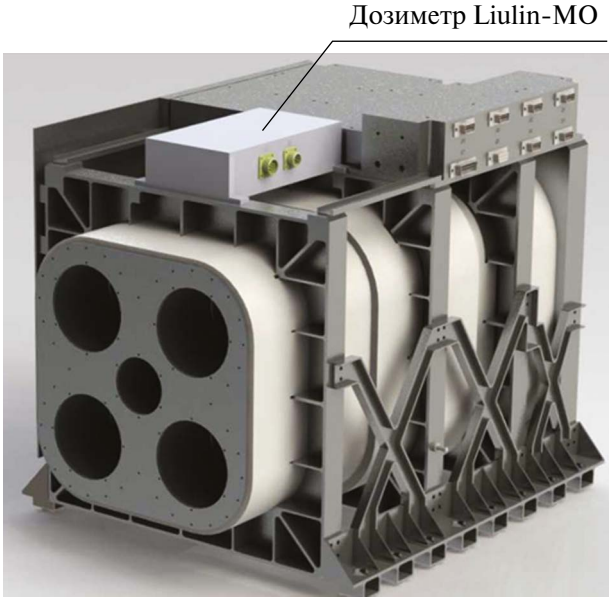

Рис. 2. Расположение дозиметра Liulin-MO на приборе FREND.

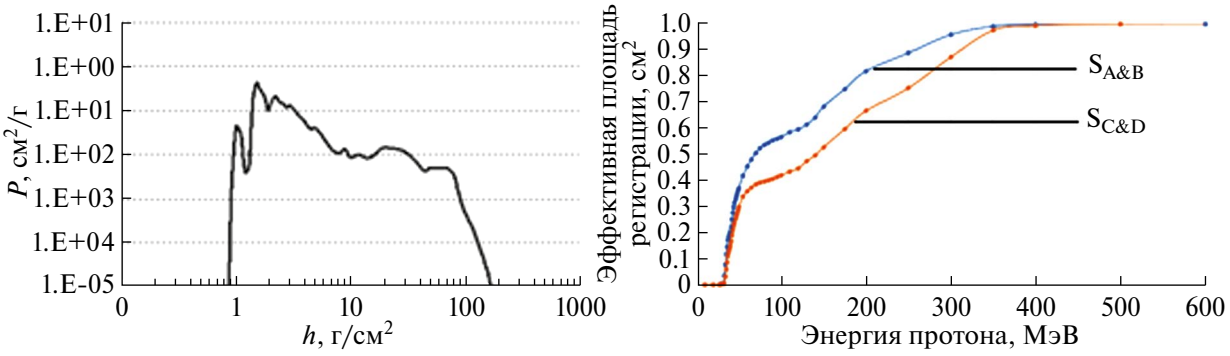

Рис. 3. Функции экранированности детекторов (левая панель) и соответствующие им зависимости эффективной площади регистрации протонов от их энергии (правая панель).

протона, который может быть зарегистрирован, равно 27 МэВ. Однако, как видно из графика, заметная эффективность регистрации появляется, начиная с энергии протона 45–50 МэВ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Данные, полученные с Liulin-MO

Измерения, выполненные на этапе перелета Земля – Марс. В период с 22.04.2016 г. по 15.09.2016 г. прибор Liulin-MO включался периодически.

Данные, полученные на высокоэллиптической орбите MCO1. Параметры орбиты: высота 98 000 ± 230 км, наклонение 0°, период обращения 4.2 sol (марсианских дней). TGO прибыл на эту орбиту 19.10.2016 г. Прибор FREND (и Liulin-MO) был включен в период 31.10.2016 г. – 17.01.2017 г.

Данные, полученные на высокоэллиптической орбите MCO2. Параметры орбиты: высота 37 150 ± 200 км, наклонение 74°, период обращения 24 ч. 39 мин. Прибор FREND (и Liulin-MO) был включен в период с 24.02.2017 г. по 07.03.2017 г.

Измерения, выполненные на "научной" орбите вокруг Марса. Параметры орбиты: почти круговая орбита высотой около 400 км, наклонение 74°, период обращения около 2 ч. На этой орбите прибор Liulin-MO работал почти непрерывно с 16.04.2018 г.

На рис. 4 периоды проведения измерений прибором Liulin-MO сопоставлены с уровнем солнечной активности (СА). Данные о числе солнечных пятен, представленные на рисунке, взяты с сайта http://sidc.be/silso Королевской обсерватории Бельгии. Результаты, полученные на первых трех этапах полета TGO, были рассмотрены в работе (Semkova и др., 2018). В данной публикации мы рассмотрим результаты, полученные на "научной" орбите. На рис. 5 показаны графики среднесуточных значений потоков и мощности дозы, измеренные прибором Liulin-MO в период с мая 2018 г. по сентябрь 2023 г.

На верхнем графике представлены данные потоков частиц, а на нижнем – значения мощности дозы радиации. Данные представлены для каждой пары детекторов AB и CD.

Можно видеть максимум потока, приходящийся на минимум СА, а также последующий спад показаний, обусловленный эффектом солнечной модуляции ГКЛ. Возрастание мощности дозы с мая 2018 г. по февраль 2020 г. соответствует возрастанию интенсивности ГКЛ в течение спада

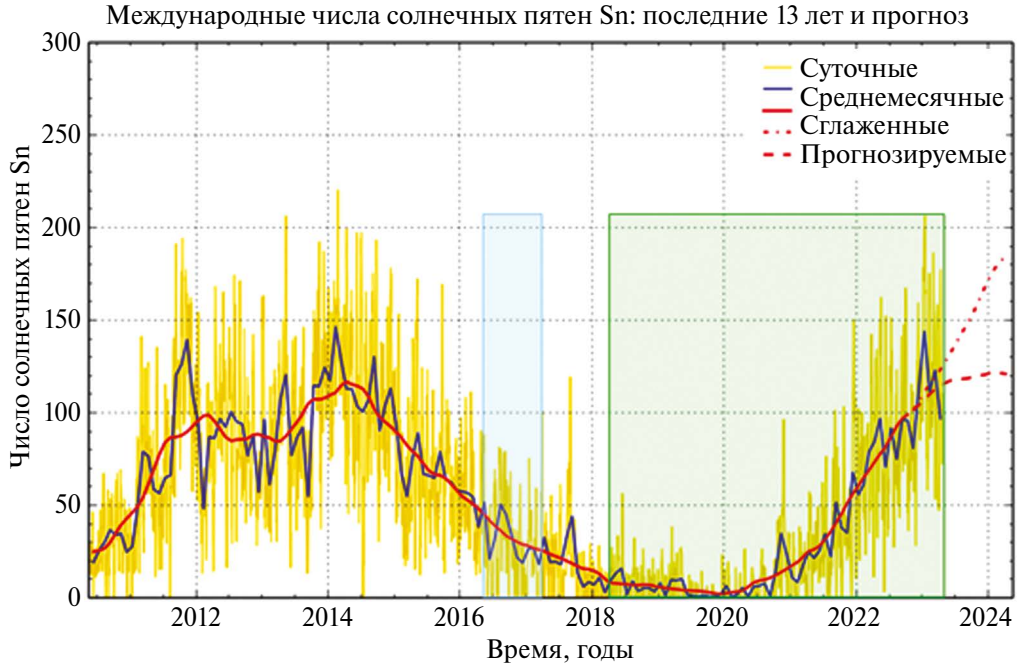

Рис. 4. Солнечная активность в периоды времени проведения измерений прибором Liulin-MO. Затененные области показывают периоды измерений Liulin-MO: на трассе перелета, MCO1 и MCO2 – левый прямоугольник, и на научной, круговой орбите Марса – правый прямоугольник.

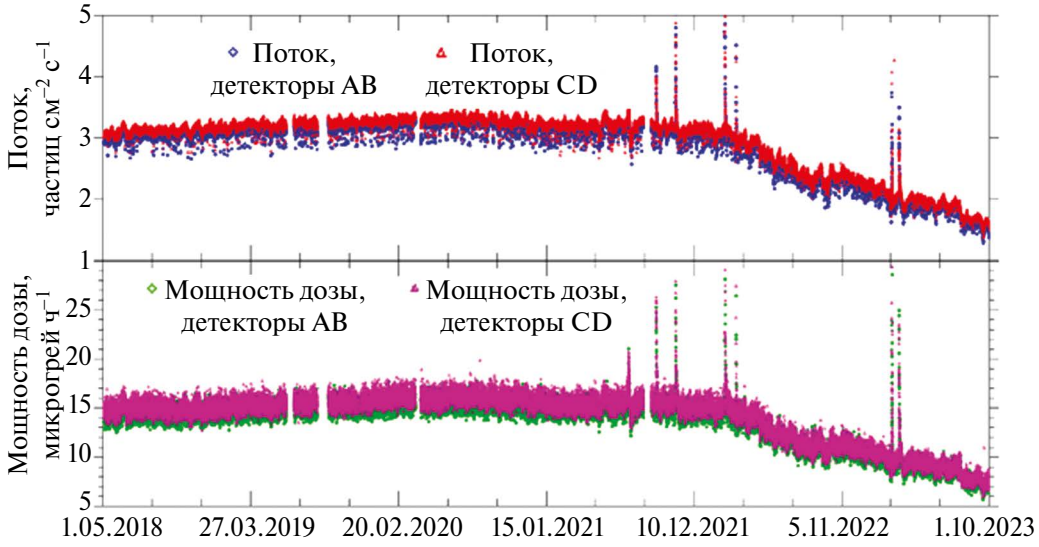

Рис. 5. Графики среднесуточных значений потоков частиц и мощности дозы радиации, измеренные прибором Liulin-MO.

24-го цикла солнечной активности. В марте – августе 2020 г. радиационные параметры находились на максимуме, что обусловлено минимумом 24-го цикла и переходом к 25-му циклу солнечной активности. Максимальное значение потока составило 3.3 частицы см$^{-1}$ с$^{-1}$, мощности поглощенной дозы (в кремнии) 382 микрогрей сутки$^{-1}$, мощности эквивалентной дозы 1700 микрозиверт сутки$^{-1}$. С сентября 2020 г. наблюдалось уменьшение потока и мощности дозы ГКЛ. В период с сентября 2020 г. по сентябрь 2023 г. поток, мощность поглощенной и эквивалентной дозы ГКЛ уменьшились на 47% по отношению к величинам, измеренным в период минимума 24-го цикла солнечной активности.

С 2021 г. наблюдаются возрастания потоков и мощности дозы радиации, вызванные приходом в окрестности Марса протонов от крупных солнечных вспышек. Было зарегистрировано восемь таких возрастаний, обусловленных СПС, данные о которых представлены в табл. 1.

Солнечное протонное событие, наблюдавшееся 15–19 февраля 2022 г. было наиболее интенсивным из зарегистрированных прибором Liulin-MO на орбите Марса. Поглощенная доза за событие примерно соответствует дозе за 38 суток полета в невозмущенных радиационных условиях, а эквивалентная доза – дозе за 13 суток полета в невозмущенных условиях. Доза от СПС 28–31 октября 2021 г. примерно в 2 раза меньше. Остальные СПС дали существенно меньшие дозы. Рассмотрим события 28 октября 2021 г. и 15 февраля 2022 г. более подробно.

Событие 28 октября 2021 г. сопоставлено с солнечной вспышкой класса X1.0, произошедшей в 15:17 UT в активной области 12891 с координатами S26W05. Данные взяты из каталога СПС, размещенного на сайте космической погоды НИИЯФ МГУ https://swx.sinp.msu.ru/apps/sep_events_cat. На рис. 6 показано взаимное расположение Солнца, Земли, Марса, а также соответствующих силовых линий межпланетного магнитного поля, рассчитанных в приближении постоянной скорости солнечного ветра 400 км/с. Рисунок получен с использованием сайта https://solar-machgithub.io, обеспечивающего расчет в соответствии с методикой, описанной в (Gieseler и др,. 2022).

Можно видеть, что Марс и Земля расположены практически с противоположных сторон от Солнца. Однако потоки протонов, порожденных этим событием, наблюдались в обеих этих точках Солнечной системы почти одновременно. На рис. 7 сопоставлены зависимости от времени потока протонов с энергией больше 50 МэВ, зарегистрированных у Земли на КА GOES-16, и потока частиц, измеренных парой детекторов A и B прибора Liulin-MO около Марса. Данные GOES-16 также взяты с сайта космической погоды НИИЯФ МГУ (раздел “ИНСТРУМЕНТЫ”) https://swx.sinp.msu.ru/tools/ida.php?gcm=1.

Можно видеть, что возрастание потоков около Земля начинается немного раньше и имеет

Таблица 1. СПС, зарегистрированные прибором Liulin-MO на орбите Марса

Время начала события, UT	Длительность, ч	Суммарная доза за СПС (в кремнии), миллигрей	Максимальная мощность дозы, микрогрей $ч^{-1}$	Максимальный поток, $см^{-2}\,с^{-1}$
17 июля 2021 г., 09:06	23	0.096	20	4.25 ± 0.2
17 сентября 2021 г., 07:12	37	0.185	26	4.5 ± 0.2
28 октября 2021 г., 16:55	79	6.500	402	48.5 ± 2.43
15 февраля 2022 г., 23:00	76	13.800	1009	109.7 ± 5.5
14 марта 2022 г., 17:55	17	0.095	31	5.13 ± 0.26
24 февраля 2023 г., 21:07	24	0.185	59	5.1 ± 0.25
25 февраля 2023 г., 21:20	21	0.098	47	3.9 ± 0.2
13 марта 2023 г., 05:24	39	0.165	38	4.4 ± 0.22

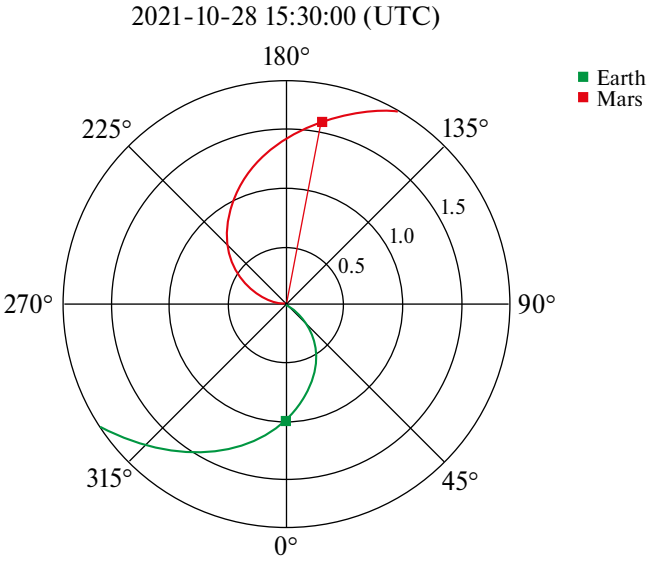

Рис. 6. Взаимное расположение Солнца, Земли, Марса и модельных силовых линий межпланетного магнитного поля, связывающих Землю и Марс с Солнцем 28 октября 2021 г.

более крутой фронт нарастания. На фазе спада интенсивности наблюдается появление второго и третьего локальных максимумов почти одновременно у Земли и у Марса.

Во время СПС 28 октября 2021 г. были зарегистрированы дозы космической радиации сразу на нескольких космических аппаратах: на полярной орбите у Земли прибором RAMIS, на лунной поверхности с прибором LND и на лунной орбите с прибором CRaTER, на поверхности Марса с прибором RAD и на орбите вокруг Марса с прибором Liulin-MO (Guo и др., 2023). На рис. 8 представлены взятые из этой работы данные о мощности дозы, измеренные с указанными приборами, а также динамика накопления дозы в ходе СПС. В табл. 2 представлены значения доз в воде, накопленных за все событие.

Следующее, наиболее крупное из зарегистрированных прибором Liulin-MO событий, произошло 15 февраля 2022 г. Это событие связывают с мощным коронарным выбросом массы (CME), который наблюдался

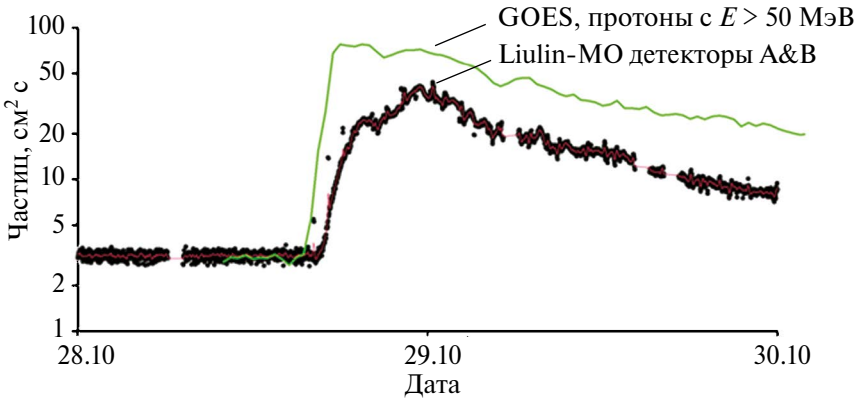

Рис. 7. Зависимость от времени потока протонов у Земли и потока частиц, измеренных около Марса. Кривая – поток протонов с энергией больше 50 МэВ, зарегистрированных у Земли на КА GOES-16. Точки – поток частиц, измеренных парой детекторов A и B прибора Liulin-MO около Марса.

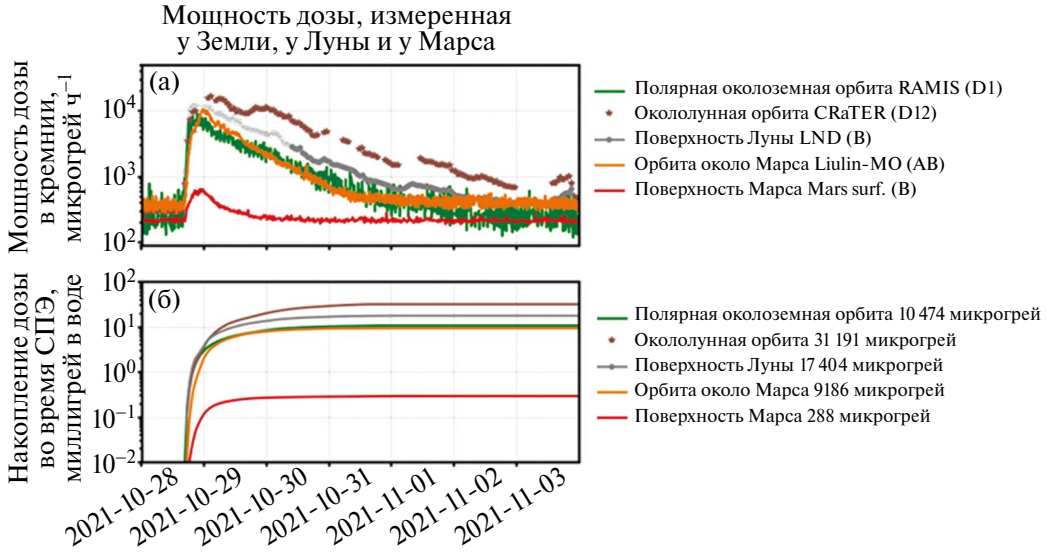

Рис. 8. Мощности дозы в кремнии (верхняя панель) и накопленные дозы в воде от солнечных энергичных частиц (нижняя панель), измеренные в различных точках Солнечной системы во время СПС 28 октября 2021 г. Данные взяты из работы (Guo и др., 2023). Обозначения снизу вверх соответствуют: прибору RAD, работающему на поверхности Марса, прибору Liulin-MO на орбите вокруг Марса, прибору RAMIS, работающему на полярной орбите у Земли, прибору LND, работающему на лунной поверхности, прибору CRaTER на лунной орбите.

Таблица 2. Значения доз, зарегистрированных во время СПС 28 октября 2021 г.

Прибор	Место проведения измерений	Доза (в воде) за СПС, микрогрей
RAMIS	на полярной орбите у Земли	10474
LND	на лунной поверхности	17404
CRaTER	на окололунной орбите	31191
RAD	на поверхности Марса	288
Liulin-MO	на орбите вокруг Марса	9186

на нескольких коронографах, находившихся на КА SOHO, STEREO-A и Solar Orbiter (https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Solar_Orbiter/Giant_solar_eruption_seen_by_Solar_Orbiter). Чтобы связать наблюдаемые СПС на орбите Марса с солнечными явлениями, мы используем информацию, представленную в списках CME в онлайн-каталогах: Solar Eruptive Event Detection System (SEEDS, http://spaceweather.gmu.edu/seeds/) и Каталог CDAW (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/) (Gopalswamy и др., 2009). SEEDS использует изображения с коронографа LASCO КА SOHO (Brueckner и др., 1995), с телескопа C2 и внешнего коронографа COR2 (Howard и др., 2002) на борту КА STEREO. В каталоге CDAW используются изображения, полученные с телескопов LASCO, C2 и C3 на КА SOHO.

Эти данные показывают, что CME произошло за восточным лимбом и распространялось в северо-восточном направлении на обратной стороне Солнца со скоростью около 1900 км $с^{-1}$. Можно предполагать, что ускорение протонов до высоких энергий произошло на фронте ударной волны этого CME. Взаимное расположение Солнца, Земли, Марса и силовых линий межпланетного магнитного поля, связывающих Землю и Марс с Солнцем 15 февраля 2022 г. показано на рис. 9.

Можно видеть, что в этом событии поток частиц у Марса, существенно превышал поток частиц у Земли (рис. 10). Это обусловлено более удобным расположением Марса относительно предполагаемой области ускорения высокоэнергичных протонов. Оба рассмотренных СПС произошли в условиях, когда Земля и Марс находились в почти противоположных направлениях относительно Солнца.

24 и 25 февраля 2023 г. произошли СПС, во время которых Земля и Марс находились с одной стороны от Солнца на близких силовых линиях межпланетного магнитного поля, как это показано на рис. 11.

Обе вспышки на Солнце произошли в активной области 13229. Первая вспышка класса M3.7 произошла 24 февраля в 20:03 в области с координатами N29W24. Вторая вспышка класса M6.4 произошла 25 февраля в 18:40 в области

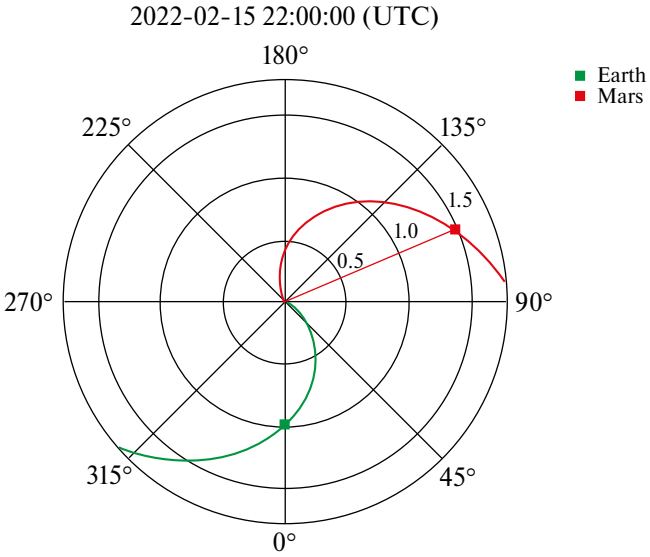

Рис. 9. Взаимное расположение Солнца, Земли, Марса и модельных силовых линий межпланетного магнитного поля, связывающих Землю и Марс с Солнцем 15 февраля 2022 г.

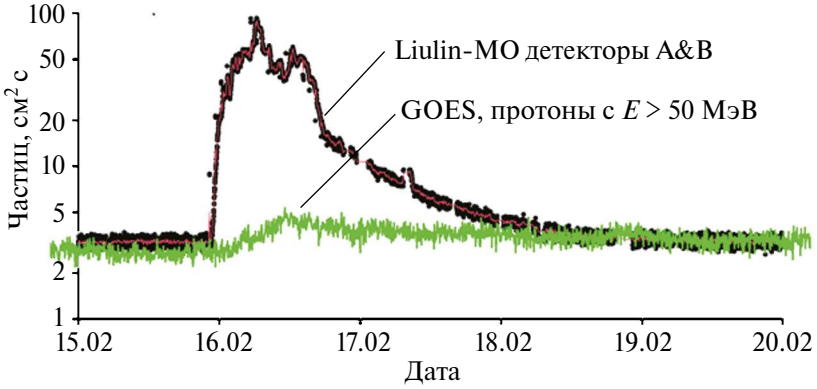

Рис. 10. Сопоставление потоков частиц, зарегистрированных на КА GOES и ExoMars во время СПС 15 февраля 2022 г. Кривая – поток протонов с энергией больше 50 МэВ, зарегистрированных у Земли на КА GOES-16. Точки – поток частиц, измеренных парой детекторов A и B прибора Liulin-MO около Марса.

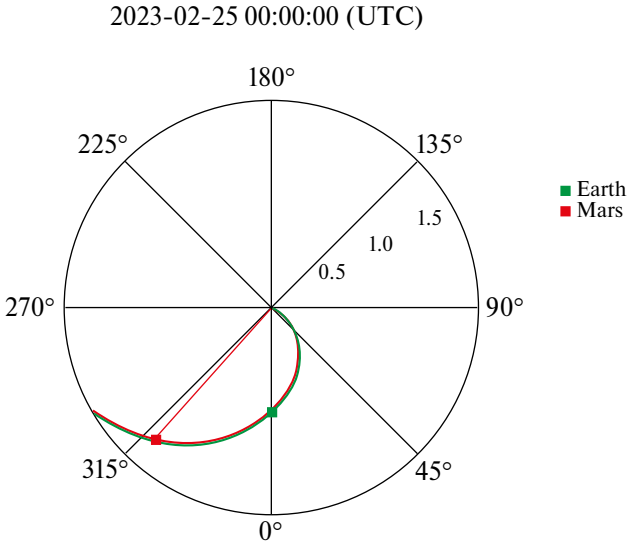

Рис. 11. Взаимное расположение Солнца, Земли, Марса и модельных силовых линий межпланетного магнитного поля, связывающих Землю и Марс с Солнцем 24 и 25 февраля 2023 г.

с координатами N24W45. Несмотря на то, что обе вспышки были сравнительно слабыми, их появление вблизи основания коротирующей силовой линии межпланетного магнитного поля способствовало появлению высокоэнергичных протонов в окрестностях Земли и Марса. На рис. 12 представлены временные профили потоков протонов с энергией больше 50 МэВ и больше 100 МэВ, зарегистрированные у Земли на КА GOES-16, а также поток частиц, измеренных парой детекторов A и B прибора Liulin-MO около Марса.

Можно видеть, что энергетический спектр второго СПС гораздо более мягкий, чем у первого. Начало возрастания потока для первого события у Земли и Марса происходит практически одновременно, а для второго события наблюдается задержка максимума потока у Марса, по сравнению с моментом наступления максимума у Земли. Представленные результаты важны для последующего анализа процессов распространения солнечных космических лучей в межпланетном пространстве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены уникальные данные о радиационной обстановке на орбите Марса на фазе спада 24-го цикла солнечной активности и фазе роста 25-го цикла. Показано, что в сентябре 2023 г. поток, мощность поглощенной и эквивалентной дозы ГКЛ составляют 47% по отношению к величинам, измеренным в период минимума 24-го цикла солнечной активности.

Также получены уникальные данные о радиационной обстановке во время СПС на орбите Марса в июле 2021 г. – марте 2022 г., когда Марс

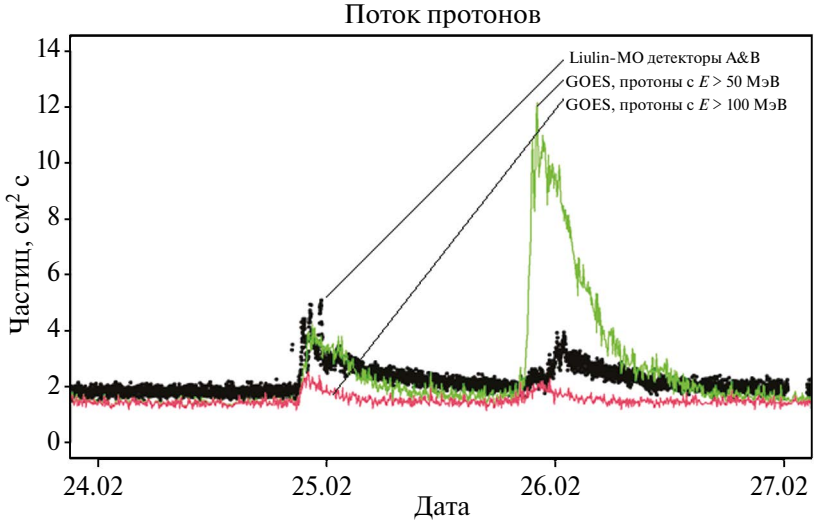

Рис. 12. Сопоставление потоков частиц, зарегистрированных на КА GOES-16 и ExoMars во время СПС 24–25 февраля 2023 г. Кривые – потоки протонов с энергией больше 50 МэВ и больше 100 МэВ соответственно, зарегистрированных у Земли на КА GOES-16. Точки – поток частиц, измеренных парой детекторов A и B прибора Liulin-MO около Марса.

находился на противоположной по отношению к Земле стороне от Солнца. Проведено сравнение потоков частиц, измеренных на орбитах около Земли и Марса.

В период с июля 2021 г. по март 2023 г. с прибором Liulin-MO на TGO зарегистрировано восемь возрастаний, обусловленных солнечными протонными событиями. Шесть из них были незначительными.

Два СПС: 28 октября 2021 г. и 15 февраля 2022 г. дали заметный вклад в дозу 6.5 миллигрей и 13.8 миллигрей в кремнии, соответственно.

Использованные в данной работе данные прибора Liulin-MO находятся в свободном доступе на сайте http://esa-pro.space.bas.bg/LIULIN_MO_MARS_2/

Полученные результаты имеют важное значение для экспериментальной проверки и совершенствования методов расчета и прогнозирования радиационной обстановки при планировании пилотируемых экспедиций за пределы магнитосферы Земли.

Работа российских соавторов выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований РАН № FMFR-2024-0036. В ИКИ РАН работы велись в рамках проекта № 23-12-0032 Российского научного фонда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мирошниченко Л.И., Петров В.М.* Динамика радиационных условий в космосе. М.: Энергоатомиздат, 1985. 148 с.
2. *Митрофанов И.Г., Литвак М.Л., Санин А.Б., Семкова Й.В., Дачев Ц.П.* Оценка нейтронной компоненты радиационного фона в кратере Гейл на Марсе // Астрон. вестн. 2023. Т. 57. № 3. С. 199–208. https://doi.org/10.31857/S0320930X2303007. (*Mitrofanov I. G., Litvak M. L., Sanin A. B., Semkova I. V., Dachev Ts. P.* Estimation of the Neutron Component of the Radiation Background in the Gale Crater on Mars // Sol. Syst. Res. 2023. V. 57. № 3. P. 191–199.)
3. *Панасюк М.И., Новиков Л.С.* (Ред.) Модель космоса: Научно-информационное издание. Т. 1. Гл. 3. Физические условия в космическом пространстве. М., 2007. С. 417–667.
4. *Шафиркин А.В., Григорьев Ю.Г.* Межпланетные и орбитальные полеты. Радиационный риск для космонавтов. Радиобиологическое обоснование. М.: Экономика, 2009. 639 с.
5. *Brueckner G.E., Howard R.A., Koomen M.J., Korendyke C.M., Michels D.J., Moses J.D., Socker D.G., Dere K.P., Lamy P.L., Llebaria A., and 5 co-authors,* The Large Angle Spectroscopic Coronagraph (LASCO) // Sol. Phys. 1995. V. 162. P. 357–402. https://doi.org/10.1007/BF00733434
6. *Durante M., Cucinotta F.A.* Physical basis of radiation protection in space travel // Rev. Modern Phys. 2011. V. 83. № 4. P. 1245–1281.
7. *Frank G.M., Saksonov P.P., Antipov V.V., Dobrov N.N.* Radiobiological problems of space flights // Proc. 1st Int. Symp. on "Basic environmental problems of man in space", Paris, 1962 / Ed. Bjurstedt H. Wien – New York: Springer Sci., 1965. P. 254–266.
8. *Gieseler J., Dresing N., Palmroos C., von Forstner J.L.F., Price D.J., Vainio R., Kouloumvakos A., Rodríguez-García L., Trotta D., Génot V., Masson A., Roth M., Veronig A.,* Solar-MACH: An open-source tool to analyze solar magnetic connection configurations // Front. Astron. Space Sci. 2022. V. 9. https://doi.org/10.3389/fspas.2022.1058810
9. *Gopalswamy N., Yashiro S., Michalek G., Stenborg G., Vourlidas A., Freelan, S., Howard R.,* The SOHO/LASCO CME Catalog // Earth, Moon, and Planets. 2009. V. 104. P. 295–313. https://doi.org/10.1007/s11038-008-9282-7
10. *Grigoriev Yu., Guskova A.K., Domshlak M., Wysocki V.G., Raevskaya S.A., Markelov B.A., Darenskay N.* The problem for establish of a limits doses to cosmonauts // Proc. XVI-th Int. Astronautical Congress. Athens, Sept. 13–18, 1965. V. 4. P. 145–161.
11. *Guo J., Zeitlin C., Wimmer-Schweingruber R.F., Rafkin S., Hassler D.M., Posner A., Heber, B., Köhler, J., Ehresmann B., Appel J. K., and 8 co-authors,* Modeling the variations of dose rate measured by RAD during the first MSL Martian year: 2012–2014 // Astrophys. J. 2015. V. 810. № 1. id. 24.
12. *Guo J., Zeitlin C., Wimmer-Schweingruber R., Hassler D.M., Köhler J., Ehresmann B., Böttcher S., Böhm E., Brinza D.E.* Measurements of the neutral particle spectra on Mars by MSL/RAD from 2015-11-15 to 2016-01-15 // Life Sci. Space Res. 2017. V. 14. P. 12–17.
13. *Guo J., Zeitlin C., Wimmer-Schweingruber R.F., Hassler D.M., Ehresmann B., Rafkin S., von Forstner, F. J. L.; Khaksarighiri S.; Liu W.; Wang Y.,* Radiation environment for future human exploration on the surface of Mars: The current understanding based on MSL/RAD dose measurements // Astron. and Astrophys. Rev. 2021. V. 29. № 1. P. 1–81. https://doi.org/10.1007/s00159-021-00136-5.
14. *Guo J., Li X., Zhang J., Dobynde M. I., Wang Y., Xu Z., Berger T., Semkova Y., Wimmer-Schweingruber R. F., Hassler D., Zeitlin C. Ehresmann B., Matthiä D., Zhuang B.,* The first ground level enhancement seen on three planetary surfaces: Earth, Moon, and Mars // Geophys.

Res. Lett. 2023. V. 50. № 15. id. 2023GL103069. https://doi.org/10.1029/2023GL103069

15. *Hassler D. M., Zeitlin C., Wimmer-Schweingruber R.F., Ehresmann B., Rafkin S., Eigenbrode J. L., Brinza D. E., Weigle G., Böttcher S., Böhm E., and 14 co-authors,* Mars' surface radiation environment measured with the Mars Science Laboratory's Curiosity rover // Science. 2014. V. 343. № 6169. id. 1244797. https://doi.org/10.1126/Science.1244797
16. *Howard R. A., Moses J. D., Socker D. J., Dere K. P., Cook J. W., SECCHI Consortium.* Sun Earth Connection Coronal and Heliospheric Investigation (SECCHI) // Adv. Space Res. 2002. V. 29. № 12. P. 2017–2026. https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)00147-3
17. *Litvak M.L., Sanin A.B., Mitrofanov I.G., Bakhtin B., Jun I., Martinez-Sierra L. M.., Nosov A., Perkhov A. S.,* Mars neutron radiation environment from HEND/Odyssey and DAN/MSL observations // Planet. and Space Sci. 2020. V. 184. id. 104866. https://doi.org/10.1016/j.pss.2020.104866
18. *Litvak M.L., Mitrofanov I.G., Sanin A.B., Bakhtin B., Golovin D. V., . Zeitlin C.* Observations of neutron radiation environment during Odyssey cruise to Mars // Life Sci. Space Res. 2021. V. 29. P. 53–62. https://doi.org/10.1016/j.lssr.2021.03.003
19. *Mitrofanov I., Maklahov A., Bakhtin B., Golovin D., Kozyrev A., Litvak M., Mokrousov M., Sanin A., Tretyakov V., Vostrukhin A., and 12 co-authors* Fine Resolution Epithermal Neutron Detector (FREND) onboard the Trace Gas Orbiter // Space Sci. Rev. 2018. V. 214. id. 86. https://doi.org/10.1007/s11214-018-0522-5
20. National Research Council. 1967. Radiobiological Factors in Manned Space Flight. Washington, DC: The National Academies Press. https://doi.org/10.17226/12407
21. National Research Council. 1970. Radiation Protection Guides and Constraints for Space-Mission and Vehicle-Design Studies Involving Nuclear Systems. Washington, DC: The National Academies Press. https://doi.org/10.17226/12393
22. *Semkova J., Koleva R., Benghin V., Dachev T., Matviichuk Yu., Tomov B., Krastev K., Maltchev St., Dimitrov P., Mitrofanov I. and 14 co-authors,* Charged particles radiation measurements with Liulin-MO dosimeter of FREND instrument aboard ExoMars Trace Gas Orbiter during the transit and in high elliptic Mars orbit // Icarus. 2018. V. 303. P. 53–66. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2017.12.034
23. *Semkova J., Semkova J., Koleva R., Benghin V., Dachev T., Matviichuk Yu., Tomov B., Krastev K., Maltchev S., Dimitrov P., Bankov N., and 12 co-authors.* Results from radiation environment measurements aboard ExoMars Trace Gas Orbiter in Mars science orbit in May 2018 – December 2019 // Icarus. 2021. V. 361. id. 114264. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2020.114264
24. *Zeitlin C., Hassler D.M., Cucinotta F.A., Ehresmann B., Wimmer-Schweingruber R.F., Brinza D.E., Kang S., Weigle G., Böttcher S., Böhm E., and 7 co-authors.* Measurements of energetic particle radiation in transit to Mars on the Mars Science Laboratory // Science. 2013. V. 340. P. 1080–1084. https://doi.org/10.1126/science.1235989