

УДК 520.6

## ОЦЕНКА НЕЙТРОННОЙ КОМПОНЕНТЫ РАДИАЦИОННОГО ФОНА В КРАТЕРЕ ГЕЙЛ НА МАРСЕ

© 2023 г. И. Г. Митрофанов<sup>а</sup>, М. Л. Литвак<sup>а, \*</sup>, А. Б. Санин<sup>а</sup>, Й. В. Семкова<sup>б</sup>, Ц. П. Дачев<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

<sup>б</sup>Институт космических исследований и технологий Болгарской академии наук, София, Болгария

\*E-mail: litvak@mx.iki.rssi.ru

Поступила в редакцию 28.09.2022 г.

После доработки 05.12.2022 г.

Принята к публикации 18.12.2022 г.

В статье представлены результаты анализа нейтронной компоненты радиационного фона на Марсе в кратере Гейл, где проводит свои исследования марсоход NASA Curiosity. Численные оценки показали, что при максимуме потока галактических космических лучей мощность эффективной дозы по нейтронам меняется вдоль трассы движения марсохода на 20% в диапазоне 92–108 мкЗв/день. Основным фактором такого изменения является переменное содержание подповерхностной воды, которое варьируется от 0.5 до 5% по массовой доле вдоль трассы марсохода. Полученные оценки сопоставимы с измерениями радиационного дозиметра RAD. Сравнение с дозами от заряженных частиц показывает, что вклад нейтронной компоненты на поверхности Марса в суммарную дозу без использования средств радиационной защиты составляет 10%, что необходимо учитывать при планировании пилотируемых миссий к Марсу.

**Ключевые слова:** Марс, кратер Гейл, Curiosity, DAN, нейтроны, радиационный фон

**DOI:** 10.31857/S0320930X23030076, **EDN:** IHUFIW

### ВВЕДЕНИЕ

Марс является источником нейтронного излучения, которое возникает в приповерхностном слое планеты под воздействием галактических космических лучей (ГКЛ). Заряженные частицы ГКЛ высоких энергий взаимодействуют с ядрами вещества Марса и раскалывают их с образованием более легких ядер и свободных нейтронов с энергиями до нескольких десятков ГэВ (см. Drake и др., 1988; Masarik, Reedy, 1996). Толщина слоя взаимодействия составляет около 1–2 м. Длина свободного пробега нейтронов в этом слое гораздо меньше этой толщины, поэтому нейтроны испытывают многократные столкновения с ядрами породообразующих элементов до того, как они вылетят из-под поверхности или уйдут в более глубокие слои грунта с последующим распадом. При столкновениях с ядрами основных породообразующих элементов с массами  $M$ , которые значительно превышают массу  $m$  нейтрона или протона, потери энергии нейтрона составляют величину порядка  $m/M$ . В многократных столкновениях нейтроны замедляются до надтепловых или даже до тепловых энергий, поэтому энергетический спектр нейтронного излучения Марса покрывает широкий диапазон от начальных значе-

ний до тепловых энергий (см. Drake и др., 1988; Masarik, Reedy, 1996).

Основным фактором, который влияет на спектр нейтронного излучения Марса, является массовая доля водорода в веществе. Ядра этого элемента, протоны, имеют равную массу с нейтронами, поэтому при столкновениях с ними нейтроны могут потерять значительную долю своей энергии. Водород в веществе марсианской поверхности главным образом связан в молекулах воды, поэтому величина спектральной плотности потока нейтронного излучения поверхности Марса напрямую зависит от массовой доли воды в верхнем слое марсианского грунта. Следует отметить, что кроме эффективности термализации, поток нейтронов также зависит от коэффициента их поглощения в веществе. Вклад в поглощение вносят ядра водорода, хлора, железа и других элементов с большими сечениями поглощения, таких, как, например, гадолиний.

Зависимость марсианского нейтронного излучения от присутствия ядер водорода позволяет определять содержание воды в марсианском грунте на основе анализа данных измерений нейтронного потока приборами на орбите вокруг планеты (метод *пассивного орбитального зондирования*). При этом необходимо знать concentra-

цию элементов с большими сечениями поглощения нейтронов. Эти данные могут быть получены на основе сопутствующих орбитальных измерений гамма-излучения в характеристических спектральных линиях этих элементов (см., например, Boynton и др., 2007; Keller и др., 2006) или по данным измерений состава вещества приборами на поверхности, например прибором APXS (Gellert и др., 2015).

На основе измерений собственного нейтронного излучения Марса с орбиты может быть построена карта распространенности воды в поверхностном слое планеты. Такие измерения впервые были выполнены приборами HEND и MONS на борту марсианского спутника NASA Mars Odyssey (Boynton и др., 2002; Feldman и др., 2002; Mitrofanov и др., 2002; Митрофанов и др., 2003; 2004). Было обнаружено, что верхний слой поверхности Марса содержит довольно много воды, а ее распределение вдоль поверхности демонстрирует сильную региональную переменность. Так, минимальные значения массовой доли воды наблюдаются в “сухой” области Плато Солнца (около 3% массовой доли в среднем по области, Boynton и др., 2007). На умеренных широтах <math><60^\circ</math> с.ш./ю.ш. максимальная концентрация воды порядка 10% была обнаружена в области Арабии (Митрофанов и др., 2004; Boynton и др., 2007; Maugise и др., 2011). Оказалось, что на высоких широтах как на севере, так и на юге, поверхностный слой Марса является “вечной мерзлотой” с высоким содержанием воды порядка нескольких десятков процентов по массе (Boynton и др., 2002; Feldman и др., 2002; Mitrofanov и др., 2002) в форме водяного льда (Mellon и др., 2009).

Нейтронные измерения на поверхности также позволяют оценить массовую долю воды в точке расположения посадочного аппарата. Аналогично орбитальным измерениям, в этом случае также необходимо знать массовые доли элементов с большими сечениями нейтронного поглощения. Следует отметить, что в случае измерений на поверхности, дополнительно к измерениям собственного нейтронного излучения под воздействием ГКЛ (*метод пассивного нейтронного зондирования*), для оценки массовой доли воды целесообразно применить активный *метод нейтронного каротажа*. В этом случае в состав нейтронного детектора должен входить нейтронный генератор, который облучает поверхность импульсами нейтронов высоких энергий. Регистрация временного профиля после импульсного нейтронного излучения позволяет не только определить массовую долю воды в грунте, но также независимо оценить количество элементов с большими сечениями поглощения нейтронов. Кроме этого, анализ временного профиля после импульсного нейтронного излучения позволяет определить степень неоднородности концентрации воды по глубине.

Впервые космический прибор DAN для нейтронного каротажа вещества Марса был установлен на борту марсохода NASA Curiosity (Litvak и др., 2008; Mitrofanov и др., 2012). Для изучения переменности массовой доли воды вдоль трассы движения марсохода в эксперименте с прибором DAN применяются как активный, так и пассивный методы нейтронного зондирования. За 10 лет наблюдений были получены данные о массовой доле воды и элементов с большими сечениями поглощения нейтронов в более чем 700 локальных районах остановок марсохода (Mitrofanov и др., 2014; Litvak и др., 2014; Mitrofanov и др., 2022). С учетом полученных оценок для концентрации поглощающих элементов, методом пассивного нейтронного зондирования были получены оценки массовой доли воды вдоль всей пройденной трассы марсохода протяженностью около 20 км (Nikiforov и др., 2020).

Таким образом, в настоящее время в распоряжении исследователей имеются данные о распространенности воды в грунте Марса, полученные на основе анализа орбитальных измерений собственного нейтронного излучения планеты, а также данные о массовой доле воды в грунте на дне кратера Гейл, полученные методами активного и пассивного нейтронного зондирования непосредственно на поверхности. Поэтому появилась возможность оценки величины нейтронной компоненты собственного радиационного фона Марса на поверхности и на орбитах с различными высотами и наклонениями.

#### ДОЗИМЕТРИЯ РАДИАЦИОННОГО ФОНА НА МАРСЕ

Проведено несколько космических экспериментов по измерению радиационной дозы на орбите и на поверхности Марса. С 2012 г. в кратере Гейл работает марсоход Curiosity, на борту которого установлен дозиметр RAD, способный измерять потоки заряженных частиц, гамма-квантов и нейтронов (Hassler и др., 2012). Первые измерения этим прибором на поверхности Марса в 2012–2013 гг. показали, что нейтронная компонента фона равна 30–60 мкЗв/день и составляет около 5–10% от фона заряженных частиц галактических космических лучей (ГКЛ), около ~700 мкЗв/день (Köhler и др., 2014; Guo и др., 2017; Hassler и др., 2014).

В 2018 г. на круговой орбите вокруг Марса начал свою работу орбитальный аппарат TGO (Trace Gas Orbiter) проекта ExoMars. Его комплекс научной аппаратуры включает российский коллимированный нейтронный детектор FRIEND, в состав которого, в свою очередь, входит детектор заряженных частиц ГКЛ Liulin-MO (см. Mitrofanov и др., 2018; Semkova и др., 2018). С помощью прибора Liulin-MO удалось измерить мощность эк-

вивалентной дозы заряженных частиц на орбите. За период май 2018 г. – декабрь 2019 г. она составила в среднем  $1.60 \pm 0.33$  и  $1.65 \pm 0.34$  мЗв/день для двух перпендикулярных направлений, вдоль осей  $X$  и  $Z$  космического аппарата TGO (см. Semkova и др., 2021).

Кроме экспериментальных исследований проводились численные оценки радиационной обстановки на орбите и поверхности Марса. Последние исследования в этой области позволили оценить профили мощности полной дозы и ее компоненты (заряженные частицы, нейтроны, гамма-излучение) на разной высоте над поверхностью и на разной глубине под поверхностью (Zhang и др., 2022). В численных расчетах использовалась так называемая “сухая” модель марсианского грунта, состоящая из 50% O, 40% Si, 10% Fe (Zhang и др., 2022; Semkova и др., 2022). Оценки были сделаны для нескольких толщин марсианской атмосферы, которые примерно соответствуют вершине горы Олимп, кратеру Гейл и бассейну Эллады). Установлено, что полная доза имеет локальный максимум под поверхностью на глубине 30–40 см, связанный с большим вкладом нейтронной компоненты (более 50% полной дозы). Кроме этого, было проведено численное моделирование эксперимента Liulin-MO на борту аппарата TGO, которое показало хорошее согласие в пределах 20% между численными оценками и экспериментальными данными (Semkova и др., 2022).

В данной статье представлены оценки нейтронной компоненты радиационного фона на дне кратера Гейл вдоль трассы марсохода Curiosity и на орбите с высотой 400 км над этим кратером.

## МЕТОД ОЦЕНКИ НЕЙТРОННОГО ПОТОКА СОБСТВЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МАРСА НА ПОВЕРХНОСТИ И НА РАЗНЫХ ВЫСОТАХ

Как уже отмечалось, собственное нейтронное излучение Марса возникает в веществе планеты под воздействием заряженных частиц ГКЛ. Это приводит к рождению быстрых нейтронов, как в атмосфере, так и в верхнем слое поверхности. Спектральная плотность потока нейтронов на поверхности, в атмосфере и на орбите зависит от ядерных реакций взаимодействия нейтронов с ядрами. Это реакции упругого и неупругого рассеяния, поглощения и распада нейтронов. Вследствие реакций рассеяния нейтроны изменяют свою энергию и направление движения. Можно схематично представить поле марсианского нейтронного излучения как совокупность компонент частиц с различной собственной историей взаимодействия с приповерхностным слоем вещества и с веществом атмосферы до того момента, как частицы покинут окрестность планеты, выйдя за

пределы ее атмосферы, или уйдут в глубокие слои вещества без шансов вернуться из-за поглощения или распада.

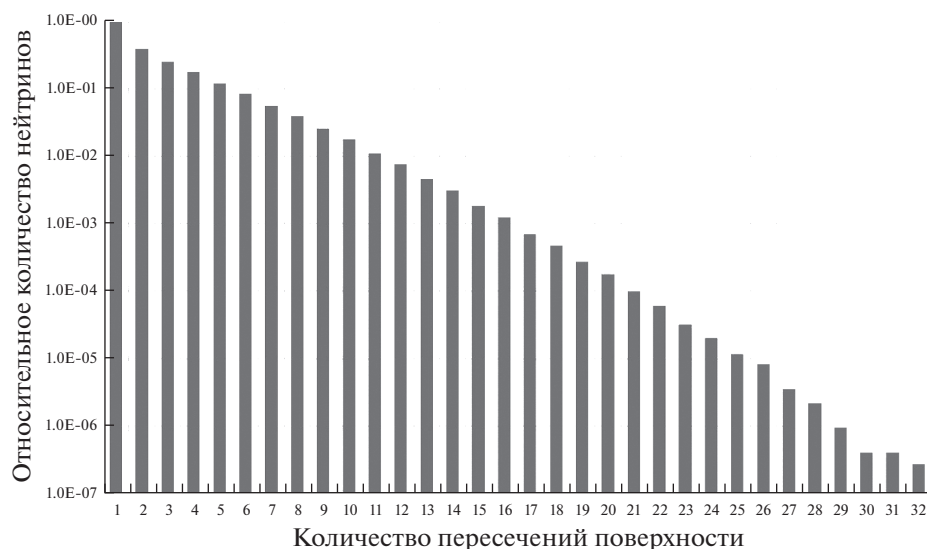
Каждая компонента нейтронного излучения может характеризоваться определенным числом пересечений поверхности планеты от момента рождения до “завершения истории” (см. рис. 1). Так, частицы компоненты № 1 после рождения под поверхностью вылетают в космическое пространство без взаимодействия с атмосферой, или поглощаются в атмосфере, или распадаются. В эту компоненту также входят нейтроны, которые родились в атмосфере, прошли через поверхность и ушли в глубокие слои планеты.

Нейтроны компоненты № 2 могли родиться в веществе под поверхностью, отразиться в атмосфере и повторно пересечь поверхность с уходом в глубокие слои. Или нейтроны этой компоненты могли родиться в атмосфере, отразиться в верхнем слое поверхности и выйти за пределы атмосферы или поглотиться в ней. Описание этого ряда компонент можно соответственно продолжить, определив номер компоненты  $N$  как число пересечений нейтронами поверхности планеты.

Очевидно, что полный поток нейтронов в каждой точке под поверхностью, над поверхностью и на орбите равен сумме вкладов всех компонент. Его величина определяется производством нейтронов под поверхностью, в атмосфере, а также “отражательной” способностью слоев вещества ниже и выше поверхности. Поэтому величина полного потока зависит как от состава вещества (массовая доля воды и поглотителей нейтронов), так и от толщины атмосферы.

Для района кратера Гейл было выполнено численное моделирование для оценки парциальных потоков нейтронов для всех компонент нейтронного излучения и для определения полного потока нейтронов на поверхности и на орбите с высотой 400 км. Использовался пакет Geant4 toolkit (version: geant4-10-07-patch-01). В расчеты закладывались не только состав марсианской поверхности, состав и толщина атмосферы, но и определенная спектральная плотность потока частиц ГКЛ.

Для моделирования были использованы оценки состава марсианского грунта в кратере Гейл, полученные на основе усреднения данных измерений прибора APXS в этом районе (Gellert и др., 2015). Состав элементов с большим сечением был задан на основе данных активных измерений прибора DAN (Mitrofanov и др., 2022). Массовая доля воды в грунте считалась равной оценке 2.8% в среднем для всей трассы марсохода, полученной на основе результатов измерений прибора DAN (Mitrofanov и др., 2022). Расчеты были выполнены для различных сезонов марсианского года с учетом изменения толщины марсианской атмосферы согласно климатической модели Mars Cli-



**Рис. 1.** Распределение нейтронов по количеству пересечений поверхности кратера Гейл (все столбцы нормированы на количество нейтронов первого пересечения поверхности,  $7.2 \times 10^6$ ).

mate Database (MCD) (см. Forget и др., 1999; Milour и др., 2018). Спектральная плотность потока частиц ГКЛ была назначена в соответствии с минимумом солнечного цикла (то есть максимумом потока ГКЛ), что соответствует фазе солнечного цикла с параметром солнечной модуляции  $\Phi = 398$  МВ по модели ГКЛ (Usoskin и др., 2017).

На рис. 1 показано распределение количества нейтронов для компонент с разным числом пересечений поверхности кратера Гейл для толщины атмосферы, усредненной за марсианский год. По оси  $X$  отложено количество пересечений, а по оси  $Y$  – относительное количество нейтронов, испытавших такое количество пересечений.

Из расчетов следует, что долю около 99% в полную величину потока нейтронов на поверхности кратера Гейл вносят компоненты от № 1 до 12. При этом установлено, что полная величина нейтронного потока на орбите 400 км над кратером Гейл почти на порядок меньше, чем на поверхности. Это означает, что эффекты “отражения” нейтронов от поверхности и в марсианской атмосфере велики и их нужно учитывать.

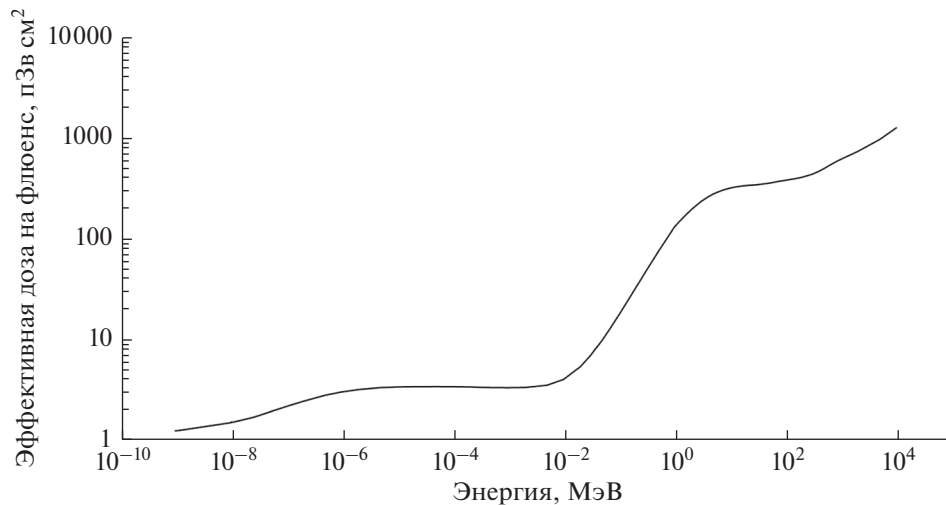
#### ОЦЕНКИ НЕЙТРОННОЙ КОМПОНЕНТЫ РАДИАЦИОННОЙ ДОЗЫ НА ПОВЕРХНОСТИ КРАТЕРА ГЕЙЛ И НА ОРБИТЕ НАД ЭТИМ КРАТЕРОМ

Величина нейтронной компоненты радиационной дозы рассчитывается на основе свертки спектральной плотности потока нейтронного излучения с функцией, учитывающей поражающее воздействие на человеческий организм нейтронов с различными энергиями:

$$D = \int_{E_1}^{E_2} \frac{dN}{dE}(E) g(E) dE, \quad (1)$$

где  $\frac{dN}{dE}(E)$  – спектральная плотность потока нейтронов,  $g(E)$  – функция, описывающая зависимость поражающего воздействия от энергии (см. рис. 2),  $(E_1, E_2)$  – энергетический диапазон, в котором определяется доза. В качестве пределов интегрирования рассматривались диапазоны (0–15 МэВ) и (0–1000 МэВ). Первый диапазон соответствует спектральной чувствительности по энергиям нейтронных детекторов, работающих на орбите Марса HEND/Mars Odyssey и FRENД/TGO (Митрофанов и др., 2003; Mitrofanov и др., 2018), второй диапазон определяет полную нейтронную дозу. Функция  $g(E)$  определяется на основе облучения стандартизированного антропоморфного фантома на борту МКС (Petoussi-Henss и др., 2010). На рис. 2 видно, что поражающая способность нейтронов высоких энергий на порядки превосходит поражающую способность нейтронов низких энергий.

В табл. 1 представлены результаты расчета мощности эффективной дозы нейтронов для различных областей вдоль трассы марсохода Curiosity внутри кратера Гейл. Были выбраны районы с минимальным (0.5%) и максимальным (5%) содержанием воды, полученные по данным измерений российского прибора DAN (Mitrofanov и др., 2022). Кроме этого, представлена оценка мощности эффективной дозы нейтронов в среднем для всей трассы марсохода (средняя величина массовой доли воды 2.8%) и на орбите над кратером



**Рис. 2.** Эффективная доза на единичный нейтронный флюенс для изотропного облучения в соответствии с (Petoussi-Henss и др., 2010).

Гейл. Расчеты сделаны для среднегодовой толщины атмосферы над кратером Гейл. Дополнительный учет сезонной переменности толщины атмосферы показывает, что приведенные в табл. 1 оценки могут испытывать сезонные изменения в пределах 1%.

### ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Ожидаемое распределение значений дозы для различных участков вдоль трассы, пройденной марсоходом Curiosity в кратере Гейл, представлено на рис. 3 для среднегодовой средней толщины атмосферы в кратере Гейл и условий максималь-

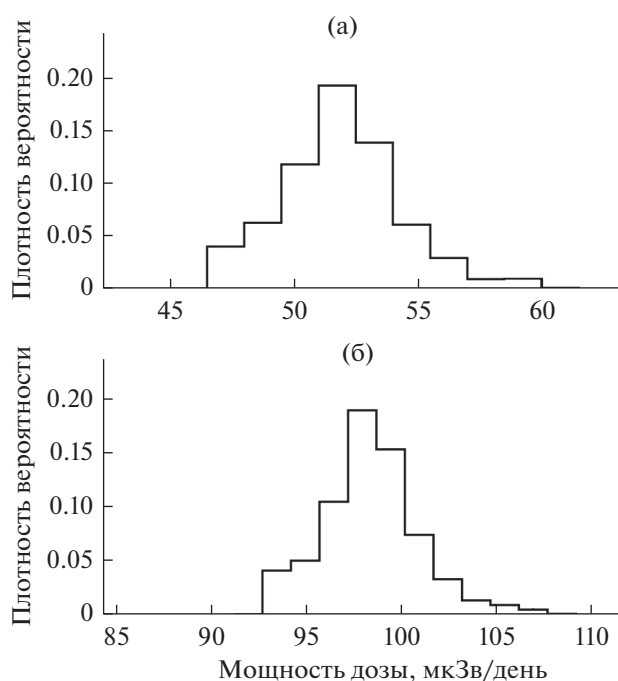
ного потока ГКЛ. Среднее значение дозы вдоль трассы составляет 51.8 мкЗв/день для диапазона энергий (0–15 МэВ) и 98.2 мкЗв/день для диапазона энергий (0–1000 МэВ) (см. табл. 1), дисперсии распределений соответственно равны 2.4 и 2.6 мкЗв/день. Таким образом, переменное содержание воды вносит существенный вклад в изменение мощности эффективной дозы по нейтронам. Переход от сухих районов к наиболее влажным приводит к изменению мощности нейтронной дозы в пределах 20% (табл. 1).

Представленные оценки нейтронной дозы следует сравнить с аналогичными значениями, полученными по данным измерений прибора RAD в календарный период с 15 ноября 2015 г. по

**Таблица 1.** Оценки величины эффективной дозы нейтронной компоненты радиационного фона для района кратера Гейл

Область пространства, для которого получена оценка	Величина среднегодовой мощности эффективной дозы нейтронов для периода солнечной активности, соответствующего максимальному потоку ГКЛ* в диапазонах энергий (0–15) и (0–1000) МэВ (величина приведена в скобках), мкЗв/день
Поверхность кратера Гейл вдоль трассы движения марсохода, средняя величина массовой доли воды 2.8% (Сол № 11 – 3592, пройдено 28.9 км)	51.8 (98.2)
Область, для которой получена минимальная оценка массовой доли воды 0.5% (Сол № 950, пройдено 10.0 км)	61.6 (108.3)
Область, для которой получена максимальная оценка массовой доли воды 5% (Сол № 2956, пройдено 23.8 км)	46.1 (92.3)
Орбита над окрестностью кратера Гейл с высотой 400 км	12.6 (24.6)

\*  $\Phi = 398$  МВ, Usoskin и др., 2017.



**Рис. 3.** (а) Распределение мощности эффективной нейтронной дозы в диапазоне энергий (0–15 МэВ) в кратере Гейл для различного содержания воды, измеренного прибором DAN вдоль трассы движения марсохода Curiosity. (б) Распределение мощности эффективной нейтронной дозы в диапазоне энергий (0–1000 МэВ) в кратере Гейл для различного содержания воды, измеренного прибором DAN вдоль трассы движения марсохода Curiosity.

15 января 2016 г. (см. Guo и др., 2017). Для такого сопоставления мы учли функцию распределения значений среднего содержания воды на участке, который преодолел марсоход за период с 15 ноября 2015 г. по 15 января 2016 г. (среднее значение 2.6% с дисперсией 0.7%) и среднюю толщину ат-

мосферы над кратером Гейл за этот же период (примерно 213 кг/м<sup>2</sup>).

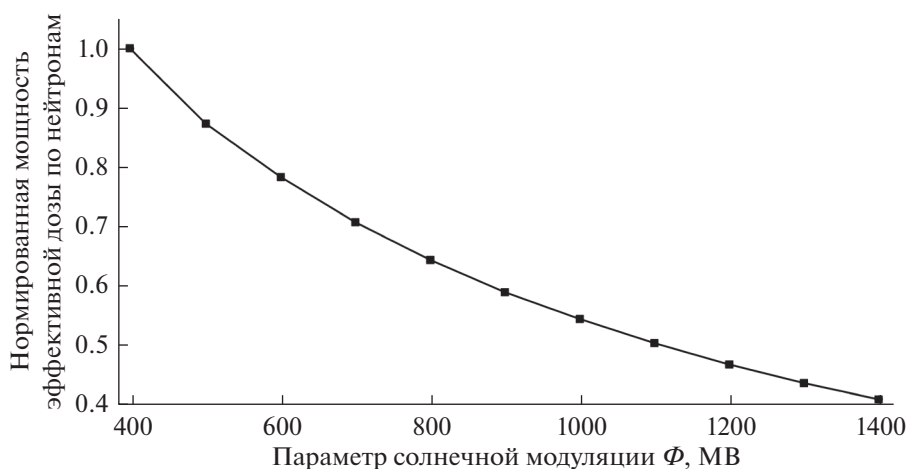
Для сравнения численных оценок с наблюдениями также необходимо учесть спектральную плотность потока ГКЛ в указанный календарный период. Для этого были выполнены численные расчеты, позволяющие определить коэффициент переменной мощности эффективной нейтронной дозы в кратере Гейл в зависимости от параметра солнечной модуляции  $\Phi$  (см. рис. 4).

Usoskin и др. (2017) опубликовали таблицу изменений параметра солнечной модуляции, начиная с 1 января 1951 г. по 1 января 2017 г. Для периода с 15 ноября 2015 г. по 15 января 2016 г. средний параметр солнечной модуляции составляет ~600 МВ. Таким образом, используя значения коэффициента переменной (см. рис. 4), можно переоценить мощность эффективной дозы по нейтронам в кратере Гейл для периода работы прибора RAD. Эта величина составляет около 0.78 относительно значений, представленных в табл. 1 для периода солнечного минимума, когда параметр солнечной модуляции равнялся 400 и поток ГКЛ имел максимум.

Применяя все вышеуказанные коррекции, мы оценили мощность эффективной дозы нейтронов согласно выражению (1) в энергетическом диапазоне (7–740 МэВ). Этот диапазон соответствует измерениям прибора RAD. Сопоставление полученной оценки и измерений RAD представлено в табл. 2.

Сравнение показало, что измеренная величина нейтронной компоненты радиационной дозы и численные оценки сопоставимы друг с другом (численная оценка примерно в 1.5 раза больше, чем измерения прибора RAD).

С учетом оценок, представленных в табл. 1, можно сказать, что в среднем вклад нейтронов на поверх-



**Рис. 4.** Коэффициент переменной мощности эффективной дозы по нейтронам от параметра солнечной модуляции (в соответствии с моделью ГКЛ (Usoskin и др., 2017)).

**Таблица 2.** Сравнение с результатами измерений прибора RAD

Измерения RAD на поверхности кратера Гейл за период 15 ноября 2015 г.–15 января 2016 г. в диапазоне энергий 7–740 МэВ*	Численная оценка, полученная за период 15 ноября 2015 г.–15 января 2016 г. в диапазоне энергий 7–740 МэВ**
25.3 ± 3.3 мкЗв/день	39.1 ± 0.5 мкЗв/день

\* Guo и др., 2017. \*\* Учитывает поток ГКЛ за период 15 ноября 2015 г.–15 января 2016 г., среднюю толщину атмосферы над кратером Гейл и среднее содержание воды, измеренное прибором DAN за этот же период.

ности кратера Гейл в полную дозу (~900 мкЗв/день для максимума ГКЛ (Guo и др., 2021)) составляет около 10%, а на орбите – около 2–3%. Текущие концепции пилотируемых экспедиций к Марсу отводят 500 дней на этап перелета туда и обратно и 500 дней пребывания на поверхности (так называемый Hohmann transfer). За все путешествие суммарная накопленная доза может составить около 1 Зв, что является предельно допустимой величиной даже для космонавтов (как по российским стандартам, так и по стандартам NASA (см. ГОСТ 25645.215-85; Cucinotta и др. 2021)). Примерно от четверти до трети от суммарной дозы космонавт получит, пребывая на поверхности Марса (на открытой поверхности без какой-либо защиты (см. Zeitlin и др., 2013; Hassler и др., 2014; Guo и др., 2021)). Надо понимать, что вклад нейтронной компоненты на поверхности Марса становится ощутимым. Его учет приводит к тому, что допустимое время пребывания на поверхности может сократиться на два месяца (исходя из полного запланированного периода пребывания в 500 дней).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты для оценок нейтронной компоненты радиационной дозы в кратере Гейл для различных участков поверхности с разным содержанием воды показали, что учет нейтронной компоненты радиационного фона необходим для планирования пилотируемых экспедиций к Марсу. Можно заключить следующее.

1. Мощность эффективной нейтронной дозы на открытой поверхности Марса на дне кратера Гейл (без всякой защиты) в диапазоне энергий до 1000 МэВ составляет около 100 мкЗв/день. Оценки сделаны для максимума потока ГКЛ и для толщины атмосферы, усредненной за марсианский год. Эта величина составляет около 10% от полной дозы, учитывающей вклад заряженных частиц. Это означает, что учет нейтронной компоненты на 10% сокращает допустимый срок пребывания космонавтов на открытой поверхности. Для стандартного сценария (500 дней на поверхности Марса) это сокращение составит около 2 месяцев.

2. Мощность эффективной нейтронной дозы в кратере Гейл может меняться сезонно за счет се-

зонной переменности атмосферы. Эта переменность небольшая и может составить около 1%.

3. Поток ГКЛ модулируется солнечной активностью с периодом в 11 лет. Поэтому в ходе солнечного цикла варьируются и потоки вторичных частиц, произведенных в атмосфере и веществе грунта Марса заряженными частицами ГКЛ. Основываясь на численных расчетах и длительном мониторинге нейтронного потока на орбите Марса (прибор HEND/Mars Odyssey), можно сказать, что переменность потока достигает около 2 раз между солнечным минимумом и максимумом. Такая же переменность наблюдается и в величине нейтронной дозы.

4. Марс имеет тонкую атмосферу (на два порядка тоньше, чем на Земле), но ее толщины достаточно, чтобы производить нейтроны и эффективно отражать нейтроны, родившиеся в верхних слоях грунта и вышедшие на поверхность. За счет многократных отражений увеличивается поток нейтронов через поверхность и соответственно возрастает величина нейтронной дозы. Так, если доза на дне кратера Гейл составляет около 100 мкЗв/день, то доза на орбите (без учета вклада дозы от космического аппарата, которая должна учитываться отдельно) над кратером Гейл – всего 25 мкЗв/день (см. табл. 1).

5. Основной вклад в эффективную дозу по нейтронам вносят нейтроны очень больших энергий за счет своей высокой поражающей способности. Тем не менее вклад нейтронов в диапазоне ниже 10–15 МэВ значителен (более 50%). В этом диапазоне поток нейтронов сильно зависит от содержания воды в грунте Марса. Поэтому мощность эффективной дозы по нейтронам существенно меняется при переходе от мест с низким содержанием воды к более влажным. Даже в таком относительно сухом районе, как кратер Гейл, наблюдения прибора DAN на борту марсохода Curiosity обнаружили, что содержание воды меняется в широком интервале от 0.5 до 5%. Соответствующие численные оценки показали, что мощность эффективной дозы по нейтронам в этом случае меняется в пределах 92–108 мкЗв/день, то есть приблизительно на 20%.

6. Была проведена верификация численных оценок. Сравнение с измерениями нейтронной компоненты дозы, выполненными дозиметром

RAD в составе марсохода Curiosity, показало, что численные расчеты дают сопоставимые величины мощности дозы (1.2–1.5 раза выше, чем измерения, см. табл. 2).

В заключение можно сказать, что на примере кратера Гейл очевидно, что пребывание космонавтов на поверхности Марса без специальной защиты от радиации несет в себе значительный риск для их здоровья. Учет нейтронной компоненты радиационного фона только усугубляет эту ситуацию. Поэтому для проектирования будущих обитаемых форпостов на Марсе требуется использование элементов радиационной защиты или естественных укрытий (лавовые пещеры), расположенных в районах с высоким содержанием воды. Последнее условие не только дает возможность доступа к такому важному ресурсу как вода, но и понижает поток быстрых нейтронов, а с ним и нейтронную компоненту радиационной дозы.

Численные расчеты нейтронной компоненты радиационной дозы выполнены в рамках работы, которая была поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (РФФИ), совместный российско-болгарский проект, грант № 19-52-18009. В части обработки данных, полученных с DAN (оценка содержания воды вдоль трассы марсохода Curiosity), работа была поддержана Министерством науки и высшего образования РФ, грант АААА-А18-118012290370-6.

В статье также используются общедоступные данные измерений болгарских дозиметров типа Liulin (см. <http://esa-pro.space.bas.bg/database>), подготовленные при поддержке ESA, контракт № 4000117692/16/NL/NDe (финансируется Правительством Болгарии в рамках контракта ESA по программе PECS). Обработка и анализ этих данных также поддержаны Соглашением между РАН и БАН “Фундаментальные космические исследования” и Болгарским научным фондом (грант КП-06-Россия 24, проект № 129, двусторонний проект Болгария-Россия 2018–2019).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

ГОСТ 25645.215–85 Безопасность радиационная экипажа космического аппарата в полете. Нормы безопасности при продолжительности полета до трех лет. М.: Гос. комитет СССР по стандартам, 1985. 7 с.

Митрофанов И.Г., Литвак М.Л., Козырев А.С., Санин А.Б., Третьяков В.И., Бойнтон У.В., Шинохара К., Хамара Д., Саундерс С., Дрейк Д. Поиск воды в грунте марса по данным глобального картографирования потока нейтронов российским прибором ХЕНД на борту американского аппарата 2001 Mars Odyssey // Астрон. вестн. 2003. Т. 37. № 5. С. 400–412. (Mitrofanov I.G., Litvak M.L., Kozыrev A.S., Sanin A.B., Tretyakov V.I., Boynton W.V., Shinohara C., Hamara D., Saunders S., Drake D.M. Search for water in Martian soil using global neutron mapping by the Russian

HEND instrument onboard the US 2001 Mars Odyssey spacecraft // Sol. Syst. Res. 2003. V. 37. № 5. P. 366–377.) <https://doi.org/10.1023/A:1026018811877>

Митрофанов И.Г., Литвак М.Л., Козырев А.С., Санин А.Б., Третьяков В.И., Гриньков В.Ю., Бойнтон У.В., Шинохара К., Хамара Д., Саундерс Р.С. Оценка содержания воды в грунте Марса по данным нейтронных измерений прибора ХЕНД на борту космического аппарата 2001 Mars Odyssey // Астрон. вестн. 2004. Т. 38. № 4. С. 291–303. (Mitrofanov I.G., Litvak M.L., Kozыrev A.S., Sanin A.B., Tretyakov V.I., Grin'kov V.Yu., Boynton W.V., Shinohara C., Hamara D., Saunders R.S. Soil water content on Mars as estimated from neutron measurements by the HEND instrument onboard the 2001 Mars Odyssey spacecraft // Sol. Syst. Res. 2004. V. 38. № 4. P. 253–257.)

Boynton W.V., Feldman W.C., Squyres S.W., Prettyman T.H., Brückner J., Evans L.G., Reedy R.C., Starr R., Arnold J.R., Drake D.M., Englert P.A.J., Metzger A.E., Mitrofanov I., Trombka J.I., d'Uston C., Wänke H., Gasnault O., Hamara D.K., Janes D.M., Marcialis R.L., Maurice S., Mikheeva I., Taylor G.J., Tokar R., Shinohara C. Distribution of hydrogen in the near surface of Mars: Evidence for subsurface ice deposits // Science. 2002. V. 297. Iss. 5578. P. 81–85. <https://doi.org/10.1126/science.1073722>

Boynton W.V., Taylor G.J., Evans L.G., Reedy R.C., Starr R., Janes D.M., Kerry K.E., Drake D.M., Kim K.J., Williams R.M.S., Crombie M.K., Dohm J.M., Baker V., Metzger A.E., Karunatillake S., Keller J.M., Newsom H.E., Arnold J.R., Brückner J., Englert P.A.J., Gasnault O., Sprague A.L., Mitrofanov I., Squyres, S.W., Trombka J.I., d'Uston L., Wänke H., Hamara D.K. Concentration of H, Si, Cl, K, Fe, and Th in the low- and mid-latitude regions of Mars // J. Geophys. Res.: Planets. 2007. V. 112. Iss. E12. id. E12S99.

Drake D., Feldman W.C., Jakosky B.M. Martian neutron leakage spectra // J. Geophys. Res. 1988. V. 93. Iss. B6. P. 6353–6368. <https://doi.org/10.1029/JB093iB06p06353>

Cucinotta F.A., Schimmerling W., Blakely E.A., Heid T.K. Proposed change to astronaut exposures limits is a giant leap backwards for radiation protection // Life Sciences in Space Research. 2021. V. 31. P. 59–70. <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2021.07.005>

Feldman W.C., Boynton W.V., Tokar R.L., Prettyman T.H., Gasnault O., Squyres S.W., Elphic R.C., Lawrence D.J., Lawson S.L., Maurice S., McKinney G.W., Moore K.R., Reedy R.C. Global distribution of neutrons from Mars: Results from Mars Odyssey // Science. 2002. V. 297. P. 75–78. <https://doi.org/10.1126/science.1073541>

Forget F., Hourdin F., Fournier R., Hourdin Ch., Talagrand O., Collins M., Lewis S.R., Read P.L., Huot J.-P. Improved general circulation models of the Martian atmosphere from the surface to above 80 km // J. Geophys. Res.: Planets. 1999. V. 104. Iss. E10. P. 24155–24176. <https://doi.org/10.1029/1999JE001025>

Gellert R., Clark III B.C. MSL and MER Science Teams. In situ compositional measurements of rocks and soils with the alpha particle X-ray spectrometer on NASA's Mars rovers // Elements. 2015. V. 11. P. 39–44. <https://doi.org/10.2113/gselements.11.1.39>



- Guo J., Zeitlin C., Wimmer-Scheingruber R.F., Hassler D.M., Köhler J., Ehresmann B., Böttcher S., Böhm E., Brinea D.E. Measurements of the neutral particle spectra on Mars by MSL/RAD from 2015-11-15 to 2016-01-15 // *Life Sciences in Space Research*. 2017. V. 14. P. 12–17. <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2017.06.001>
- Guo J., Zeitlin C., Wimmer-Schweingruber R.F., Hassler D.M., Ehresmann B., Rafkin S., 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>
- Hassler D.M., Zeitlin C., Wimmer-Schweingruber R.F., Böttcher S., Martin C., Andrews J., Böhm E., Brinza D.E., Bullock M.A., Burmeister S., and 15 co-authors. The radiation assessment detector (RAD) investigation // *Space Sci. Rev.* 2012. V. 170. P. 503–558. <https://doi.org/10.1007/s11214-012-9913-1>
- 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., Burmeister S., Guo J., Köhler J., Martin C., Reitz G., Cucinotta F.A., Kim M.H., Grinspoon D., Bullock M.A., Posner A., Gómez-Elvira J., Vasavada A., Grotzinger J.P., MSL Science Team. Mars' surface radiation environment measured with the Mars Science Laboratory's Curiosity rover // *Science*. 2014. V. 343. Iss. 6169. <https://doi.org/10.1126/science.1244797>
- Keller J.M., Boynton W.V., Karunatillake S., Baker V.R., Dohm J., Evans L.G., Finch M.J., Hahn B.C., Hamara D.K., Janes D.M., Kerry K.E., Newsom H.E., Reedy R.C., Sprague A.L., Squyres S.W., Starr R.D., Taylor G.J., Williams R.M.S. Equatorial and midlatitude distribution of chlorine measured by Mars Odyssey GRS // *J. Geophys. Res.: Atmospheres*. 2006. V. 111. id. E03S08. <https://doi.org/10.1029/2006JE002679>
- Köhler J., Zeitlin C., Ehresmann B., Wimmer-Schweingruber R.F., Hassler D.M., Reitz G., Brinza D.E., Weigle G., Appel J., Böttcher S. Measurements of the neutron spectrum on the Martian surface with MSL/RAD // *J. Geophys. Res.: Planets*. 2014. V. 119. Iss. 3. P. 594–603. <https://doi.org/10.1002/2013JE004539>
- Litvak M.L., Mitrofanov I.G., Barmakov Y.N., Behar A., Bitulev A., Bobrovniksky Y., Bogolubov E.P., Boynton W.V., Bragin S.I., Churin S., and 21 co-authors. The Dynamic Albedo of Neutrons (DAN) experiment for NASA's 2009 Mars Science Laboratory // *Astrobiology*. 2008. V. 8. № 3. P. 605–612. <https://doi.org/10.1089/ast.2007.0157>
- Litvak M.L., Mitrofanov I.G., Sanin A.B., Lisov D., Behar A., Boynton W.V., Deflores L., Fedosov F., Golovin D., Hardgrove C., and 16 co-authors, MSL Team. Local variations of bulk hydrogen and chlorine-equivalent neutron absorption content measured at the contact between the Sheepbed and Gillespie Lake units in Yellowknife Bay, Gale Crater, using the DAN instrument onboard Curiosity // *J. Geophys. Res.: Planets*. 2014. V. 119. Iss. 6. P. 1259–1275. <https://doi.org/10.1002/2013JE004556>
- Masarik J., Reedy R.C. Gamma ray production and transport in Mars // *J. Geophys. Res.: Planets*. 1996. V. 101. Iss. E8. P. 18891–18912. <https://doi.org/10.1029/96JE01563>
- Maurice S., Feldman W., Diez B., Gasnault O., Lawrence D.J., Pathare A., Prettyman T. Mars Odyssey neutron data: 1. Data processing and models of water-equivalent-hydrogen distribution // *J. Geophys. Res.: Planets*. 2011. V. 116. Iss. E11. id. E11008.
- Mellon M.T., Arvidson R.E., Sizemore H.G., Searls M.L., Blaney D.L., Cull S., Hecht M.H., Heet T.L., Keller H.U., Lemmon M.T., Markiewicz W.J., Ming D.W., Morris R.V., Pike W.Th., Zent A.P. Ground ice at the Phoenix landing site: Stability state and origin // *J. Geophys. Res.: Atmospheres*. 2009. V. 114. id. E00E07.
- Millour E., Forget F., Spiga A., Vals M., Zakharov V., Montabone L., Lefevre F., Montmessin F., Chaufray J.-Y., Lopez-Valverde M.A., Gonzalez-Galindo F., Lewis S.R., Read P.L., Desjean M.-C., Cipriani F. The Mars climate database (version 5.3) // Scientific Workshop: "From Mars Express to ExoMars" 27–28 February 2018, ES-AC Madrid, Spain.
- Mitrofanov I., Anfimov D., Kozyrev A., Litvak M., Sanin A., Tretyakov V., Krylov A., Shvetsov V., Boynton W., Shinohara C., Hamara D., Saunders R.S. Maps of subsurface hydrogen from the High Energy Neutron Detector, Mars Odyssey // *Science*. 2002. V. 297. P. 78–81. <https://doi.org/10.1126/science.1073616>
- Mitrofanov I.G., Litvak M.L., Varenikov A.B., Barmakov Y.N., Behar A., Bobrovniksky Y.I., Bogolubov E.P., Boynton W.V., Harshman K., Kan E., and 13 co-authors. Dynamic Albedo of Neutrons (DAN) experiment onboard NASA's Mars Science Laboratory // *Space Sci. Rev.* 2012. V. 170. P. 559–582. <https://doi.org/10.1007/s11214-012-9924-y>
- Mitrofanov I.G., Litvak M.L., Sanin A.B., Starr R.D., Lisov D.I., Kuzmin R.O., Behar A., Boynton W.V., Hardgrove C., Harshman K., and 5 co-authors. Water and chlorine content in the Martian soil along the first 1900 m of the Curiosity rover traverse as estimated by the DAN instrument // *J. Geophys. Res.: Planets*. 2014. V. 119. Iss. 7. P. 1579–1596. <https://doi.org/10.1002/2013JE004553>
- Mitrofanov I.G., Malakhov A., Bakhtin B., Golovin D., Kozyrev A., Litvak M., Mokrousov M., Sanin A., Tretyakov V., Vostrukhin A., and 16 co-authors. Fine Resolution Epithermal Neutron Detector (FRIEND) onboard the ExoMars Trace Gas Orbiter // *Space Sci. Rev.* 2018. V. 214. Iss. 5. id. 86 (26 p.)
- Mitrofanov I.G., Nikiforov S.Y., Djachkova V.V., Lisov D.I., Litvak M.L., Sanin A.B., Vasavada A.R. Water and chlorine in the Martian subsurface along the traverse of NASA's Curiosity rover, Part I: DAN measurement profiles along the traverse // *J. Geophys. Res.: Planets*. 2022. V. 127. id. e2022JE007327. <https://doi.org/10.1029/2022JE007327>
- Nikiforov S.Y., Mitrofanov I.G., Litvak M.L., Lisov D.I., Djachkova M.V., Jun I., Tate C., Sanin A.B. Assessment of water content in Martian subsurface along the traverse of the Curiosity rover based on passive measurements of the DAN instrument // *Icarus*. 2020. V. 346. id. 113818.
- Petoussi-Hens N., Bolch W., Eckerman K., Endo A., Hertel N., Hunt J., Pelliccioni M., Schlattl H., Zankl M. Conversion coefficients for radiological protection quantities

- for external radiation exposures // *Annals of the ICRP*. 2010. V. 40. Iss. 2–5. P. 1–257.  
<https://doi.org/10.1016/j.icrp.2011.10.001>
- Semkova J., Koleva R., Benghin V., Dachev Ys., Matviichuk Y., Tomov B., Krastev K., Maltchev S., Dimitrov P., Mitrofanov I., and 14 co-authors.* Charged particle radiation measurements with Liulin-MO dosimeter of FRENDO instrument aboard ExoMars Trace Gas Orbiter during the transit and high elliptic Mars orbit // *Icarus*. 2018. V. 303. P. 53–66.  
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2017.12.034>
- Semkova J., Koleva R., Benghin V., Dachev Ys., Matviichuk Y., Tomov B., Krastev K., Maltchev S., Dimitrov P., Bankov N., 10 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.
- Semkova J., Benghin V., Guo J., Zhang J., Da Pieve F., Krastev K., Matviichuk Y., Tomov B., Shurshakov V., Drobyshev S., Mitrofanov I., Golovin D., Litvak M.* Comparison of the flux measured by Liulin-MO dosimeter in ExoMars TGO science orbit with the calculations // *Life Sciences in Space Research*. 2022.  
<https://doi.org/10.1016/j.lssr.2022.08.007>
- Usoskin I.G., Gil A., Kovaltsov G., Mishev A., Mikhailov V.* Heliospheric modulation of cosmic rays during the neutron monitor era: Calibration using PAMELA data for 2006–2010 // *J. Geophys. Res.: Space Physics*. 2017. V. 122. P. 3875–3887.  
<https://doi.org/10.1002/2016JA023819>
- 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., Burmeister S., Guo J., Köhler J., Martin C., Posner A., Rafkin S., Reitz G.* Measurements of energetic particle radiation in transit to Mars on the Mars Science Laboratory // *Science*. 2013. V. 340. Iss. 6136. P. 1080–1084.  
<https://doi.org/10.1126/science.1235989>
- Zhang J., Guo J., Dobynde M.I., Wang Y., Wimmer-Schweingruber R.F.* From the top of Martian Olympus to deep craters and beneath: Mars radiation environment under different atmospheric and regolith depths // *J. Geophys. Res.: Planets*. 2022. V. 127.  
<https://doi.org/10.1029/2021JE007157>