

## Галактические и солнечные космические лучи и выживаемость бактерий и лишайников на Марсе

Карпова Зоя Марленовна, кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник  
Объединенный институт ядерных исследований (г. Дубна)  
Карпов Дмитрий Сергеевич, владелец и генеральный директор  
частная космическая компания «СОФИКОМ» (г. Москва)

**Аннотация.** Космическая радиация складывается из двух компонент: ГКЛ и СКЛ. В период минимума солнечной активности в межпланетном пространстве преобладает компонента ГКЛ, являющаяся основным источником космического излучения на Земле и Марсе. При освоении Марса встает вопрос о защите электронной аппаратуры и живых организмов от космической радиации. Рассчитаны энергетический спектр ГКЛ и число высокоэнергичных протонов, достигающих поверхности Марса, которые могут повлиять на выживаемость бактерий экстремофилов и лишайников. Рассмотрены и предложены биологические организмы для первичного освоения среды.

**Ключевые слова:** физико-математические науки, галактические космические лучи, солнечные космические лучи, энергетический спектр, бактерии, лишайники, экстремофилы.

## Galactic and solar cosmic rays and vitality of the bacteria and lichens on Mars

Karpova Zoya, Dr., senior researcher  
Joint Institute for Nuclear Research (Dubna)  
Karpov Dmitriy, founder, CEO  
LLC SOFICOM (Moscow)

**Abstract.** Cosmic radiation consists of two components: GCR and SCR. In a minimum of solar activity in interplanetary space the component of GCR prevails, being the basic source of cosmic radiation on the Earth and Mars. At mastering of Mars, there is a question of protection of electronic equipment and live organisms from cosmic radiation. Spectrum of GCR and number of high-energy protons, which reaches the surfaces of Mars are calculated. These factors can act upon the vitality of bacteria extremophiles and lichens. Biological organisms for primary mastering of environment like candidates for a key role of the first colonists of Mars were been considered and offered.

**Keywords:** Physical and mathematical sciences, galactic cosmic rays, solar cosmic rays, bacteria, lichens, extremophiles.

**DOI:** 10.5281/zenodo.5497579

### 1. Введение.

Цель статьи — оценить поток космической радиации на поверхности Марса: на экваторе и в приэкваториальных широтах от  $-30^\circ$  до  $+30^\circ$ . Сделать это можно таким же способом, как и на Земле. Космическая радиация складывается из двух компонент: галактических космических лучей (ГКЛ) и солнечных космических лучей (СКЛ). В период минимума цикла солнечной активности (СА), когда на Солнце мало пятен Вольфа ( $<10$ ) или их почти не наблюдается, в межпланетном пространстве с известным межпланетным магнитным полем (ММП) преобладает компонента ГКЛ, которая и является основным источником космического излучения как на Земле, так и на Марсе. В период максимума СА число пятен Вольфа, то есть активных областей на поверхности Солнца, возрастает до величины  $>50$ , тогда в межпланетном пространстве преобладает компонента СКЛ, что можно видеть по соответствующим параметрам солнечного ветра [1]. Весь солнечный цикл от минимума СА к максимуму занимает 11 лет.

Данные космической погоды — скорость солнечного ветра, солнечные вспышки, геомагнитные бури и пятна на Солнце, — регулярно публикуют Лаборатория рентгеновской астрономии Солнца (ФИАН, Россия) и Центр космической погоды (*Space Weather Prediction Center, США*) [1, 2]. Данные космической погоды ФИАНа собираются космическими телескопами комплекса ТЕСИС, а данные для Центра космической погоды поставляет спутник GOES-16, который измеряет как поток рентгеновский лучей, так и поток протонов от Солнца.

Землю от потоков ГКЛ и СКЛ защищает магнитное поле и плотная атмосфера. На Марсе магнитное поле примерно в десять тысяч раз слабее земного. По сравнению с Землей у Марса отсутствует магнитосфера и радиационные пояса, задерживающие как в ловушке частицы мягкой компоненты КЛ. Атмосфера Марса, называемая тропосферой, довольно тонкая ( $\sim 110$  км) и сильно разреженная. Ее эквивалентная толщина, используемая при расчете ослабления потоков КЛ при их прохождении через атмосферу, по разным оценкам составляет от 16 до 25 г·см $^{-2}$  [3-5], — против 1030 г·см $^{-2}$  Земли. Поэтому в статье приводится авторский расчет этой величины. При освоении Марса серьезно встает вопрос о защите электронной аппаратуры и живых организмов от космической радиации [6]. Расчет энергетических спектров производится от границы атмосферы до «нулевого уровня» или «уровня моря», где атмосферное давление равно 6.1 мбар [7-9].

Для оценки выживаемости бактерий-автотрофов и лишайников следует рассмотреть характеристики обеих компонент космического излучения: галактических и солнечных космических лучей в условиях Марса. Однако установлено, что атмосфера Марса служит хорошей защитой от потоков СКЛ [5], особенно в период минимума СА.

## 2. Высота однородной атмосферы Марса.

Стоит заметить, что исследования галактических космических лучей (ГКЛ) и солнечных космических лучей (СКЛ) проводились в условиях атмосферы Земли с известными параметрами: толщиной атмосферы, плотностью воздуха, химическим составом и ускорением свободного падения. Будет ли такая же зависимость известных параметров энергетического спектра ГКЛ от энергии частиц в атмосфере Марса, необходимо выяснить.

**Атмосфера Марса.** В расчетах взаимодействия КЛ с веществом воздуха обычно используется высота однородной атмосферы. Какова она на Марсе? Для рассмотрения сути вопроса трансформируем некоторые характеристики земной атмосферы к марсианским условиям. Сделаем следующее допущение. Также как и на Земле в марсианской атмосфере давление воздуха убывает с увеличением высоты, предположительно, по экспоненциальному закону. Тогда получим формулу с физическими характеристиками Марса:

$$P = P_0 \cdot \exp\left(-\frac{h}{H_{Mars}}\right), \quad (1)$$

где  $P$  есть давление на высоте  $h$  в атмосфере Марса,  $P_0$  – давление на поверхности Марса,  $m_{CO_2}$  – масса молекул газа (в основном углекислого),  $g_{Mars}$  – ускорение силы тяжести на Марсе,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – абсолютная температура газа. Величина  $H_{Mars}$  есть высота однородной атмосферы Марса:

$$H_{Mars} = \frac{kT}{m_{CO_2} \cdot g_{Mars}}, \quad (2)$$

Высоту  $H_{Mars}$  можно вычислить по данным марсоходов: Персеверанс (*Perseverance*) и Инсайт (*InSight*). Используя значения дневной и ночной температуры [7], измеренные этими аппаратами, можно узнать, как изменяется высота однородной атмосферы Марса весной и летом.

На Рис.1а и Рис.1б представлены графики дневной и ночной высоты однородной атмосферы в кратере Езеро (*Jezero Crater*) за период 110-139 солов (июнь-июль 2021). Прослеживается линейная зависимость высоты  $H_{Mars}$  от дневной и ночной температуры воздуха на поверхности планеты. Есть различие между ночными и дневными значениями высоты  $H_{Mars}$ , то есть высота атмосферы не остается постоянной; она как бы «дышит». Средние высоты составляют: 12.67 км днем и 9.74 км ночью. Среднесуточная высота за весь период равна ~11.21 км.

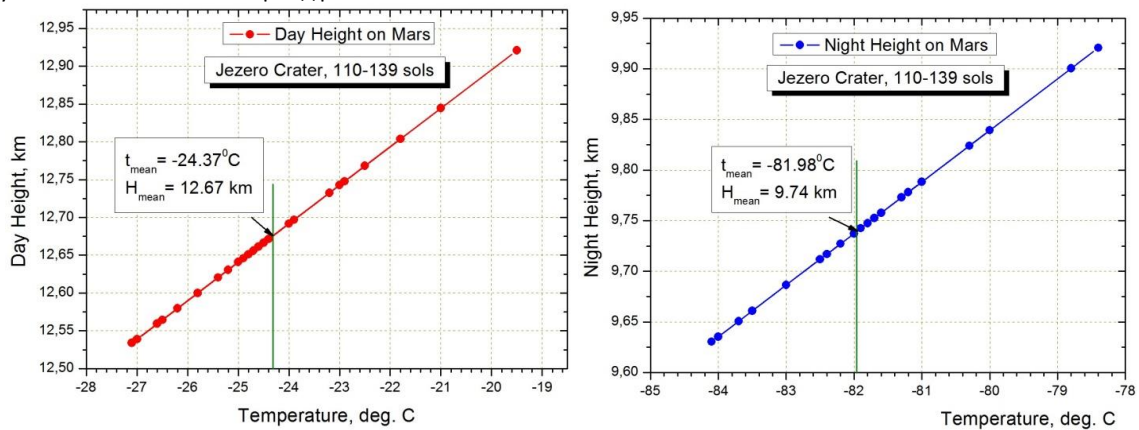


Рис. 1. Кратер Езеро (*Jezero Crater*). Высота однородной атмосферы Марса рассчитана по данным марсохода Персеверанс (*Perseverance*) за период 110-139 солов (2021): а) дневные и б) ночные значения. Средние высоты: 12.67 км днем и 9.74 км ночью. Среднесуточная высота за весь период равна ~11.21 км.

На Рис.2а и Рис.2б представлены графики дневной и ночной высоты однородной атмосферы на равнине Элизий (*Elisium Planitia*) за период 650-685 солов (2020).

Следуя за температурой воздуха в течение одного сола, существует также и суточная волна изменения высоты  $H_{Mars}$  от максимума к минимуму и наоборот. Сравнивая среднесуточные высоты  $H_{Mars}$  на Рис.1 и Рис.2, можно видеть, что они практически одинаковы для графиков, сделанных по данным, полученным марсоходами в период марсианской весны и лета, и в среднем равны ~11.17 км. Это уже не теоретическая оценка высоты  $H_{Mars}$ ; она опирается на измерения аппаратов, работающих на поверхности Марса, что практически совпадает с известным значением 11.1 км [10].

**Другие характеристики атмосферы Марса.** Химический состав атмосферы Марса изучен хорошо. Воздух представлен в основном углекислым газом, доля которого составляет 95.32% [5]. Именно поэтому все расчеты для высоты  $H_{Mars}$  опираются на формулу (2), где за основу берется масса молекулы углекислого газа.

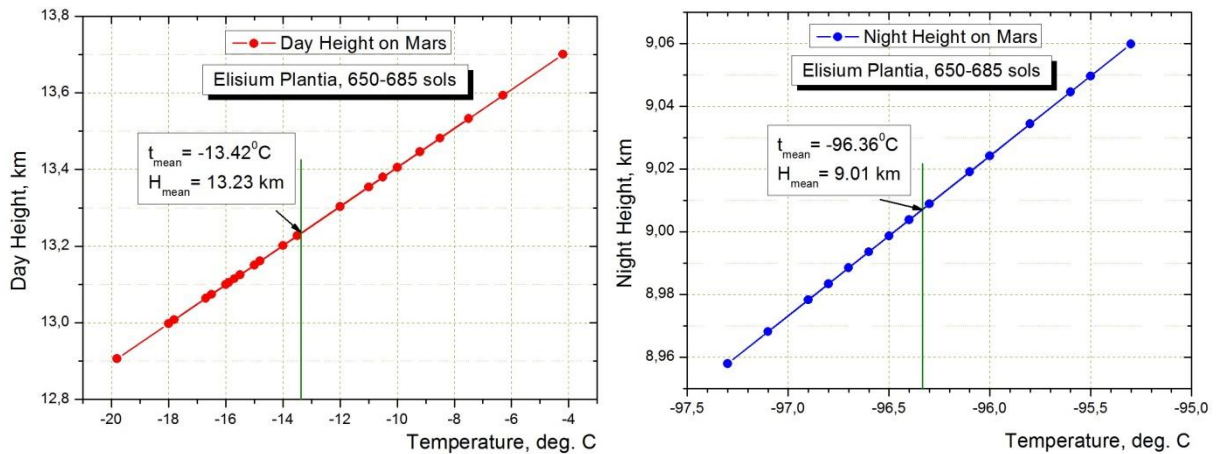


Рис. 2. Равнина Элизий (*Elisium Plantia*). Высота однородной атмосферы Марса рассчитана по данным марсохода Инсайт (*InSight*) за период 650-685 солов (2020): а) дневные и б) ночные значения. Средние высоты: 13.23 км днем и 9.01 км ночью. Среднесуточная высота за весь период равна ~11.12 км.

Далее понадобятся параметры: плотность воздуха и молярный объем углекислого газа. Плотность и молярный объем (углекислого газа) связаны соотношением:

$$\rho = \frac{M_{CO_2}}{V_m}, \quad (3)$$

где  $\rho$  – плотность марсианского воздуха,  $M$  – молярная масса  $CO_2$  (44 г/моль) и  $V_m$  – молярный объем. Молярный объем газа есть [11]:

$$V_m = \frac{RT}{P}, \quad (4)$$

где  $T$  – абсолютная температура,  $P$  – давление,  $R$  – универсальная газовая постоянная. На Земле это считается при «нормальных условиях»: температуре  $+15^\circ C$  и давлении воздуха на уровне моря.

«Нулевым уровнем» или «уровнем моря» на Марсе считается уровень с давлением 6.1 мбар (610 Па) [12], а средняя температура по планете есть  $-63^\circ C$  (210.15 К). Если принять эти значения за «нормальные условия», тогда согласно (3) и (4) легко посчитать молярный объем  $CO_2$  и плотность марсианской атмосферы. В Таблице 1 приведены нормальные условия и параметры атмосферы для обеих планет. Видно, что у Марса менее плотная атмосфера, которая в ~79.5 раз более разрежена, чем на Земле, а за счет слабой силы тяжести молярный объем газа на Марсе больше.

Таблица 1. Нормальные условия на Марсе и Земле на «уровне моря»

Атмосфера, норм. условия	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$V_m$ , м <sup>3</sup> /моль	$P$ , Па	$T$ , К
Марс	0.0154	2.8644	610	210.15
Земля	1.2250	0.0224	101325	288.15

### 3. Радиационная единица длины и глубина атмосферы для вертикального потока КЛ на Марсе.

Учитывая высоту однородной атмосферы и плотность атмосферы, полученные в Пункте. 2, можно посчитать радиационную единицу длины и глубину атмосферы на Марсе в единицах (г/см<sup>2</sup>). Радиационная единица длины используется как расстояние, на котором интенсивность потоков электронно-фотонной компоненты с частицами высокой энергии ослабляется в  $e$  раз. Она удобна для описания взаимодействия космических лучей с веществом. Радиационную единицу длины  $x$  можно вычислить по известной формуле [13]:

$$x^{-1} = 4\alpha \cdot r_0^2 \sum_i n_i Z_i (Z_i + 1) \ln \left( 183 \cdot Z_i^{-\frac{1}{3}} \right), \quad (5)$$

где  $n_i$  – число атомов сорта  $i$  в 1 см<sup>3</sup>,  $Z_i$  – заряд ядра,  $r_0 = 2.8179 \cdot 10^{-13}$  см – классический радиус электрона,  $\alpha = 1/137$ . В расчетах используем вещество, преобладающее в атмосфере Марса, углекислый газ. Радиационная единица длины  $x$  и глубина атмосферы  $H_0$  для вертикального потока КЛ (электронно-фотонной компоненты) в единицах г/см<sup>2</sup> приведены в Таблице 2. Глубина атмосферы  $H_0$  вычислена для средней высоты однородной атмосферы  $H$ , равной ~11.17 км, где брались измерения марсоходов в 2020, 2021 [7].

Таблица 2. Радиационная единица длины и глубина атмосферы для вертикального потока КЛ на Марсе и Земле

Рад. ед. длины в атмосфере	$x$ , см	$x$ , г/см <sup>2</sup>	$H_0$ , г/см <sup>2</sup>	Кратер Езеро $H_0$ , г/см <sup>2</sup>	Равнина Элизий $H_0$ , г/см <sup>2</sup>
Марс (CO <sub>2</sub> )	1759.0	0.0271	17.2018	17.2634	17.1248
Земля (воздух)	28680.0	37.0	1030.0	—	—

### 4. Галактические космические лучи на поверхности Марса.

**Общие сведения.** Галактические космические лучи (ГКЛ) состоят из протонов (~90%), ядер гелия (7%) и более тяжелых ядер (1%) химических элементов (углерод, азот и кислород). Максимальная энергия ГКЛ может достигать  $3 \cdot 10^{20}$  эВ [13], в то время как плотность потока мала  $\sim 1.5 \cdot 10^4$  м<sup>-2</sup> · с<sup>-1</sup> [13]. ГКЛ изучались с точки зрения их взаимодействия с атмосферой не

только Земли, но и других планет Солнечной системы, в том числе и Марса [5]. Эти исследования проводились с помощью космических аппаратов и теоретических методов, позволяющих сделать первичные оценки параметров космического излучения.

В период минимума солнечной активности (СА) в межпланетном пространстве компонента ГКЛ преобладает над СКЛ. Сейчас наблюдается минимум СА. Рассмотрим взаимодействие ГКЛ с атмосферой Марса. Чтобы достигнуть поверхности Марса ГКЛ должны преодолеть слой вещества около 17.2 г/см<sup>2</sup> (Табл. 2). За это время частицы сталкиваются с ядрами атомов атмосферы и теряют часть своей энергии, порождая вторичные частицы — пионы, нейтроны, протоны, мюоны, электроны, позитроны и фотоны. Вторичные частицы делятся на компоненты: адронную, мюонную и электронно-фотонную, где проникающей является адронная компонента. Мягкая компонента (из электронов и фотонов) при этом поглощается сильнее других. Основные параметры, измеряемые в космических лучах — это интенсивность потока, энергетический спектр, угловое распределение и химический состав космических лучей [13].

**Энергетический спектр ГКЛ.** Установлено, что энергетический спектр ГКЛ зависит от энергии частиц степенным образом [14]. Сейчас в исследованиях КЛ используется модель ГКЛ НИИЯФ-2016, [15, 16]:

$$F_{(p,He)}(E, t) = A_{(p,He)} \cdot E^{-\gamma} \cdot \Psi_{(p,He)}(E, t), \quad (6)$$

$$\Psi_{(p,He)}(E, t) = \left( \frac{E}{E + \varepsilon_{(p,He)}(E, t)} \right)^{3.7}, \quad (7)$$

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + k \cdot W(t - \Delta t), \quad (8)$$

где индексы: p — протоны, He — гелий. В (6) A — коэффициент, измеряемый в МэВ/нуклон / (см<sup>2</sup>·ср·с),  $\gamma = 2.72$ . В (8)  $\varepsilon_0 = 817$  МэВ/нуклон для протонов и  $\varepsilon_0 = 576$  МэВ/нуклон для гелия, k = 4.64 МэВ/нуклон для протонов и k = 3.26 МэВ/нуклон для гелия,  $\Delta t$  — отрезок времени наблюдения в период максимума или минимума СА, когда известно W — число пятен Вольфа. Сейчас минимум СА, а значит число пятен Вольфа < 10.

Энергетический спектр ГКЛ для протонов и ядер гелия, рассчитанный для вертикального потока на экваторе, в период минимума СА, и число частиц на глубине x в атмосфере Марса представлены на Рис. 3. Расчеты сделаны согласно формулам (6)-(10).

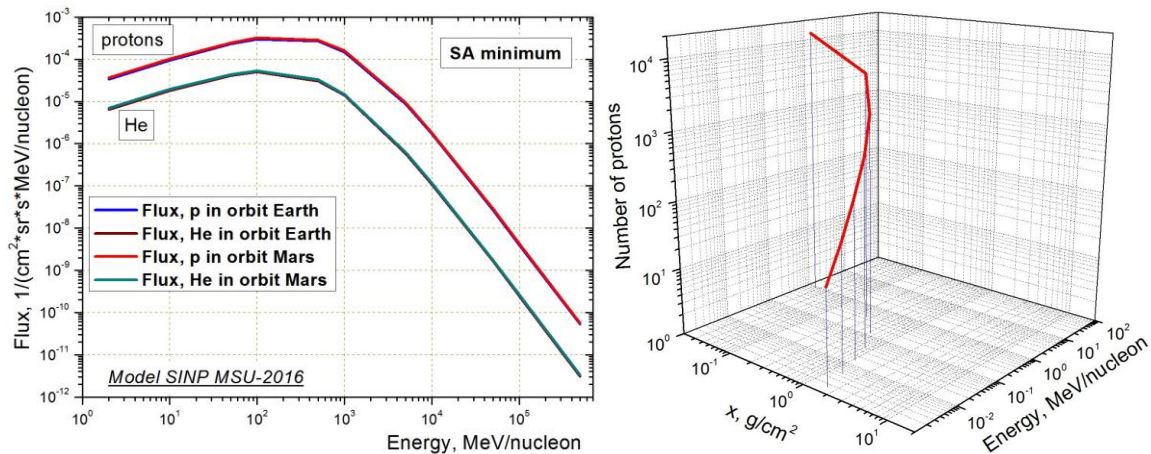


Рис. 3. а) Энергетический спектр ГКЛ для протонов и ядер гелия на орбитах Марса и Земли, рассчитанный по модели НИИЯФ-2016 в период минимума СА. б) Число протонов с энергией 1 МэВ в атмосфере Марса на глубине x

Такой поток частиц ГКЛ, как на Рис. 3а падает на границу атмосферы Марса, когда в межпланетном пространстве компонента ГКЛ преобладает над СКЛ. Поскольку Марс находится на расстоянии 1.5 а. е., то поток ГКЛ больше, чем на орбите Земли на ~7% [6]. Из графика Рис. 3а видно, что число частиц с энергией E > 2·10<sup>3</sup> МэВ быстро убывает с увеличением энергии частицы.

**Зависимость числа протонов от глубины в атмосфере.** Зная энергетический спектр ГКЛ, можно узнать, какое число протонов будет в атмосфере Марса на глубине x. Здесь можно воспользоваться формулой Г. Т. Зацепина [13]:

$$N(E, x) = N_0(E, 0) \cdot \exp\left[-\frac{x}{L_n}\right], \quad (9)$$

$$L_n = \frac{\lambda_n}{1 - \langle u^{-1} \rangle}, \quad (10)$$

где  $\lambda_n$  — пробег неупругого взаимодействия налетающей частицы (протона),  $L_n$  — пробег поглощения этой частицы;  $u = E/dE$ , (E, E + dE) — следующий интервал энергии протонов после соударения с ядрами атмосферы, при этом E > E.

Результат расчетов для вертикального потока представлен на Рис. 3б. Большая часть протонной компоненты с энергией частиц 1 МэВ вырождается на глубине 5-6 г/см<sup>2</sup>, и до поверхности доходит только 6-7 протонов. Протоны с энергией >100 МэВ вырождаются на глубине ~2-3 г/см<sup>2</sup>, и до поверхности доходит 1-2 протона. Чем энергичнее частицы ГКЛ, тем слабее поток. При взаимодействии первичных протонов с ядрами атмосферы рождаются вторичные частицы — это нейтроны, пионы и мюоны, которые вносят свой вклад в общую величину космической радиации.

Если суммировать все виды компонент с энергиями от 0.1 МэВ до 1 ТэВ, то суммарная доза космической радиации на поверхности будет немалой. Обычно ее пересчитывают в поглощенную дозу, которая зависит от энергии и сорта частиц. Так в период минимума СА поглощенная доза радиации от заряженных частиц ГКЛ (составит 4 рад/год) на поверхности планеты. Если же учитывать оба потока: ГКЛ и СКЛ вместе с вкладом от вторичных частиц, то поглощенная доза составит ~5.2 рад/год, Табл.2 из [5].

## 5. Выживаемость бактерий экстремофилов и лишайников.

Как было рассмотрено ранее [5-7, 15] и в Пункте 4, климатические и радиационные условия на Марсе довольно суровые. Чтобы терраформировать планету, необходимо тщательно подобрать стартовые низшие биологические организмы, которые начнут первичное освоение среды. В этом направлении активно ведутся исследования, как на космических аппаратах (КА), так и в лабораториях, в барокамерах, имитирующих условия на Марсе [17-19, 22].

Найдено, что некоторые микроорганизмы сохраняют жизнеспособность в различных экстремальных условиях: при температурах  $< -70^{\circ}\text{C}$ , влажности воздуха  $\sim 1\text{-}2\%$  и в вакууме, а также в условиях космической радиации [19-21]. Так, арктические виды лишайников успешно восстанавливают свой фотосинтез и процессы дыхания после сверхнизких температур (до  $-196^{\circ}\text{C}$ ). Бактерии и лишайники экстремофилы обитают в самых неподходящих для обычных организмов местах: в кипящей воде, во льду, кислотах, солях кристаллов, воде из ядерных реакторов и даже в токсичных отходах [18]. Кандидаты в «первые колонисты» из низших биологических организмов, которые выдерживают космическую радиацию, низкое давление (включая вакуум) и низкую температуру [22-24], представлены в Таблице 3.

Таблица 3. Биологические организмы, выдерживающие космическую радиацию, вакуум и низкую температуру, как кандидаты для первичного освоения среды на Марсе

Кандидаты для первичного освоения среды			
Лишайники	Бактерии	Беспозвоночные	Семена
<i>Rhizocarpon geographicum</i>	<i>Bacillus safensis</i> ,	<i>Tardigrada</i>	<i>Arabidopsis thaliana</i>
<i>Xanthoria elegans</i>	<i>Deinococcus radiodurans</i>	—	—
<i>Circinaria gyrosa</i>	<i>Bacillus subtilis</i>	—	—
—	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	—	—

**Примечание.** *Rhizocarpon geographicum* – Ризокарпон географический, *Xanthoria elegans* – Ксантория элегантная. *Circinaria gyrosa* – Циrcинария. *Bacillus safensis* – палочковая бактерия. *Deinococcus radiodurans* – экстремофильный кокк. *Saccharomyces cerevisiae* – пекарские дрожжи. *Tardigrada* – Тихоходка. *Arabidopsis thaliana* – Резуховидка Таля.

#### 6. Заключение.

По данным марсоходов Персеверанс и Инсайт сделаны расчеты параметров атмосферы Марса: высоты однородной атмосферы, плотности марсианского воздуха, радиационной единицы длины и глубины атмосферы. Значения получены для вертикального потока КЛ и нормальных условий, т.е. на «уровне моря» (при атмосферном давлении 6.1 мбар). Рассмотрены потоки космической радиации: галактические и солнечные космические лучи на орбите и поверхности Марса. С учетом атмосферных параметров вычислены: энергетический спектр ГКЛ и число протонов в зависимости от энергии первичных частиц и глубины атмосферы. Согласно величине поглощенной дозы предложены кандидаты биологических организмов для первичного освоения среды на Марсе (Табл. 3).

#### Литература:

1. Лаборатория рентгеновской астрономии Солнца, ФИАН, [https://thesis.lebedev.ru/magnetic\\_storms.html](https://thesis.lebedev.ru/magnetic_storms.html)
2. NOAA/ NWS Space Weather Prediction Center, <https://www.swpc.noaa.gov>
3. Л. С. Новиков. Радиационные воздействия на материалы космических аппаратов. М: Университетская книга, 2010.
4. Новиков Л.С. Космическое материаловедение. Учебное пособие. – М.: Макс Пресс, 2014, 448с.
5. И. П. Безродных, Е. И. Морозова, А. А. Петрукович, В. Т. Семёнов. Радиационные условия на орбите и поверхности Марса. // Вопросы электромеханики. Т. 138, 2014.
6. Н. В. Кузнецов, М. И. Панасюк, М. В. Подзолко, Сравнение измеренных и прогнозируемых значений поглощенных доз при воздействии галактических космических лучей // Космические исследования, 2019. Т. 57, № 1, с. 57-60.
7. З. М. Карпова, Д. С. Карпов. Оптимальная локация стартовой колонии низших биологических организмов для терраформирования планеты Марс // Евразийское научное объединение. М.: № 7 (77), Июль, 2021. С.37-41. — DOI: 10.5281/zenodo.5168537.
8. Seymour L. Hess, Robert M. Henry, Joachim Kuettner, Conway B. Leovy, Jack A. Ryan, Meteorology experiments: the Viking Mars lander, Icarus, Vol. 16, Issue 1, February, Pages 196-204, 1972.
9. Moroz, V. I., Preliminary results of studies conducted on the Soviet automatic stations Mars 4, Mars 5, Mars 6, and Mars 7, Cosmic Res., 13, No. 1, 1-6, July 1975.
10. Редкол.: Р.А. Сюняев и др., 2-е изд. - М.: Советская энциклопедия, 1986, с.455-456, 783 с.
11. Fundamental Physical Constants. CODATA Value: molar volume of ideal gas (273.15 K, 101.325 kPa).
12. З. М. Карпова. Терраформирование планеты Марс с помощью низших биологических организмов экстремофилов и некоторых мезофилов // Евразийское научное объединение. М.: № 6 (76), Июнь, 2021. С.37-41. — DOI: 10.5281/zenodo.5090210.
13. В. С. Мурзин. Астрофизика космических лучей. Учебное пособие для вузов. - М.: Университетская книга; Логос, 2007, 488с. ISBN 978-5-98704-171-6.
14. М. Лонгейр. Астрофизика высоких энергий, М: Мир, 1984, 400с.
15. Кузнецов Н.В., Панасюк М.И., Попова Е.П., Подзолко М.В. Модель потоков и физические характеристики заряженных частиц галактических космических лучей. НИИЯФ МГУ, М. 2017.
16. N.V. Kuznetsov et al., Journal of Geophysical Research, 122(2), 1463–72, 2017. DOI:10.1002/2016JA022920
17. Л. Н. Порядина, И. А. Прокопьев, Л. А. Конорева, С. В. Чесноков, И. В. Слепцов, Г. В. Филиппова, М. М. Шашурин. Адаптационные биохимические механизмы, обеспечивающие устойчивость лишайников к экстремальным условиям среды обитания (обзор). Природные ресурсы Арктики и Субарктики. Т. 26, №4, 2018. DOI: 10.31242/2618-9712-2018-26-4-109-117.
18. Cavicchioli R. «Extremophiles and the search for extraterrestrial life». Astrobiology 2(3): 281-292, Fall 2002.
19. Ильин Е. А. Биологические и радиационно-физические эксперименты в полете КА «Фотон-М». №2 Государственный научный центр РФ - Институт медико-биологических проблем РАН, 2005.

20. Вайнштейн Е.А. Некоторые вопросы физиологии лишайников. I Дыхание // Ботанический журнал. 1972, №7, с. 832-840

21. Вайнштейн Е.А. Некоторые вопросы физиологии лишайников. II Фотосинтез // Ботанический журнал. 1973, №3, с. 454-464.

22. Sanchez F. J., Mateo-Marti E., Raggio J., Meessen J., Martinez-Frias J., Sancho L. G., Ott S., de la Torre R. The resistance of the lichen *Circinaria gyrosa* (nom. provis.) towards simulated Mars conditions - a model test for the survival capacity of an eukariotic extremophile. // *Planetary and Space Science*. 2012. V.72 (1). P.102-110. DOI: 10.1016/j.pss.2012.08.005

23. De la Torre N. R., Miller A. Z., de la Rosa J. M., Pacelli C., Onofri S., Sancho L. G. Cunero B., Lorek A., Wolter D., de Vera J. P. Cellular Responses of the Lichen *Circinaria gyrosa* in Mars-Like Conditions. // *Frontiers in Micro-biology*. 2018. V. 9. P. 1-6. DOI: 10.3389/fmicb.2018.00308

24. Шапиро И. А. Эколого-физиологические особенности газообмена у лишайников. Успехи современной биологии. 2009. Т. 129, №4, с. 392-398.