

ПРИРОДА

1 2021

ПОИСКИ ЖИЗНИ НА МАРСЕ ПРОДОЛЖАЮТСЯ

Схожесть условий на ранних стадиях развития Земли и Марса не исключает возможности появления жизни на Красной планете. Где живые организмы могли сохраниться там до наших дней и как их обнаружить?

С. 4

ISSN 0032-874X



9 770032 874009

ПОИСКИ ЖИЗНИ НА МАРСЕ ПРОДОЛЖАЮТСЯ

Наука о жизни на Марсе прошла от наделения Красной планеты развитой цивилизацией в начале XX в. до понимания того, что вопрос этот куда более сложный и требующий продолжительных междисциплинарных исследований. Еще в 60-х годах прошлого столетия считалось возможным наличие на Марсе растительности. В 70-х годах резкий скептицизм привнесли не только снимки безжизненной поверхности Марса, полученные первым орбитальным аппаратом НАСА «Маринер-9», но и результаты исследования грунта двумя посадочными модулями НАСА «Викинг-1 и -2», которые проводили поиск органических молекул и эксперименты по выделению метаболической активности. Впрочем, в их интерпретации до сих пор не существует полного согласия*. Одновременно, начиная с 1970-х годов, в экологической микробиологии совершается прорывное открытие хемоавтотрофных микроорганизмов в районах «черных курильщиков» на дне океана и в глубоких скважинах, которые не зависят от условий на земной поверхнос-

ти, в том числе от наличия света и фотосинтеза. Эти и другие открываемые на Земле экстремофилы вновь начинают подогревать интерес к проблематике жизни на Марсе. Обнаружение значительных запасов воды в грунте на современном Марсе в начале 2000-х годов вместе с выявлением феномена сохранения жизнеспособных микроорганизмов в мерзлоте и антарктическом льде на Земле делают поиски жизни на Красной планете все более интригующими.

Мы предлагаем читателям «Природы» подборку из двух статей, в которых рассказывается о схожести условий на ранних стадиях развития Земли и Марса, что не исключает возможности появления жизни на Красной планете; о том, где живые организмы могли бы сохраниться до наших дней и где их искать; о миссии марсохода НАСА «Настойчивость» в общей стратегии поисков древней и современной жизни. Описывается геология и астробиологические аспекты запланированного района работ марсохода в кратере Езеро, а также говорится, почему подобные миссии по изучению древнейшей истории Марса имеют самое прямое отношение к вопросам ранней истории Земли и появления на ней жизни.

* См., например: *Levin G., Ann Straat P. The case for extant life on Mars and its possible detection by the Viking Labeled Release experiment // Astrobiology. 2016. V.16. №10. P.798–810.*



Старт космического аппарата с марсоходом «Настойчивость» с космодрома на мысе Канаверал (штат Флорида, США).

Фото NASA / Ben Smegelsky

Общая стратегия поисков жизни на Марсе и экспедиция в кратер Езеро

Н.Э.Демидов¹, М.А.Иванов²

¹Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (Санкт-Петербург, Россия)

²Институт геохимии и аналитической химии имени В.И.Вернадского РАН (Москва, Россия)

В статье рассматриваются основные особенности Ноахийского, Гесперийского и Амазонийского периодов в геологической истории Марса с точки зрения их влияния на привнос / зарождение, сохранение и эволюцию живых организмов. В ноахийское время ранний Марс развивался по схожему с ранней Землей сценарию. Подобие древних марсианских и земных условий не исключает принципиальной возможности появления жизни на Марсе. Сравнительно короткий Гесперийский период был отмечен интенсивным вулканизмом, водной и ледниковой активностью, но условия на поверхности вышли за пределы выживаемости, и микроорганизмы должны были или законсервироваться в мерзлых толщах, или переместиться в глубокие водоносные горизонты. В течение Амазонийского периода Марс представлял собой мерзлую и скучную в астробиологическом отношении пустыню с крайне суровыми условиями на поверхности, которая постоянно стерилизуется космической радиацией. В целом неблагоприятные условия для эволюции жизни на Марсе позволяют сделать вывод, что жизнь на Марсе, если и зародилась в ноахийское время, не могла развиваться до существования сложных многоклеточных организмов. Рассмотрены потенциальные экологические ниши современного Марса. Из них наибольшим потенциалом для выживаемости микроорганизмов обладают подземные воды и криопэги, условия в которых не зависят от условий на поверхности планеты. Кратко рассматривается геология древнего кратерного озера Езеро, куда направляется экспедиция НАСА «Марс 2020» с марсоходом «Настойчивость» на борту. Глинистые минералы и карбонаты в озерных отложениях можно считать потенциальным резервуаром, где могли накопиться и сохраниться гипотетические остатки марсианских организмов.

Ключевые слова: Марс, жизнь, астробиология, Езеро, экологические ниши.

Мне представляется... что в ближайшее время наличие планетной, а не только земной жизни, в реальности будет установлено.

В.И.Вернадский. «Размышления натуралиста». 1938 г.

Астрономическое окно 2020 г. ознаменовало новый виток марсианской астробиологической эпопеи. 19 июля на Красную планету отправился космический аппарат Объединенных Арабских Эмиратов «Аль-Амаль» («Надежда»). Впоследствии он станет искусственным спутником Марса, который займется изучением марсианской атмосферы. 23 июля к Марсу направился китайский аппарат «Тяньвэнь» («Вопросы к небу»), состоящий из орбитального и посадочного блоков. Планируется, что 23 апреля 2021 г. последний доставит на поверхность планеты марсоход «Тяньвэнь-1», который будет проводить работы в не названном пока районе равнины Утопия. Главная задача исследований — поиск следов прошлой, а возможно, и существующей жизни на Марсе. 30 июля состоялся старт миссии НАСА «Марс-2020», в рамках которой 18 февра-

ля 2021 г. на поверхность планеты будет доставлен марсоход «Perseverance» («Настойчивость»). Он должен совершить посадку в кратер Езеро (Jezero), где обнажены отложения древней речной дельты, перспективные для поисков следов прошлой жизни.

Астробиологический аспект геологической истории Марса

Поиски жизни на Марсе очевидным образом следует разделить на два направления: поиск в горных породах следов древней жизни и поиск современных форм. Стратегия обоих направлений во многом определяется геологической историей Марса, которая в основных чертах на данный момент уже расшифрована. Это позволяет наложить на нее возможный сценарий эволюции живых существ

и тем самым восстановить основные события в палеонтологической истории планеты. При таком подходе делается допущение, что марсианская жизнь основана на воде и обладает сходными с земными пределами приспособления к условиям окружающей среды. Данное допущение находится, с одной стороны, в явном противоречии с принципом научного агностицизма, так как мы не можем догадываться, какие формы жизни возможны за пределами Земли. С другой стороны, если говорить о Марсе, который на ранних стадиях развивался по сходному с Землей сценарию, обменивался с ней веществом и сохранил запасы воды до наших дней, допущение о сходстве (а может, и о родстве) марсианских и земных форм жизни выглядит вполне реалистичным.

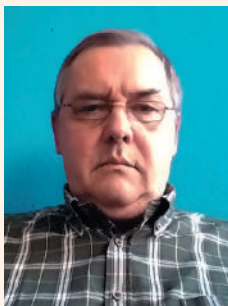
Вся геологическая история Марса делится на периоды, различающиеся по условиям на поверхности, а их временные рамки определяются по плотности наложенных ударных кратеров. На сегодняшний день этот метод — единственно пригодный для оценки возраста поверхности почти всех тел Солнечной системы с твердой поверхностью [1]. Идея его проста: чем древнее поверхность, тем больше на ней кратеров и тем они крупнее. Дальше начинаются сложности. Главная связана с калибровкой измеряемой кратерной плотности в терминах абсолютного возраста. Такая калибровка сделана для лунных образцов, которые отбирались в областях с известной плотностью кратеров и для которых по содержанию радиоактивных изотопов был измерен абсолютный возраст.

Определения возраста на поверхности Марса по плотности кратеров — это экстраполяция лунной калибровки на другое планетное тело (конечно, с учетом марсианских скоростей и частоты ударов). Поэтому понятно, что хронологию Марса мы знаем гораздо хуже лунной. Тем не менее всю «видимую» историю Марса мы делим на три периода (рис.1). Каждый из них имеет свои отличительные особенности.

Наиболее древний — **Ноахийский**, начавшийся с начала формирования планеты и закончившийся примерно 3.6 млрд лет назад. На Марсе, как и на Луне и Земле, в периоды ранней истории доминирующим геологическим процессом было



Никита Эдуардович Демидов, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ). Круг научных интересов охватывает вопросы геологии Арктики и Антарктиды, гидросферы и криосферы Марса, астробиологии.
e-mail: nikdemidov@mail.ru



Михаил Арсеньевич Иванов, доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией сравнительной планетологии Института геохимии и аналитической химии имени В.И.Вернадского РАН. Область научных интересов — геология, планетная геология, космохимия.
e-mail: mikhail_ivanov@brown.edu

ударное кратерообразование. В то время о поверхность Марса ударялись многочисленные тела различного размера и состава. При их столкновении с поверхностью образовывались ударные кратеры разной величины, вплоть до крупнейших бассейнов диаметром во многие сотни километров. Каждое подобное событие заключается в передаче кинетической энергии ударника в механическую и тепловую. Уровень энергий, о которых идет речь, очень высок. Например, на переходе от мелового периода к палеогеновому при образовании сравнительно небольшого (150 км) ударного кратера Чиксулуб (п-ов Юкатан в Мексике) выделилась энергия, в миллион раз превышающая ту, что образовалась при взрыве крупнейшего из известных ядерных зарядов (Царь-бомбы) — 58.6 Мт в тротиловом эквиваленте. Трудно даже представить, какая энергия выделяется при формировании среднего ударного бассейна диаметром 500 км. Очевидно, что в зависимости от размеров падающего на Марс тела ударные события приводили к разномасштабной стерилизации поверхности и грунта.

Но помимо очевидного разрушительного воздействия кратерообразование могло иметь и положительные последствия для зарождения ранней биосферы Марса. Так, некоторые из ударников, например кометы и метеориты из класса углистых хондритов, приносили на поверхность планеты воду и органические вещества. Более того, согласно гипотезе панспермии, таким образом на Марс

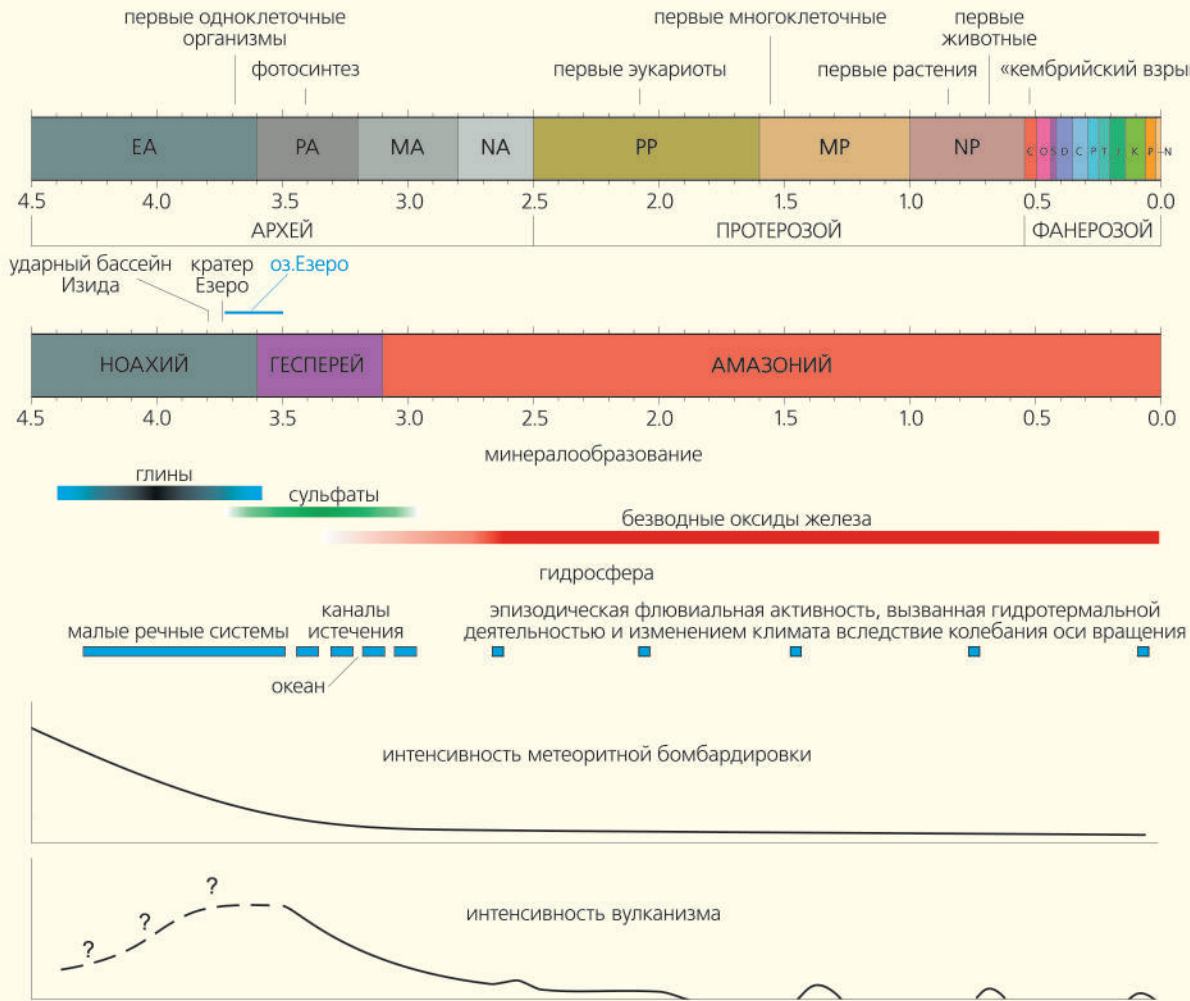


Рис.1. Сопоставление геохронологических шкал и основных событий палеонтологической истории Земли и геологической истории Марса.

могли попасть не только вещества, которые в дальнейшем принимали участие в синтезе живых существ, но и сами микроорганизмы.

Кроме стерилизации и привноса вещества ударные события, особенно крупные, имеют еще два последствия, важных с точки зрения астробиологии. Во-первых, они приводят к временным изменениям климата планеты, так как в результате удара в атмосферу выбрасывается большое количество пыли, которая при достаточном ее количестве начинает затмевать Солнце. Например, в 1883 г. при взрывном вулканическом извержении Кракатау (Индонезия) мощностью 200 Мт в атмосферу было выброшено огромное количество пыли, что привело к понижению среднегодовой температуры на Земле примерно на 0.4°C [2]. Мощность ударного события Чиксулуб была в 250 тыс. раз больше, поэтому запыление атмосферы тогда вызвало резкое

похолодание на Земле и массовое вымирание крупных форм жизни, в частности динозавров [3].

Таким образом, Ноахийский период с его интенсивной метеоритной бомбардировкой характеризуется периодическими глобальными похолоданиями, вызванными эффектом «ядерной зимы» на фоне меньшей светимости Солнца 4–4.5 млрд лет назад. Несмотря на похолодания, усиленное запыление атмосферы могло играть и положительную роль для развития жизни на поверхности планеты, так как происходило снижение интенсивности стерилизующего жесткого космического излучения.

Помимо воздействия на атмосферу любое ударное событие приводит к образованию тепловой аномалии на поверхности, а в случае крупного события — долгоживущей (существующей, возможно, сотни тысяч лет) аномалии из-за «закачки» в кору планеты тепловой энергии удара. В ре-

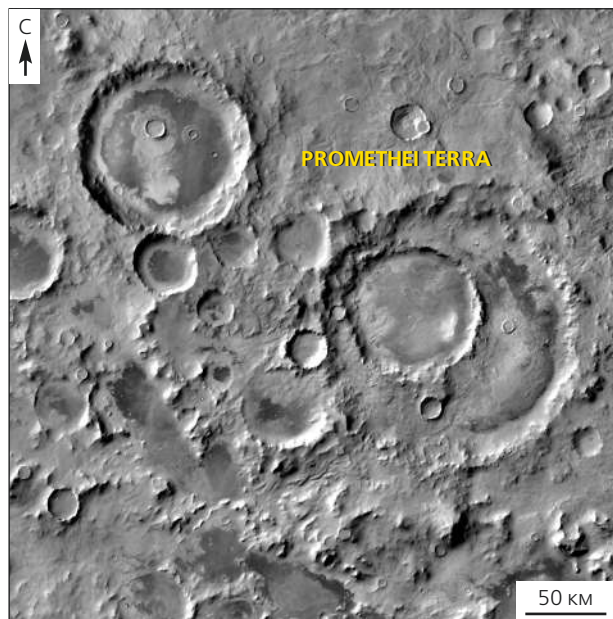


Рис.2. Типичная ноахийская поверхность в области Земли Прометея (Promethei Terra). Главную роль в строении поверхности играют ударные кратеры — следы интенсивной метеоритной бомбардировки. Фрагмент глобальной фотомозаики, полученной тепловым спектрометром THEMIS (Thermal Emission Imaging System). Центр снимка находится на 52.32° ю.ш., 108.19° в.д.

зультате в окрестностях крупных ударных кратеров и особенно бассейнов могли формироваться долгоживущие гидротермальные системы [4], которые даже в периоды оледенений сопровождались появлением водоносных горизонтов под поверхностью и горячих источников на ней.

Вулканизм, несомненно, действовал на древнем Марсе. Однако ударное кратерообразование явно преобладало, и эффект от него, по-видимому, был более весомым (рис.2). Сохранившихся свидетельств проявления вулканической активности в ноахийское время мало. Все они представлены сравнительно небольшими и немногочисленными вулканическими постройками центрального типа.

К концу Ноахийского периода темп метеоритной бомбардировки снизился настолько, что уступил место другим геологическим процессам, например флювиальным (деятельности водных потоков). На южных материках Марса стали проявляться малые русла, которые свидетельствовали о существовании жидкой воды на поверхности, о ее течении и эрозионной деятельности. Системы малых русел Марса (рис.3) напоминают земные речные системы. Следовательно, в ноахийское время на Марсе как минимум периодически действовал круговорот воды, включавший выпадение осадков в виде дождя или снега. Однако системы русел Марса не так сильно разветвлены и встречаются реже, чем на Земле, и, соответственно (если это не эффект плохой сохранности), марсианский круговорот воды был менее интенсивным, чем современный на Земле. Такое различие в морфологии современных речных систем на Земле и речных систем, сохранившихся с ноахийского времени на Марсе, может также свидетельствовать об относительно непродолжительном периоде существования жидкой воды на поверхности Красной планеты или о том, что в процессе последующих 4 млрд лет эволюции поверхность была переработана и часть русел потеря-

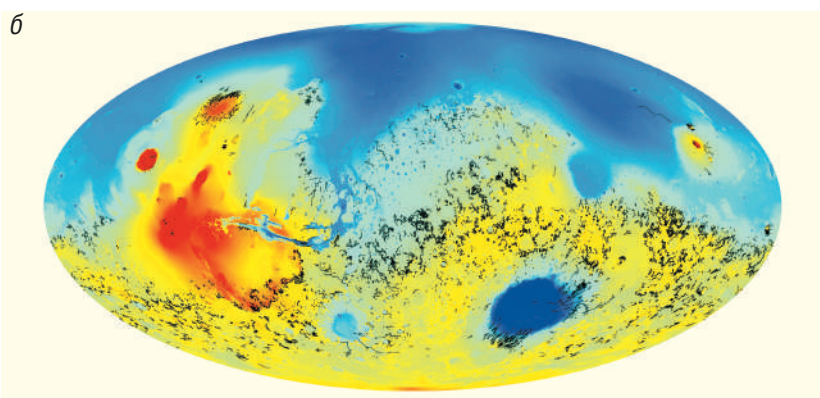
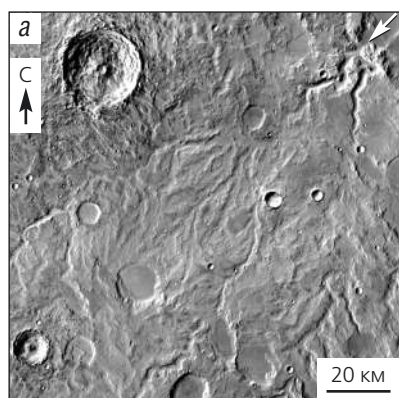


Рис.3. Ноахийская поверхность в области Земли Киммерия (Cimmeria Terra), рассеченная многочисленными узкими и ветвящимися руслами, которые, возможно, сформированы стоком поверхностных вод. Малые русла сливаются в более крупные, они часто впадают в ударные кратеры. Стрелка в верхнем правом углу показывает устье такого русла. Фрагмент глобальной фотомозаики, полученной тепловым спектрометром THEMIS. Центр снимка находится на 9.65° ю.ш., 127.10° в.д. (а). Глобальная карта распространности малых русел на Марсе (тонкие черные линии) на фоне топографической карты. Видно, что практически все они расположены в пределах южных материковых возвышенностей, а на северных низинах русел практически нет. Равноплотная проекция Моллвейде (б).

на. Тем не менее малые русла Марса могли бы служить транспортными системами, способствовавшими латеральному распространению марсианских экосистем, если такие существовали.

Таким образом, в ноахийское время ранний Марс развивался по схожему с ранней Землей сценарию. На обеих планетах доминировал ударный процесс, обе характеризовались наличием круговорота воды и, возможно, плотной бескислородной атмосферой. Обе получали органический материал от столкновения с кометами и астероидами. Сходство ранней Земли и Марса ноахийской эпохи определяется также защитным воздействием магнитного поля и распространением вулканизма. И хотя доказательств зарождения жизни на Марсе в ноахийское время у нас нет, подобие марсианских и земных условий не исключает принципиальной возможности ее появления. Более того, условия на раннем Марсе могли быть более благоприятными. Например, из-за меньшего размера и гравитации соударения с крупными астероидами происходили на Марсе реже и с более низким стерилизующим эффектом [5].

Ноахийский период сменился **Гесперийским**, который продолжался примерно 500 млн лет (от 3.6 до 3.1 млрд лет назад). Главными геологическими процессами этого периода выступали вулканизм, специфическая флювиальная и ледниковая деятельность (рис.4). Важно отметить, что на переходе к Гесперийскому периоду произошла глобальная климатическая перестройка. Практически прекратилось формирование малых русел и глин [6] — возможно, из-за прекращения глобального круговорота воды. Падение температур поверхности ниже 0°C, потеря магнитного поля и беспрепятственное облучение космическими лучами должны были привести к разрушительным для биосферы последствиям. Условия на поверхности вышли за пределы выживаемости, и микроорганизмы должны были или законсервироваться в мерзлых толщах, или «отжаться» в подмерзлотные водоносные горизонты.

Пространственно разобщенные, пригодные для жизни оазисы на поверхности могли сохраняться за счет геотермального подогрева в результате вулканической активности. Вулканизм в гесперийское время проявлялся главным образом при формировании обширных равнин, которые покрывали территории поперечником в многие сотни километров. Но в их пределах не наблюдаются крупные вулканические постройки, а те, что есть, несоизмеримы с размерами окружающих вулканических плато. Формирование лавовых равнин свидетельствует о рассеянном типе вулканизма,

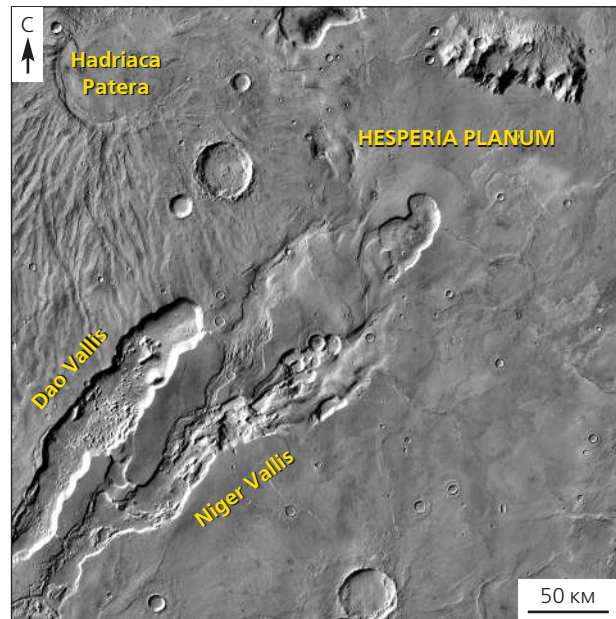


Рис.4. Типичная гесперийская поверхность в области плато Гесперия (Hesperia Planum). Главную роль в строении поверхности играют обширные лавовые равнины, которые затопляют более древние, ноахийские территории (вверху справа). Важным компонентом гесперийской местности в некоторых регионах служат крупные каналы истечения. Здесь это каналы Дао (Dao Vallis) и Нигер (Niger Vallis). В верхнем левом углу снимка виден вулкан Патера Адриатика (Hadriaca Patera). Фрагмент глобальной фотомозаики, полученной тепловым спектрометром THEMIS. Центр снимка находится на 32.56°ю.ш., 95.05°в.д.

связанного с внедрением во вмещающие породы дайковых комплексов. Дайки — магматические тела, напоминающие стены. У них сравнительно небольшая толщина (от нескольких до десятков метров), высота может составлять сотни метров, а длина — достигать нескольких тысяч километров. Дайки, как длинные нити, связывают удаленные регионы, а после внедрения создают вокруг себя области протаивания мерзлых пород. Однако малая толщина даек приводит к тому, что они сравнительно быстро остывают, а прогретые водоносные области вокруг исчезают. Другое дело — магматические камеры крупных марсианских вулканов, которые, возможно, начали формироваться еще в ноахийское время и продолжили свое развитие в Гесперийский период. Эти крупные тепловые очаги, вероятно, существовали на протяжении многих миллионов лет и поддерживали благоприятные условия для развития живых микроорганизмов.

Гесперийский период характеризовался мощной флювиальной активностью. Наиболее впечатляю-

щие структуры, образованные текущей водой (так называемые каналы истечения), — это гигантские каньоны длиной в многие сотни километров, шириной в несколько сотен километров и глубиной 1–2 км. Их образование некоторые исследователи объясняют промерзанием коры Марса, которое привело к росту криогенного давления и в какой-то момент — к катастрофической разгрузке подмерзлотных водоносных горизонтов на экваторе, где мощность мерзлоты наименьшая [7, 8]. Крупнейшая система каналов истечения расположена в северном полушарии вокруг равнины Хриса, на границе южных материков и северных равнин. Быстрый сброс воды через эту систему в северные равнины, возможно, привел к формированию там крупного водо-грязевого резервуара, который обычно называют северным океаном Марса [7, 9, 10].

Источниками воды северного океана служили рассеянные водоносные горизонты под поверхностью, т.е. области, потенциально пригодные для существования микроорганизмов. Сам же океан (если условия на гесперийском Марсе напоминали современные) в качестве резервуара жидкой воды существовал недолго. Модели ограничивают время жизни крупных водных скоплений на Марсе несколькими десятками тысяч лет [11]. Таким образом, несмотря на значительный объем воды (многие миллионы кубических километров) время существования океана в масштабах марсианской истории ничтожно. Следовательно, нет оснований полагать, что микроорганизмы, попавшие в океан из питающих каналы подземных горизонтов, имели шанс эволюционировать до более сложных многоклеточных форм, таких как растения и животные. Скорее, после испарения и сублимации воды в атмосферу океан послужил «братской могилой» для этих гипотетических микроорганизмов. С прекращением эндогенной активности в вулканических оазисах, очевидно, прервалась и возможность биологической активности, а ее потенциальные продуценты также погибли или законсервировались в мерзлоте.

Последний период в геологической истории Марса — **Амазонийский**. Он начался с конца гесперийского времени и продолжается до сегодняшнего дня, т.е. примерно 3 млрд лет, или 67% всей истории Марса (рис.5). В Амазонийский период количество и время существования оазисов жизни на и близ поверхности постепенно уменьшается вслед за ослаблением эндогенной активности. К редким оазисам, существовавшим в тот период, можно отнести, например, северный склон патеры Альба, где обнаружены флювиальные формы, крупнейшие вулканы областей Фарсида и Элизий и площадные

излияния лав, которые сформировали равнину Церберус [12]. Флювиальные образования на вулканах Олимп и Геката, связанные с гидротермальной деятельностью, датируются последними несколькими миллионами лет [13]. Вероятно, что некоторые вулканы Марса сохраняют свою активность и сегодня, а под замерзшей поверхностью продолжают существовать (по крайней мере локально) подмерзлотные водоносные горизонты, где могли бы обитать организмы-хемолитотрофы.

На протяжении 3 млрд лет Амазонийского периода климатические условия на поверхности периодически менялись, что было связано с вариациями наклона оси вращения Марса. В современном положении ее угол наклона составляет около 25° (примерно как и на Земле). Из-за этого полярные районы получают меньше тепла и на планете происходит смена сезонов года. Однако отсутствие у Марса такого крупного спутника, как земная Луна, приводит к нестабильности наклона оси. Числовые модели предсказывают, что наклон оси может достигать 82°, и тогда Марс словно «ложится на бок» [14]. В таком лежачем положении Солнце преимущественно греет только один из полюсов, а экваториальная зона, освещенная низким Солнцем, становится холодной. Происходит массовое перераспределение воды: она уходит в атмосферу из освещен-

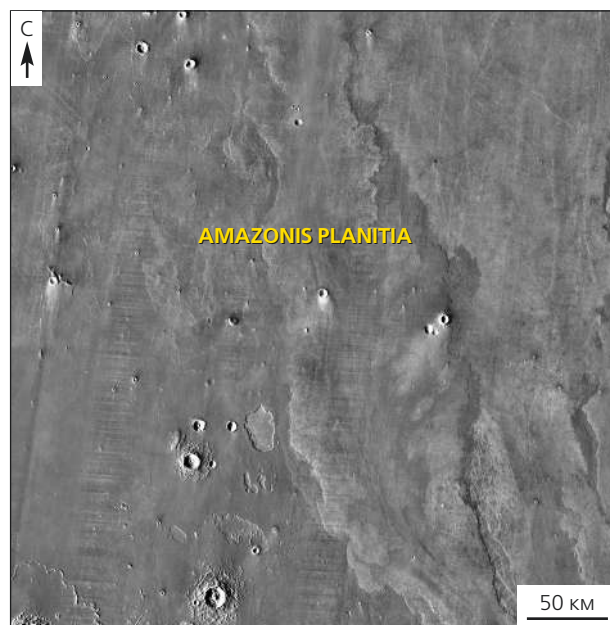


Рис.5. Типичная амазонийская поверхность в области равнины Амазония (Amazonis Planitia). Главную роль в строении поверхности играют протяженные лавовые потоки, в слабой степени затронутые ударными кратерами. Фрагмент глобальной фотомозаики, полученной тепловым спектрометром THEMIS. Центр снимка находится на 17.19°с.ш., 156.59°з.д.

ного полюса и осаждается в виде льда в затененных областях. Такой перенос выразился в покровном оледенении южного полушария (ледниковые формы отмечены вплоть до 45° ю.ш.) и в горном оледенении экваториальной зоны, в частности вулканов области Фарсида [15]. По данным георадарных исследований, остаточные горно-долинные ледники на средних широтах южного полушария известны и на современном Марсе [16]. В остальном планета в течение Амазонийского периода представляла (и представляет) собой мерзлую и скучную в астробиологическом отношении пустыню с крайне суровыми условиями на поверхности и очень разреженной атмосферой. Последняя вместе с отсутствующим магнитным полем не препятствует стерилизующему действию космической радиации.

Подводя итог рассмотрению геологической истории Марса, следует сделать два важных в астробиологическом контексте вывода. Некоторое сходство условий на ранних Земле и Марсе дает потенциальную возможность зарождения жизни на Красной планете. Доказанное же наличие запасов воды на современном Марсе вместе с геологическими свидетельствами весьма недавней вулканической активности говорит о том, что жизнь вполне могла сохраниться в недрах планеты под мерзлотой, где условия не так уж сильно отличаются от условий в недрах Земли.

Итак, вывод первый: если жизнь, подобная земной, когда-то зародилась или была привнесена на Марс Ноахийского периода, то она, скорее всего, не могла не сохраниться в недрах планеты до наших дней. Второй вывод касается того, до каких форм марсианские организмы имели возможность эволюционировать. Если исходить из того, что наиболее древняя жизнь на Земле датируется примерно 3.7 млрд лет, получается, что ее зарождение произошло достаточно быстро и заняло не более

700 млн лет [17]. Примитивная жизнь смогла эволюционировать до первых ядерных организмов (эукариот) примерно за 2 млрд лет, и еще 1 млрд потребовался для появления первых многоклеточных организмов. Если учесть, что глобальная природная перестройка на Марсе произошла на рубеже Ноахийского и Гесперийского периодов, после чего длительное сохранение организмов оказалось возможным лишь в эконишах под поверхностью, можно сделать вывод, что жизнь на Марсе не могла развиваться до сколько-нибудь совершенных форм. В порах и трещинах под поверхностью слишком мало пространства и слишком стабильные условия для эволюционного процесса. А значит, речь может идти лишь о поисках самых примитивных одноклеточных микроорганизмов, остатки которых в породах обнаружить крайне сложно, если вообще возможно.

Экониши современного Марса

Поверхность современного Марса — холодная и сухая пустыня. В условиях разреженной атмосферы и отсутствия магнитного поля она свободно стерилизуется радиационным воздействием космических лучей и непригодна для жизни. Однако на средних и высоких широтах уже с глубины нескольких десятков сантиметров залегает льдосодержащая мерзлота [18], в которой сосредоточены значительные запасы воды. Последуем девизу марсианской исследовательской программы НАСА “Follow the Water” («Следуй за водой») и рассмотрим, какие потенциальные экониши скрываются под поверхностью планеты.

Северная и южная постоянные полярные шапки состоят из льда воды. Они имеют диаметр 300–800 км при толщине 3–4 км (рис.6). Возраст северной шапки по плотности ударных кратеров

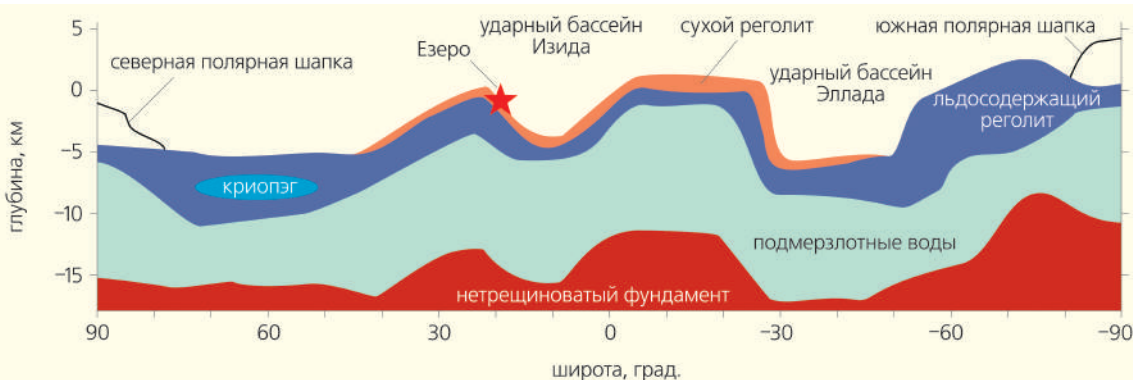


Рис.6. Разрез Марса от северного к южному полюсу через кратер Езеро, демонстрирующий мерзлотно-гидрогеологическое строение и расположение современных экониш.

оценивается менее чем в 100 тыс. лет, южной — в 7–17 млн лет [19]. Среднегодовая температура поверхности равна -115°C . Наиболее близким земным аналогом служит антарктический ледник в районе станции «Восток», где среднегодовая температура поверхности составляет -56°C , минимальная температура воздуха достигает -89.2°C , а возраст льда на подошве оценивается примерно в 1 млн лет [20]. Лед здесь содержит жизнеспособные микроорганизмы в количестве от 10 до 100 клеток/мл, которые попали сюда в основном воздушным путем [21]. К факторам, благоприятствующим сохранению жизнеспособности клеток во льдах, следует отнести фоновую радиацию, уровень которой в них в несколько раз меньше, чем в мерзлых породах. Несмотря на это, наличие жизни в марсианских ледниках маловероятно, так как они сформировались из стерильного конденсата в поздне-амазонийскую эпоху, когда жизнь на поверхности отсутствовала. Что касается подледниковых водоемов, подобных озеру Восток в Антарктиде, то, судя по модельным оценкам температуры в основании полярных шапок Марса, добиться плавления льда там можно только в случае его большой солености и низкой теплопроводности [22]. Это делает сомнительной саму возможность существования подобных водоемов на Марсе.

Сухой реголит мощностью от нескольких сантиметров на периферии постоянных полярных шапок до сотен метров на экваторе покрыва-

ет практически всю поверхность Марса. Земным аналогом такого реголита служит сухой слой, перекрывающий льдонасыщенную мерзлоту в антарктических оазисах. В нем жизнь локализована в специфических местообитаниях внутри камней. Сообщества цианобактерий, зеленых водорослей и лишайников — так называемые криптоэндолиты — формируют здесь живые пленки в трещинах, в нескольких миллиметрах от поверхности (рис.7). В них, с одной стороны, ослабевает воздействие УФ-излучения, а с другой, некоторые минералы (например, кварц) пропускают достаточно света для фотосинтеза. Кроме того, это более теплая и влажная экониша, так как камни сильно нагреваются в солнечные дни. Если в Антарктиде у организмов есть шанс приспособиться к условиям окружающей среды благодаря хоть и кратковременному, но появлению тепла и воды, то на Марсе наличие какой-нибудь жизни в сухом реголите, по-видимому, исключено из-за дефицита жидкой воды.

Подземные воды залегают под мерзлыми породами и, вероятно, характеризуются высокой соленостью и бескислородными условиями. Их земной аналог — глубинная биосфера, которая населена хемолитотрофами — микроорганизмами, использующими для получения энергии окислительно-восстановительные реакции с минералами горных пород. Это единственная экониша, где жизнь могла сохраняться на протяжении всей истории Марса, вне зависимости от изменений условий на поверхности. Однако большая глубина залегания делает пока подземные воды недоступными для исследования.

Криопэги — рассолы с отрицательной температурой — можно ожидать на Марсе как внутри мерзлоты, так и под ней. В качестве их земных аналогов рассматриваются арктические внутримерзлотные криопэги, в которых жизнеспособные галотолерантные психрофильные (т.е. нормально существующие и размножающиеся при высокой солености и низкой температуре) бактерии сохраняются с момента формирования изолированной линзы рассола около 100 тыс. лет назад [23]. Криопэги на Марсе также до сих пор недоступны для изучения, так как даже предель-



Рис.7. Криптоэндолитная система — современная жизнь внутри камня в оазисе Холмы Ларсеманн, Восточная Антарктида.

Фото А.В.Долгих

но концентрированный рассол с температурой замерзания -60°C может стабильно существовать там только на значительной глубине.

Льдосодержащий реголит. В полярных районах и на средних широтах Марса его верхняя граница находится на глубине менее 1 м, а нижняя может достигать глубин 4–6.5 км. В экваториальной зоне распространение льдосодержащего реголита возможно на глубинах от нескольких сотен метров до 2.5–3 км. На кровле мерзлых пород температура не превышает -75°C , с глубиной она возрастает. В качестве земных аналогов можно рассматривать антарктические мерзлые породы, которые содержат жизнеспособные клетки в количестве 10^{5-6} клеток/на 1 г сухой навески [24]. В Антарктиде мерзлые породы, из которых были выделены микроорганизмы, характеризуются среднегодовой температурой до -27°C и возрастом >5 млн лет [24, 25].

Краткий обзор экологических ниш Марса показывает: если под мерзлотой существуют водоносные горизонты, то они представляют собой эконишу, где вероятность существования жизни наиболее высока, что объясняется наличием воды в жидкой фазе, тепла и газов. По сути, данная экосистема ничем не отличается от так называемой глубинной биосферы Земли. Наличие подповерхностных горизонтов с жидкой водой на Марсе, несмотря на значительное количество косвенных признаков, по сей день остается не общепризнанным фактом. Сейчас разрабатываются методы электромагнитного зондирования, которые позволят определить наличие или отсутствие жидкой воды под мерзлой оболочкой. Пока же значительная глубина залегания таких горизонтов делает их недоступными для прямых исследований. Тем не менее эта экониша играет ключевую роль в стратегии поисков жизни. Только в подмерзлотных водах на протяжении всей истории Марса, вне зависимости от радикально менявшихся условий на поверхности, поддерживались условия для существования жизни. Наиболее понятная стратегия ее поиска — исследование районов, где геологическая активность в последние миллионы лет могла бы выносить микроорганизмы из недр на поверхность с последующей криоконсервацией [26].

В качестве объектов исследований можно предложить приповерхностные отложения, генетически связанные с происходящими в последние несколько десятков миллионов лет вулканизмом и гидротермальной деятельностью. Это могут быть флювиальные и вулканические эффузивные отложения, прослой вулканического пепла в полярных шапках или, например, поступившая снизу и замерзшая близ поверхности вода в форме ле-

дяного интрузивного тела — гидролакколита. Объекты должны быть локализованы на высоких широтах, где наличие мерзлоты и льда могло бы позволить марсианским микроорганизмам криоконсервироваться и сохраниться с момента попадания на поверхность до наших дней.

Экспедиция в кратер Езеро

Ударный кратер Езеро, выбранный в качестве района работы марсохода «Настойчивость», располагается на 18° с.ш. и 77° в.д. на склоне бассейна Изиды — одного из крупнейших (диаметром около 1500 км) ударных бассейнов Марса. После образования бассейна на его валу сформировались зоны грабенов, которые в западной части носят название Нильских борозд, и крупная вулканическая равнина Большой Сырт. Эти масштабные геологические события происходили примерно 3.9–3.7 млрд лет назад [27, 28]. Далее кратерообразование продолжалось, и на западном внутреннем склоне вала среди прочих импактных структур образовался кратер Езеро поперечником около 45 км. Он отличается от всех других тем, что на западе имеет два впадающих в него русла и дельтовые отложения у их устьев [29, 30], а также одно выводное русло на востоке (рис.8). Предполагается, что кратер Езеро на переходе от Ноахийского к Гесперийскому периоду представлял собой проточное озеро [28]. Лучше сохранена дельта западного русла, которая и будет главным объектом исследования марсохода. В дельте орбитальными спектрометрами были обнаружены глины и карбонаты — породы и минералы, образующиеся в присутствии воды. Их изучение имеет главный приоритет для исследований. Помимо собственно дельты запланированный маршрут проложат вверх по борту кратера, где марсоход вначале сможет изучить береговую линию бывшего озера (здесь выявлены спектры карбонатных отложений), а еще выше по склону предполагается наличие гидротерм, существование которых могло быть связано с остаточным теплом от ударного события. Гидрологическая активность в Езеро происходила примерно 3.8–3.5 млрд лет назад. Таким образом, район Изиды и кратер Езеро служат своеобразным окном на Марс ноахийского и начала гесперийского времени, в которое и должен заглянуть марсоход.

Один из ключевых вопросов, определяющий астробиологический потенциал глин и карбонатов дельты Езеро: сформировались ли они непосредственно в озере (*in situ*) или это материал, образованный ранее в пределах водосборного бассейна

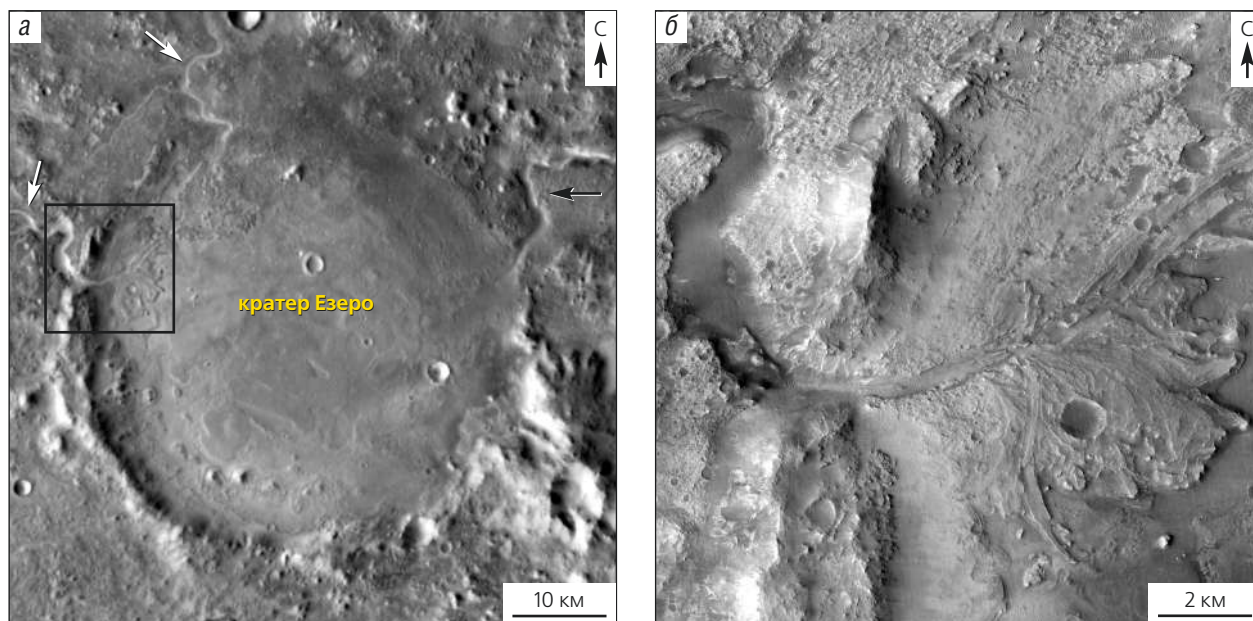


Рис.8. Общий вид кратера Езеро. Белые стрелки отмечают входные русла, а черная — выходное. Черная рамка показывает положение изображения на соседнем рисунке. Фрагмент глобальной фотомозаики, полученной тепловым спектрометром THEMIS. Центр снимка находится на 18.44°с.ш., 77.69°в.д. (а). Западная дельта в кратере Езеро, которая сформировалась при отложении осадков из потока воды, впадавшей в кратере через западное русло. Фрагмент глобальной фотомозаики, полученной контекстной фотокамерой (CTX). Центр снимка находится на 18.52°с.ш., 77.34°в.д. (б).

и переотложенный в озеро русловым потоком? Для того чтобы облегчить интерпретацию данных, которые получит марсоход при изучении дельты, рассмотрим на всем протяжении само родительское русло. Это позволит охарактеризовать области сноса обломочного материала и режимы его переноса и отложения.

Западное русло начинается примерно в 200 км к западу от кратера и примерно в 70 км от него пересекает сравнительно узкую (10–15 км) зону грабенов Нильских борозд. По обеим их сторонам морфология русла выглядит по-разному, что свидетельствует о неодинаковых режимах формирования русла. К востоку от Нильских борозд, в сторону кратера Езеро, оно представляет собой узкий (0.5–1 км) извилистый канал, образующий меандры глубиной в несколько десятков метров. Иногда он разветвляется, и некоторые его ветви в дальнейшем сливаются, а другие отмирают. Борта канала ровные, не имеющие заметных вариаций высоты. Притоков в восточной части у него нет (рис.9).

К западу от борозд русло значительно шире (2–6 км), а его глубина изменяется от десятков до сотен метров. Само русло, хотя и извилистое, не меандрирует. Борта его западной части неровные, зубчатые, иногда в виде высоких уступов. В некоторых местах русло расширяется, и в рас-

ширениях встречаются одиночные крупные острова или группы мелких. Наиболее значимое отличие западной части от восточной заключается в присутствии там многочисленных притоков. Они встречаются по обеим сторонам русла и представляют собой относительно короткие (от нескольких километров до 10–15 км), широкие (несколько километров) и неглубокие (несколько десятков метров) долины с корытообразным поперечным профилем. Ни разу не отмечались в качестве притоков центрального русла глубоко врезаемые долины клиновидной формы. Притоки иногда начинаются в циркоподобных депрессиях древних ударных кратеров окружающих возвышенностей, но чаще они не имеют выраженной области зарождения, а их плоское днище постепенно понижается в направлении центрального русла.

Топографическая конфигурация местности, на которой расположены западная и восточная части западного русла также существенно различается. Для восточной части региональный топографический фон — это в целом плоскость, слабо наклоненная на восток и юг. Хотя уклон к югу вполне заметен, он не оказывает влияния на общую ориентацию восточной части русла, извилистость которого зависит от местных вариаций рельефа.

Вся западная часть русла (≈130 км) расположена в тальвеге регионального трога, ширина которого

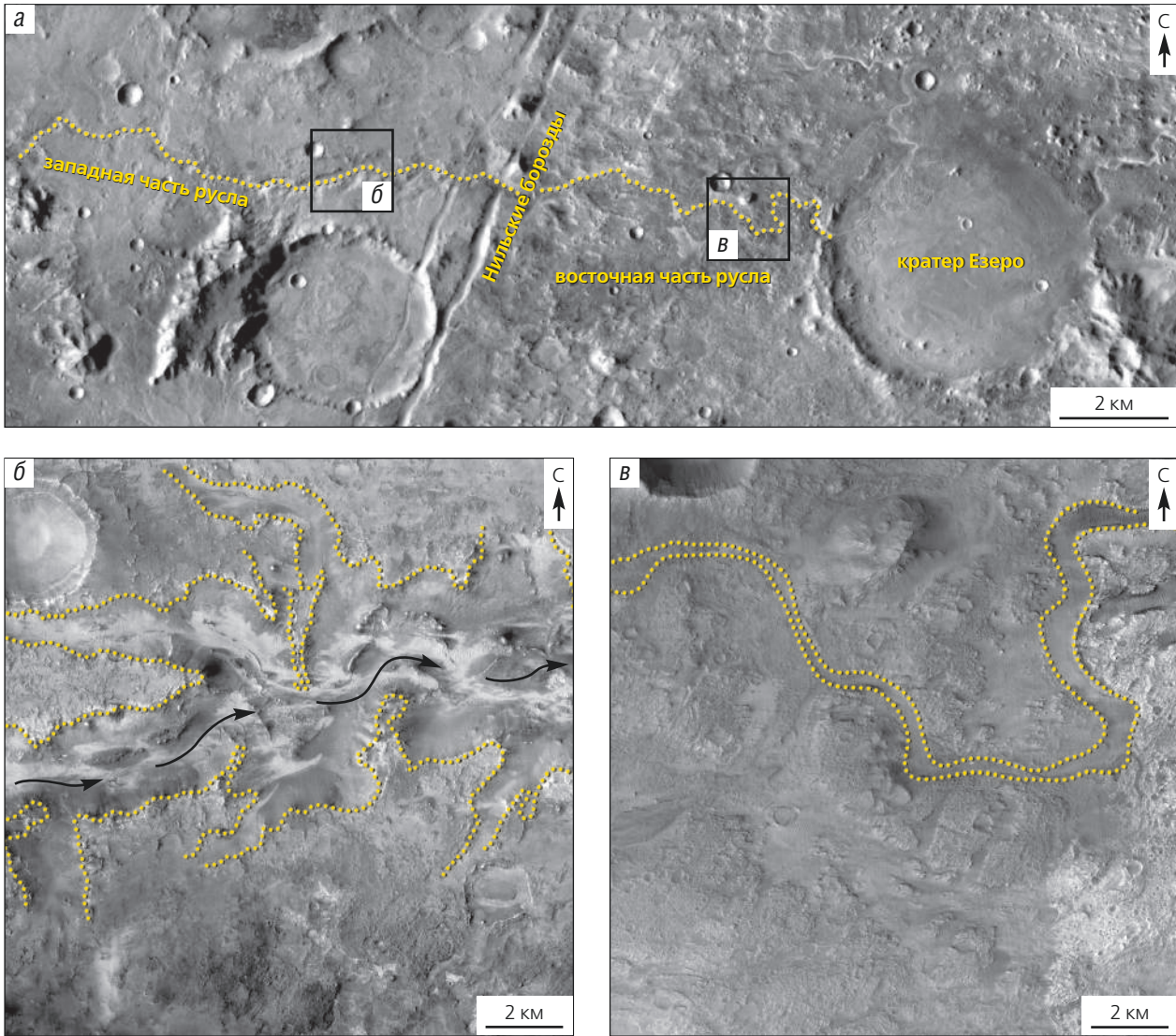


Рис.9. Общий вид местности, по которой протягивается западное входящее русло кратера Езеро (желтая пунктирная линия). Все русло делится тектонической зоной Нильских борозд на западный и восточный сегменты. Черными рамками показано положение снимков (б) и (в). Фрагмент глобальной фотомозаики, полученной тепловым спектрометром THEMIS. Центр снимка находится на 18.57° с.ш., 76.45° в.д. (а). Участок западной части русла (края отмечены пунктирной линией). Эта часть русла широкая, извилистая, но не меандрирующая, с многочисленными короткими и длинными притоками. Извилистые черные стрелки расположены вдоль тальвега главного русла. Центр снимка находится на 18.67° с.ш., 76.81° в.д. (б). Участок восточной части русла (края отмечены пунктирной линией). Эта часть русла узкая, извилистая, с меандрами. Центр снимка находится на 18.51° с.ш., 77.04° в.д. (в). Оба снимка (б) и (в) — фрагменты глобальной фотомозаики, полученной фотокамерой CTX.

в верхней части составляет примерно 60 км, а глубина — 100–200 м. В нижней части, возле Нильских борозд, ширина 20–30 км, глубина около 500 м. Притоки западной части русла распространяются вниз по склонам бортов трога.

Явно выраженные отличия морфологии и топографии западной и восточной частей русла отражают различия в условиях его формирования. Нижняя, восточная, часть, вероятно, представляет собой истинный флювиальный канал, который

прорезан текущей водой. Верхняя, западная, скорее всего, имеет ледниковое происхождение. Она расположена топографически выше и формировалась раньше — за счет движения ледниковых масс, накопившихся в ноахийское–гесперийское время на возвышенных частях вала бассейна Изида. Ледники сдирали материал с поверхности вала, перемещали его вниз по склонам регионального трога в сторону центрального русла и в конечном счете переносили к структурной зоне Нильских борозд.

Грабены здесь, вероятно, служили ловушками для ледников и принесенного ими материала.

Само существование восточной части русла свидетельствует о том, что борта ловушек прорывались в одном или нескольких местах накопившимся льдом или тальми водами. Морфология этой части свидетельствует в пользу модели формирования за счет прорыва тальных вод, что согласуется с региональной топографией. Восточная часть русла практически всегда следует направлению наибольшего местного топографического градиента, что неизбежно для истечения жидкой воды из единичного точечного источника. Таким образом, восточная, флювиальная, часть русла, которая дренировала Нильские грабены, служила основным поставщиком материала для формирования дельты. Здесь нет притоков, а значит, можно конкретизировать, что материал дельты поступал при выработке самого руслового канала. Эта часть русла прорезает отложения, в которых орбитальными спектрометрами обнаружены карбонаты и особенно много глин. Отсюда напрашивается вывод, что глинистые и карбонатные минералы в дельте — продукт переотложения пород, размытых водным потоком при формировании восточной части русла. Такой вывод согласуется с общими представлениями о формировании дельт при вхождении водных потоков в стоячие водоемы, где частицы переносимого потоками вещества теряют свою кинетическую энергию и осаждаются на дне.

Глины и карбонаты в дельте — свидетели более ранней гидрологической активности, предшествующей образованию озера, и по ним судить о химических условиях в озере нельзя. Изучение дельты позволит лишь выявить физические параметры осадконакопления (скорость потока, темп осадконакопления, глубину озера и др.). Может ли марсоход найти какую-либо органику в дельте Езеро? На Земле глинистые отложения благодаря слоистой структуре и большой удельной поверхности зачастую содержат высокие концентрации рассеянного органического вещества, а из-за своей низкой проницаемости хорошо сохраняют и различные глазу макроскопические остатки организмов. Следовательно, глинистые компоненты дельты можно считать потенциальным резервуаром, где могли накопиться и сохраниться гипотетические остатки марсианских организмов. Вопрос заключается в следующем: смогут ли исследователи их распознать?

В этом отношении можно лишь утверждать, что, в отличие от большей части поверхности Марса, где органика быстро бы окислялась и разлагалась

фотохимическим путем, в дельте Езеро, которая, по некоторым оценкам, сформировалась всего за 90–550 лет [31], глины отлагались достаточно быстро, чтобы перекрыть, захватить и сохранить до наших дней следы организмов, если они населяли Езеро. Большой интерес представляет также разрез осадков, которые сформировались в более спокойных гидродинамических условиях и более полно отражают палеоклиматическую картину Марса в период существования озера. Они могут залегать стратиграфически ниже наносов дельты, но в ее пределах скрыты от исследований конусом выноса. В остальной же части кратера такие осадки перекрываются слоем ветровых наносов, пеплов и 10-метровым слоем лав, заполнивших Езеро примерно 3.45 млрд лет назад.

Сведения о химическом составе озерной воды марсоход сможет получить при изучении зоны карбонатных полос, вытянутых вдоль стенки кратера западнее дельты. Считается, что эти породы маркируют максимальный уровень стояния воды в Езеро, и, в отличие от привнесенных дельтовых осадков, они формировались путем хемогенного осаждения на мелководье. Хемогенное образование карбонатов в прибрежной зоне озер и морей — распространенное явление на Земле. При этом земные прибрежные пресноводные и морские карбонаты зачастую насыщены текстурными и морфологическими признаками жизнедеятельности простейших микроорганизмов: цианобактериальными матами, строматолитами, биогермами и конкрециями микробиальной природы (рис.10). Важно отметить, что эти палеонтологические свидетельства обнаруживаются на Земле,



Рис.10. Ископаемые остатки древнейшей жизни на Земле — строматолиты в архейских породах Анабарского щита в среднем течении р.Котуйкан.

Фото В.И.Горшкова

в том числе в древнейших докембрийских отложениях, которые датируются примерно 3.7 млрд лет [17], т.е. возрастом, сходным с временем существования озера в кратере Езеро.

* * *

В заключение еще раз перечислим фундаментальные вопросы, решению которых может поспособствовать изучение кратера Езеро. Во-первых, это причины и области действия химического выветривания на раннем Марсе. Сформировались ли глины Марса при преобразовании базальтов на поверхности в теплой и влажной атмосфере (как почвы на Земле) или они образовались гидротермальным путем глубоко под поверхностью? Изучение карбонатов в Езеро перекликается с решением так называемого карбонатного парадокса. Если Марс имел плотную и влажную атмосферу с углекислым газом, это должно было привести к обильному формированию карбонатов, но их обнаружено сравнительно мало, что плохо сочетается с моделью теплого и влажного Марса.

Во-вторых, тщательное изучение материала дельты позволит пролить свет на динамику ее формирования и, следовательно, на гидрологическую историю родительского русла. Такие данные чрезвычайно важны, чтобы оценить правдоподобие моделей формирования малых русел на Марсе, а значит, и его климат в далеком прошлом.

И наконец, самые интригующие вопросы связаны с прямыми поисками потенциальных обитателей озера. Содержат ли глины захороненную органику и есть ли в карбонатах текстурно-морфологические признаки жизни?

Как видим, изучение ранних этапов геологической истории Марса и поиск свидетельств ранней жизни — одна из важнейших и интереснейших задач науки о Марсе, которая во многом перекликается с изучением ранних этапов эволюции Земли и зарождением на ней биосферы. Но, говоря об астробиологии, уместно напомнить, что в 2020 г. исполнилось 50 лет с момента, когда была завершена миссия аппаратов «Викинг» — до сих пор единственных станций, оснащенных астробиологическими приборами. Не пора ли помимо палеонтологических исследований в экваториальной зоне задуматься и над проведением астробиологической экспедиции на более высокие широты для поиска современных форм жизни? В случае же успеха необходимо будет провести генетические и молекулярно-биологические ее исследования для обнаружения сходств и различий с жизнью земной. При подготовке подобной экспедиции будет полезен имеющийся в нашей стране опыт по реализации успешных проектов изучения мерзлоты Марса нейтронными спектрометрами и опыт исследования микробных сообществ древнейшей мерзлоты и подледникового озера Восток в Антарктиде. ■

Литература / References

1. *Neukum G., Wise D.U.* Mars: A standard crater curve and possible new time scale. *Science*. 1976; 194: 1381–1387.
2. *Bradley R.S.* The explosive volcanic eruption signal in Northern hemisphere continental temperature records. *Climatic Change*. 1988; 12: 221–243.
3. *Schulte P., Alegret L., Arenillas I. et al.* The Chicxulub Asteroid Impact and Mass Extinction at the Cretaceous-Paleogene Boundary. *Science*. 2010; 327: 1214–1218.
4. *Newsom H.E., Hagerty J.J., Goff F.* Mixed hydrothermal fluids and the origin of the Martian soil. *Journ. Geophys. Res.* 1999; 104(E4): 8717–8728.
5. *Sleep N.H., Zahnle K.* Refugia from asteroid impacts on early Mars and the early Earth. *Journ. Geophys. Res.* 1998; 103: 28529–28544.
6. *Bibring J.P., Langevin Y., Gendrin A.B. et al.* Mars surface diversity as revealed by the OMEGA/Mars Express observations. *Science*. 2005; 307: 1576–1581.
7. *Clifford S.M., Parker T.J.* The evolution of the Martian hydrosphere: Implications for the fate of primordial ocean and the current state of the northern plains. *Icarus*. 2001; 154: 40–79.
8. *Andrews-Hanna J.C., Phillips R.J.* Hydrological modeling of outflow channels and chaos regions on Mars. *Journ. Geophys. Res.* 2007; 112: E08001. DOI:10.1029/2006JE002881.
9. *Parker T.J., Saunders R.S., Schneeberger D.M.* Transitional morphology in West Deuteronilus Mensae, Mars: Implication for modification of the Lowland/Upland boundary. *Icarus*. 1989; 82: 111–145.
10. *Carr M.H., Head J.W.* Mars: Formation and fate of a frozen Hesperian ocean. *Icarus*. 2019; 319: 433–443.
11. *Kreslavsky M.A., Head J.W.* Fate of outflow channel effluents in the northern lowlands of Mars: The Vastitas Borealis Formation as a sublimation residue from frozen ponded bodies of water. *Journ. Geophys. Res.* 2002; 107(NE12): 5121. DOI:10.1029/2001JE001831.
12. *Berman D.C., Hartmann W.K.* Recent fluvial, volcanic and tectonic activity on the Cerberus plains of Mars. *Icarus*; 2002; 159(1): 1–17.
13. *Neukum G., Jaumann R., Hoffmann H. et al.* Recent and episodic volcanic and glacial activity on Mars revealed by the High Resolution Stereo Camera. *Nature*. 2004; 432(7020): 971–979.

14. *Laskar J.A., Correia C.M., Gastineau M. et al.* Long term evolution and chaotic diffusion of the insolation quantities of Mars. *Icarus*. 2004; 170: 343–364.
15. *Head J.W., Marchant D.R.* Cold-based mountain glaciers on Mars: Western Arsia Mons. *Geology*. 2003; 31: 641–645.
16. *Berman D., Chuang F., Smith I., Crown D.* Ice-rich landforms of the southern mid-latitudes of Mars: A case study in Nereidum Montes. *Icarus*. 2021; 355: 114–170.
17. *Nutman A.P., Bennett V.C., Friend C.R.L. et al.* Rapid emergence of life shown by discovery of 3,700 million year old microbial structures. *Nature*. 2016; 537: 535–537.
18. Демидов Н.Э., Бойнтон У.В., Гиличинский Д.А. и др. Закономерности распределения воды в мерзлотных районах Марса по результатам совместного анализа данных прибора ХЕНД (Марс Одиссей) и МОЛА (Марс Глобал Сервейор). Письма в Астрон. журн. 2008; 34(10): 1–13. [Demidov N.E., Gilichinsky D.A., Boynton W.V. et al. Water distribution in martian permafrost regions from joint analysis of HEND (Mars Odyssey) and MOLA (Mars Global Surveyor) data. *Astronomy Letters*. 2008; 34(10): 713–723.]
19. *Herkenhoff K.E., Plaut J.J.* Surface ages and resurfacing rates of the polar deposits on Mars. *Icarus*. 2000; 144: 243–253.
20. Демидов Н.Э., Лукин В.В. Антарктида как полигон для отработки пилотируемых экспедиций на Луну и Марс. *Астрономический вестник*. 2017; 51(2): 117–135. [Demidov N.E., Lukin V.V. Antarctica as a Testing Ground for Manned Missions to the Moon and Mars. *Solar System Research*. 2017; 51(2): 104–120.]
21. *Abyzov S.S.* Microorganisms in the Antarctic Ice. *Antarctic Microbiology*. Friedmann E.I. (ed). New York, 1993.
22. *Larsen J., Jensen D.* Interior temperatures of the northern polar cap on Mars. *Icarus*. 2000; 144: 456–462.
23. *Gilichinsky D., Rivkina E., Bakermans C. et al.* Biodiversity of Cryopegs in Permafrost. *FEMS Microbiology Ecology*. 2005; 53(1): 117–128.
24. *Gilichinsky D., Wilson G., Friedmann E. et al.* Microbial populations in Antarctic permafrost: biodiversity, state, age, and implication for astrobiology. *Astrobiology*. 2007; 7: 275–311.
25. *Goordial J., Davila A., Lacelle D. et al.* Nearing the cold-arid limits of microbial life in permafrost. *The ISME journal*. 2016; 10(7): 1613–1624.
26. Демидов Н.Э., Гиличинский Д.А., Миронов В.А., Шмакова Л.А. Криобиосфера Земли и поиск жизни на Марсе. *Криосфера Земли*. 2012; 16(4): 67–82. [Demidov N.E., Gilichinsky D.A., Mironov V.A., Shmakova L.A. Cryobiosphere of Earth and the search for life on Mars. *Earth's cryosphere*. 2012; 16(4): 67–82. (In Russ.).]
27. *Frey H.V.* Ages of very large impact basins on Mars: Implications for the late heavy bombardment in the inner solar system. *Geophys. Res. Lett.* 2008; 35: L13203. DOI:10.1029/2008GL033515.
28. *Ivanov M.A., Hiesinger H., Erkeling G. et al.* Major episodes of geologic history of Isidis Planitia on Mars. *Icarus*. 2012; 218: 24–46.
29. *Fassett C.I., Head J.W.* Fluvial sedimentary deposits on Mars: Ancient deltas in a crater lake in the Nili Fossae region. *Geophys. Res. Lett.* 2005; 32: L14201. DOI: 10.1029/2005GL023456.
30. *Goudge T.A., Mustard J.F., Head J.W. et al.* Assessing the mineralogy of the watershed and fan deposits of the Jezero crater paleolake system, Mars. *Journal of Geophysical Research Planets*. 2015; 120: 775–808.
31. *Salese F., Kleinhans M., Mangold N. et al.* Estimated Minimum Life Span of the Jezero Fluvial Delta (Mars). *Astrobiology*. 2020; 20(8): 977–993.

General Strategy for the Search for Life on Mars and an Expedition to the Crater Jezero

N.E.Demidov¹, M.A.Ivanov²

¹Arctic and Antarctic Research Institute (St.Petersburg, Russia)

²Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, RAS (Moscow, Russia)

Main features of the Noachian, Hesperian, and Amazonian periods are considered as influence factors on potential contamination/origin, protection, and evolution of microorganisms. Mars evolution during Noachian likely resembled the early evolution of Earth. This potential similarity allows origin of life on Mars. Relatively short Hesperian period was marked by intensive volcanism, fluvial and glacial activity; however environmental conditions on its surface largely overstepped the survival limits and microorganisms were either conserved in permafrost or migrated to deeper water-rich horizons. In Amazonian, Mars represented a frozen desert with very harsh conditions on the surface that was constantly sterilized by the cosmic radiation. The generally unfavorable conditions for the life evolution suggest that primitive organisms, which potentially could be formed on early Mars, were unable to evolve up to complex, multicellular organisms. Ecological niches of modern Mars are considered. Among them, the deep subsurface water horizons and cryopegs have the highest potential for survivability of microorganisms as conditions in these environments are independent from the condition on the surface. Geology of the ancient crater lake Jezero, which is the primary target of the NASA mission Perseverance, are briefly considered. Clay minerals and carbonates within the crater could represent a potential reservoir where possible remnants of microorganisms could be accumulated and stored.

Keywords: Mars, life, astrobiology, Jezero, ecological niches.

Мы — марсиане?

А.Т.Базилевский

Институт геохимии и аналитической химии имени В.И.Вернадского РАН (Москва, Россия)

В статье обсуждается предположение, что жизнь сначала зародилась на Марсе и затем была заброшена марсианскими метеоритами на Землю. Показаны типичные места сбора метеоритов, в том числе марсианских, и приведены фотографии некоторых из них. Известные на сегодняшний день 287 марсианских метеоритов имеют массу от 11 г до 18 кг. Изотопные исследования показали, что наиболее крупные из них до входа в земную атмосферу обладали массой от 150 до 270 кг и находились в открытом космосе от 1.2 до 10.8 млн лет. Но расчеты говорят, что разброс значений времени нахождения марсианского метеорита в космосе очень велик и с вероятностью 10^{-7} возможны почти прямые перелеты Марс—Земля с пребыванием в космосе около нескольких лет. Эта вероятность очень низкая, тем не менее она могла реализоваться. В период интенсивной метеоритной бомбардировки 4.5–3.9 млрд лет назад, когда темпы ее были на 3–4 порядка выше, чем в современную эпоху, такие экспресс-перелеты могли и даже должны были случаться.

Ключевые слова: жизнь на Марсе, марсианские метеориты, длительность перелета с Марса на Землю.

Интересный аспект проблемы астробиологии Марса — предположение, что жизнь сначала зародилась на этой планете и затем была заброшена марсианскими метеоритами на Землю. Эта идея высказывалась некоторыми исследователями, например К.Карром (Ch.Carr, Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA) на Аэрокосмической конференции 2019 г. (Монтана, США)*. Вероятность зарождения жизни на Красной планете (в смысле наличия на раннем Марсе условий, которые позволяли ей существовать) обсуждается в статье Н.Э.Демидова и М.А.Иванова в этом же номере. Здесь мы рассмотрим аспект возможного переноса жизни на Землю.

Даже в современную эпоху умеренной интенсивности метеоритной бомбардировки на Землю поступает заметное количество марсианских метеоритов, которые выбрасываются из ударных кратеров. Они преодолевают притяжение Марса и падают на Солнце. Часть из них по пути к Солнцу попадает в зону притяжения Земли и, преодолевая сопротивление земной атмосферы, поступает на нашу планету.

Марсианские метеориты выявлены среди сравнительно редкого типа метеоритов — так называемых ахондритов. Они по минеральному составу



Александр Тихонович Базилевский, доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории сравнительной планетологии Института геохимии и аналитической химии имени В.И.Вернадского РАН (ГЕОХИ РАН). Специалист в области геологии планетных и малых тел Солнечной системы. Лауреат Государственной премии СССР и премии Фонда Александра фон Гумбольдта (Германия). Постоянный автор «Природы». e-mail: atbas@geokhi.ru

почти аналогичны земным магматическим горным породам — габбро-диабазам и пироксенитам-периодитам. Нормальные ахондриты образовались в результате кристаллизации магматических расплавов на крупных астероидах, скорее всего, на Весте [1]. Но, поскольку крупные астероиды — это тела диаметром от сотен километров до немногим более 1000 км, они сравнительно быстро остывали, так что возраст происходящих с них ахондритов не менее 4 млрд лет. Когда же среди ахондритов нашли экземпляры возрастом несколько сотен миллионов лет, возник вопрос, откуда они прибыли. В качестве разумного предположения стали считать, что, наверное, с Марса, который из-за его более крупных размеров должен остывать гораздо медленнее. Затем было обнаружено, что у этих аномальных ахондритов специфический изотопный состав кислорода, заметно отличающийся от такого в породах Земли, Луны и многих метеоритов [2]. И потом, в некоторых аномальных ахондритах,

* <http://ieee-aess.org/conference/2019-ieee-aerospace-conference>



Метеорит на льду в Антарктике (Смитсоновский музей естественной истории, Вашингтон, США).

<https://naturalhistory.si.edu/research/mineral-sciences/programs>

в их трещинно-поровом пространстве, обнаружили газ, по составу аналогичный газу атмосферы Марса. Сейчас в научном сообществе нет сомнений, что подобные метеориты происходят с Марса.

В базе данных Метеоритного общества на 9 декабря 2020 г. находились данные по 287 марсианским метеоритам*. Это примерно 0.4% от общего

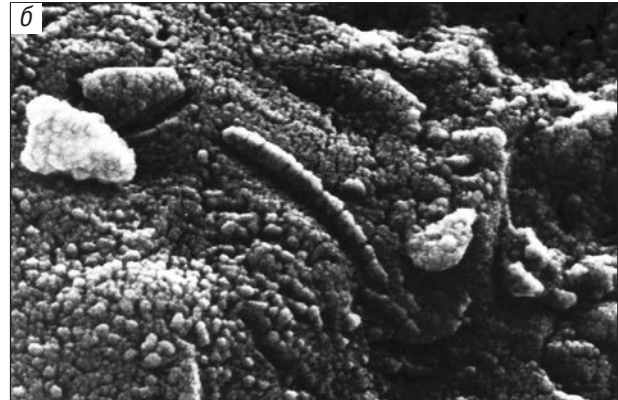
числа всех зарегистрированных метеоритов. Заметная и не всегда понятная их часть (так называемые парные метеориты) представляет собой обломки одного и того же тела, которое разрушилось при проходе через атмосферу Земли. Но даже с этой оговоркой видно, что марсианских метеоритов немало. Большинство из них собрали в специфических областях Антарктики и в пустынях Азии, Африки и Южной Америки.

* www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php



Метеориты, найденные в Антарктике: *a* — Yamato Y 000593, масса 13.71 кг, размер 29×22×16 см, из коллекции Национального института полярных исследований (National Institute of Polar Research, Токио, Япония); *б* — Elephant Morain EETA 79001, масса 7.94 кг, размер 22×17×14 см (Смитсоновский музей естественной истории, Вашингтон, США).

www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php



Метеориты из Антарктики: а — Allan Hills ALH 84001, масса 1931 г., размер 17×9.5×6.5 см.; б — электронно-микроскопический снимок карбонатного прожилка в этом метеорите. Поперечник видимых на снимке сферул около 100 нм. Образование, похожее на червяка, некоторые ученые считали возможным остатком древней микробной жизни Марса [3].

Фото К.Аллена (C.Allen. Johnson Space Center, NASA, США)
www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php

В Антарктике это области, где течение ледяной шапки к окружающему океану останавливается горными массивами. Поступающий с юга лед с накопившимися в нем метеоритами в месте остановки сублимирует, и метеориты выступают на поверхности.

В пустынях лучшими районами для поиска метеоритов служат каменистые пустыни. Наиболее удобны те, в которых на поверхность выходят светлые горные породы, например известняки. В их окружении метеориты с темной и даже черной поверхностью видны издали. Их поиск нередко проводится на автомобиле. В последние годы местные жители стали сами собирать метеориты и их продавать. На фотографиях показаны марсианские метеориты, найденные в различных пустынях.

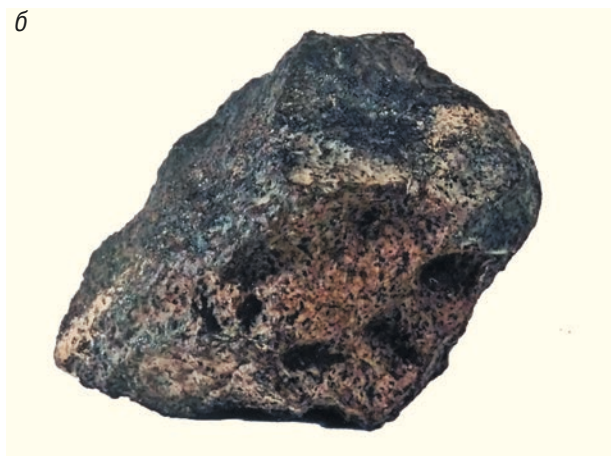
Как сказано выше, марсианские метеориты — это обломки магматических пород основного и ультраосновного состава. В упомянутой статье Демидова и Иванова показано, что постройки, а значит, и продукты базальтового вулканизма на Красной планете распространены довольно широко. На Марсе есть и другие типы пород, прежде всего ударные брекчии и осадочные породы. Но из-за невысокой механической прочности они, по-видимому, не выдерживают высокоскоростно-

го выброса (чтобы улететь из зоны притяжения Марса, тело должно приобрести скорость >5 км/с) и разрушаются уже в самом начале. А еще будущим метеоритам — обломкам пород с Марса — надо выдержать высокоскоростной вход в атмосферу Земли.

Понятно, чтобы организмы (микроорганизмы) с Марса могли перенести перелет на Землю, они должны быть изолированы от губительных для жизни факторов межпланетной среды, т.е. на-



Метеорит на сложенном известняками пустынном плато на северо-западе Ливии.
www.meteorite-recon.com/home/Libya_meteorites/p3

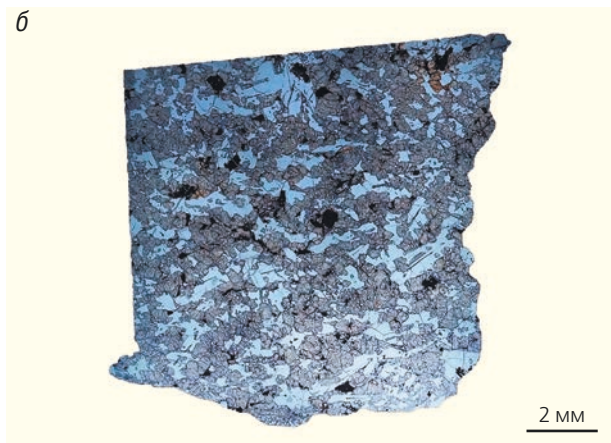


Метеориты, найденные в пустынях: а — NWA 13581 (Алжир), масса 6.3 кг, поперечник 15 см; б — DAG 489 (Ливия), масса 2.15 кг. Фото У.Ксю (Weibia Xsu; а), М.Чиннелато (Matteo Chinnelato; б) www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php



Метеориты, найденные в пустынях: а — Dar al Gani DAG 1037 (Ливия), общая масса метеорита 4 кг; б — NWA 6963 (юг Марокко), общая масса метеорита 8 кг.

www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php



Еще не зарегистрированный метеорит (парный марокканскому NWA 12564), масса 1.51 кг, длина 16.5 см: а — общий вид, б — шлиф, бурые зерна — пироксен, светлые — ударно-метаморфизованный плагиоклаз (маскеленит).

<https://museum-21.ru/SNC>

ходиться внутри достаточно крупных тел. Массы 287 зарегистрированных марсианских метеоритов невелики: от 11 г до 18 кг. Из них с массами 1–2 кг – 17 образцов, 2–4 кг – 13, 4–8 кг – девять, 8–16 кг – пять, >16 кг – только один. Таким образом, с массой >1 кг на Земле зарегистрировано всего 45 метеоритов. Но это массы тел, достигших поверхности Земли. А для проблемы сохранения организмов при перелете с Марса на Землю важно понимать доатмосферные габариты метеоритов. В работе О.Югстера с коллегами по измерениям изотопного состава неона и криптона (который зависит от времени облучения метеорита космическими лучами при его нахождении в открытом космосе) для семи марсианских метеоритов были определены минимальные радиусы, лежащие в пределах 22–27 см, что соответствует массам от 150 до 270 кг [4]. Для этих же метеоритов было рассчитано время их нахождения в открытом космосе: от 1.2 до 10.8 млн лет.

Трудно себе представить, чтобы какие-то микроорганизмы могли сохранить жизнеспособность в течение столь больших промежутков времени. Но, как показывают расчеты [5, 6], разброс в значениях времени нахождения марсианского метеорита в открытом космосе очень велик, и с вероятностью 10^{-7} возможны почти прямые перелеты Марс–Земля с пребыванием в космосе всего несколько земных лет. Эта очень низкая вероятность, тем не менее она могла и, по-видимому, должна была реализоваться. Сейчас, по некоторым оценкам, на Землю каждый месяц поступает один марсианский метеорит [6]. Но в период интенсивной метеоритной бомбардировки 4.5–3.9 млрд лет назад, когда темпы ее были на 3–4 порядка выше, чем в современную эпоху [7, 8], такие экспресс-перелеты могли и даже должны были случаться.

Так что, дорогие читатели, а может быть, мы с вами марсиане? ■

Автор благодарит за помощь в работе Кристофера Карра (Christopher Carr, Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA) и коллег по ГЕОХИ РАН – А.М.Абдрахимова, М.А.Иванову и А.В.Корочанцева.

Литература / References

1. Russell C.T., Raymond C.A., Coradini A. et al. Dawn at Vesta: Testing the Protoplanetary Paradigm. *Science*. 2012; 336(6082): 684–686.
2. Clayton R.N. Oxygen Isotopes in Meteorites. *Treatise in Geochemistry*. V.1. Meteorites, Comets and Planets. A.M.Davis (ed.). 2005; 129–142.
3. McKay D.S., Everett K., Gibson Jr. et al. Search for past life on Mars possible relic biogenic activity in Martian meteorite ALH84001. *Science*. 1996; 273: 924–930.
4. Eugster O., Busemann H., Lorenzetti S. The pre-atmospheric size of Martian meteorites. *Lunar and Planetary Science XXXIII*. 2002; 10.
5. Gladman B., Burns J.A. Mars meteorite transfer: Simulation. *Science*. 1996; 274: 161–162.
6. Gladman B. Destination: Earth. Martian meteorite delivery. *Icarus*. 1997; 130: 22.
7. Neukum G. Meteoriten bombardement und Datierung planetarer Oberflächen. Habilitation Thesis for Faculty Membership. Munich, 1983. (English translation, 1984: Meteorite bombardment and dating of planetary surfaces).
8. Neukum G., Ivanov B., Hartmann W.K. Cratering records in the inner solar system in relation to the lunar reference system. *Space Sci. Rev.* 2001; 96: 55–86.

Are We Martians?

A.T.Basilevsky

Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, RAS (Moscow, Russia)

The article discusses the assumption that life first originated on Mars and then was delivered by Martian meteorites on Earth. Typical collection sites for meteorites, including Martian ones, and photographs of some of them are presented. The 287 known to date Martian meteorites vary in mass from 11 g to 18 kg. Isotope studies have shown that the largest of them, before entering the Earth's atmosphere, had a mass of 150 to 270 kg and were in outer space from 1.2 to 10.8 Myr. However, the calculations show that the range of values for the time spent by a Martian meteorite in space is very large; almost direct Mars—Earth flights with a space flight duration of about several years are possible with a probability of 10^{-7} . This very low probability, however, could be realized. During the period of intense meteorite bombardment 3.9–4.5 billion years ago, when its rates were 3–4 orders of magnitude higher than in the modern era, such express—flights could and even should have happened.

Keywords: life on Mars, Martian meteorites, duration of the flight from Mars to Earth.