

ИССЛЕДОВАНИЯ МАРСА: ВЧЕРА, СЕГОДНЯ И ЗАВТРА



МИТРОФАНОВ Игорь Георгиевич,

доктор физико-математических наук

Институт космических исследований РАН



DOI: 10.7868/50044394825010013

Поступила в редакцию: 26.03.2025

Принята к публикации: 26.03.2025

В статье обсуждаются история и перспективы космических исследований Марса в увязке с решением одной из главных проблем естествознания – вопроса происхождения жизни.

ОТ КАНАЛОВ НА МАРСЕ – К ПЕРВЫМ РАКЕТАМ НА ЗЕМЛЕ

27 августа 1911 г. в газете New York Times была опубликована статья «Марсиане построили два канала за два года»¹. В подзаголовке сообщалось, что «...наши соседи по планетной системе за невероятно короткое время выполнили огромные инженерные работы». Статью иллюстрировали рисунки американского астронома Персиваля Ловелла

(1855–1916), на которых сравнивались контуры каналов в одном и том же районе Марса, полученные с промежуток времени в два года (рис. 1). Впервые о марсианских каналах в 1877 г. сообщил знаменитый исследователь Марса итальянский астроном Дж. Скиапарелли (1835–1910). Публикация об активном строительстве марсианами каналов в таком достаточно серьезном публичном издании, как New York Times, указывает на то, что в начале прошлого века сам факт существования жизни на Марсе среди интересующейся публики практически не подвергался сомнению. В одной из хорошо известных монографий Ловелла отмечалось, что природная среда Марса в плане эволюции

¹ Proctor M. Martians build two immense canals in two years // The New York Times, August 8, 1911; Еремеева А.И. Джованни Скиапарелли // Земля и Вселенная. 2010. № 5. С. 45–52.



Рис. 1. Рисунок поверхности Марса, сделанный Персивалем Ловеллом с перерывом в два года (1894–1896). На основе наблюдений он составил и опубликовал карту Марса, на которую нанес множество одиночных и двойных каналов, тянущихся на тысячи километров

гораздо старше земной и на «красной планете» практически не осталось воды². Поэтому продвинутая марсианская цивилизация на высыхающей планете вынуждена строить каналы, чтобы доставлять воду из полярных шапок в пригодные для жизни оазисы на умеренных широтах.

Высокоразвитых марсиан земляне опасались, но они также вызывали у них интерес. Основоположник американского ракетостроения Роберт Годдард отмечал³, что именно роман Герберта Уэллса «Война миров» пробудил его интерес к ракетным космическим полетам. Можно сказать, что первая в мире ракета Годдарда на жидком топливе взлетела 16 ноября 1926 г. благодаря воображаемому марсианам.

Монография П. Ловелла «Марс и жизнь на нем» была опубликована

в переводе на русском⁴ (рис. 2). Студент рижского Политехнического института Фридрих Цандер в это время изучал статью школьного учителя из Калуги К.Э. Циолковского «Исследование мировых пространств реактивными приборами»⁵. Вполне возможно, что именно газетные новости о марсианах привлекли внимание Цандера к расчетам траектории полета ракеты на Марс. Марсианские сюжеты проникли даже в поэтическую среду. Технология полета на Марс была подробно описана в 1921 г. в неоконченной повести поэта-символиста Валерия Брюсова «Первая междупланетная экспедиция»⁶. Позднее писатель Алексей Толстой описал марсианскую экспедицию со всеми

⁴ Ловелл П. Марс и жизнь на нем. Одесса: изд. Mathesis, 1912.

⁵ Циолковский К.Э. Исследование мировых пространств реактивными приборами. Калуга, 1914; Желнина Т.Н. Труд К.Э. Циолковского «Исследование мировых пространств реактивными приборами» // Земля и Вселенная. 2017. № 1. С. 68–77.

⁶ Брюсов В.Я. Первая междупланетная экспедиция. М.: Директ-Медиа, 2014.

² Lowell P. Mars and its canals. New York & London: Macmillan & co., Ltd., 1906.

³ Clary D.A. Rocket man. Hachette Books, 2004; Бубнов И.Н. Роберт Годдард. М.: Наука, 1978. С. 10.

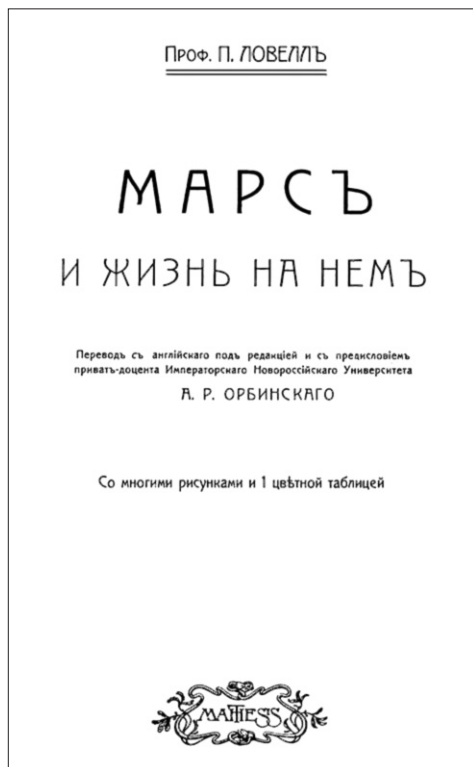


Рис. 2. Обложка книги Персиваля Ловелла «Марс и жизнь на нем», 1912 г.

художественными подробностями в своей знаменитой повести «Аэлида»⁷.

Практически одновременно с Ф.А. Цандером восемнадцатилетний мюнхенский студент Герман Оберт также под влиянием марсианских сюжетов вывел формулу для описания реактивного полета к Марсу⁸. Впоследствии оказалось, что раньше Оберта эту формулу вывел Циолковский⁹. В доме-музее К.Э. Циолковского в Калуге хранится письмо, в котором основоположник немецкой ракетной науки признает при-

оритет российского ученого-самоучки в разработке принципов реактивного полета¹⁰.

Так в бурный период начала XX в. анализ астрономами-любителями зарисовок переменчивого облика «красной планеты» привел к формированию в общественном сознании цели будущей пилотируемой космонавтики – экспедиции на Марс, и отсюда – к возникновению ракетной науки как средству достижения этой цели. Примерно в одно и то же время (1930–1931 гг.) Фридрих Цандер в России и Герман Оберт в Германии обсуждали полеты на Марс со своими молодыми коллегами, которым в будущем предстояло приступить к реализации этой цели на практике, – Сергеем Королёвым и Вернером фон Брауном¹¹.

Известно, что Сергей Павлович Королёв готовил «Марсианский проект» как свою основную цель развития космонавтики¹² (рис. 3). Можно с большой долей уверенности предположить, что для Королёва полет в космос Юрия Гагарина был началом реализации этой цели. Работы над марсианским проектом вначале поддерживало государство, но они были прекращены после того, как руководство Советского Союза по политическим причинам решило сконцентрировать усилия на «лунной гонке» с американцами¹³.

¹⁰ Экспозиция Калужского музея космонавтики им. К.Э. Циолковского «Циолковский и Оберт. Сплетение судеб, событий, эпох», 2013.

¹¹ Герасютин С.А. Стремление ввысь. Очерки космонавтики. М.: Ноократия, 2024.

¹² Бугров В.Е. Марсианский проект С. П. Королёва. 2-е изд. М.: Русские витязи, 2009.

¹³ Постановления ЦК КПСС и Совета Министров СССР № 1388-618 «О развитии исследований по космическому пространству» от 10 декабря 1959 г. и № 655-268 «О работах по исследованию Луны и космического пространства» от 3 августа 1964 г.

⁷ Толстой А.Н. Аэлида. М.: художественная литература, 1982.

⁸ Oberth H. Die Rakete zu den Planeten raumen. Auflage, 1923.

⁹ Голованов Л.В. Формула Циолковского // Земля и Вселенная. 2002. № 2. С. 76–85.

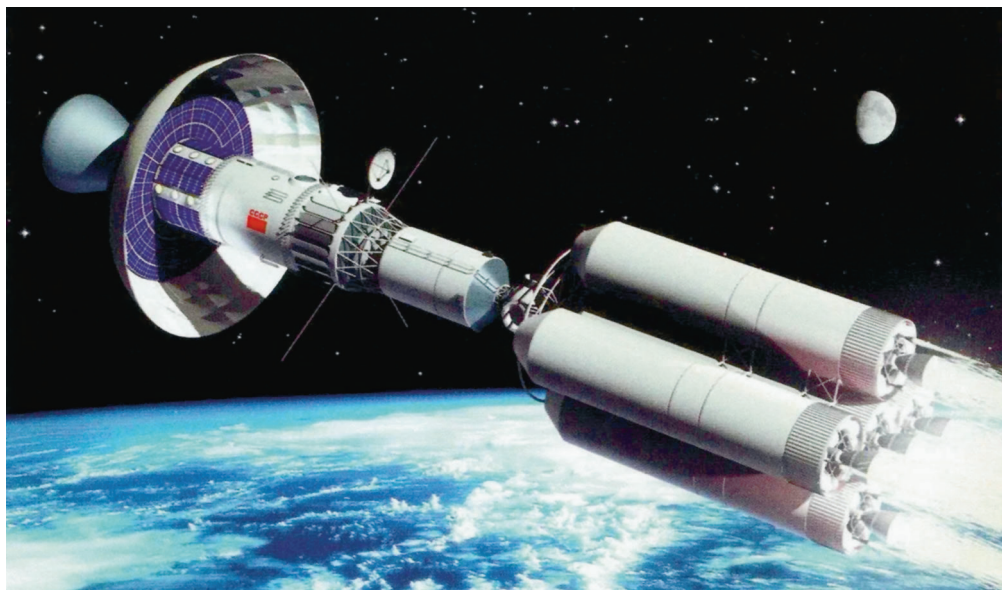


Рис. 3. Проект Тяжелого межпланетного корабля, который разрабатывался в ОКБ-1 под руководством С.П. Королёва в 1960–1965 гг. РКК «Энергия» им. С.П. Королёва

Вернер фон Браун начал разрабатывать свой марсианский проект еще раньше, в середине войны, параллельно с созданием боевых ракет А-4 (Фау-2). После вывоза из поверженной Германии в США он опубликовал на немецком языке технический манускрипт, в котором обосновал возможность реализации марсианской экспедиции. Впоследствии, вероятно для привлечения внимания руководства своей новой страны, фон Браун написал фантастический роман о полете людей на Марс¹⁴, в который включил свою инженерную записку в качестве технического приложения. Герои романа встретили на Марсе высокоразвитую цивилизацию, которой руководил марсианин по имени Elon. Интересное совпадение с именем

владельца космической компании SpaceX, который сегодня планирует основать колонию людей на Марсе¹⁵.

СОВРЕМЕННЫЕ НАУЧНЫЕ ЗНАНИЯ О МАРСЕ

Все современные данные о Марсе были получены научными приборами с борта автоматических космических аппаратов. К настоящему времени в окрестности Марса или на его поверхности побывали несколько десятков автоматических аппаратов, около 10 аппаратов исследуют его в настоящее время. Уже самые первые снимки марсианской поверхности с борта американских *Mariner* и советских «Марсов» в 1960–1970-х гг. показали, что на поверхности «красной планеты» искусственных каналов нет и так-

¹⁴ von Braun W. Project Mars. A Technical Tale, 1953. Марков А.Е. Марс-проект Вернера фон Брауна // Новости космонавтики. 2002. № 11. С. 66–69.

¹⁵ Root A. Elon Musk Lays Out Plan for Mars Colony // Aerospace and Defence, 2024.

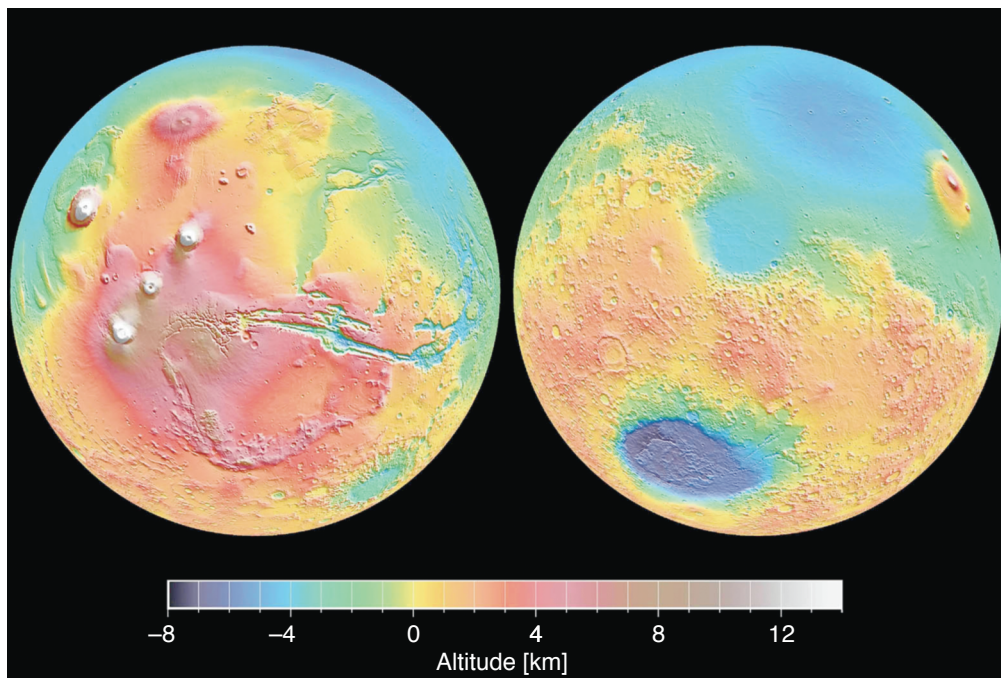


Рис. 4. Карта полушарий Марса, составленная по данным лазерного высотомера MOLA AMC Mars Global Surveyor (NASA), который измерял рельеф марсианской поверхности с 1997 по 2001 г. Внизу – шкала перепада высот в км. *Science*, 27 мая 1999 г. NASA

же отсутствуют какие-либо признаки существования развитой цивилизации (см., например, рис. 4). Тестирование на наличие активной биосферы современный Марс также не прошел – приборы на борту американских посадочных аппаратов *Viking-1/2* не обнаружили признаков ее существования¹⁶.

На сегодняшний день основным результатом космических исследований Марса можно считать надежно установленный факт, что эта планета испытала достаточно интенсивный эволюционный процесс глобальной трансформации, который условно разделяют на три геологических периода: Нойский,

Гесперийский и Амазонийский¹⁷. Молодой Марс Нойского периода (примерно до 4 млрд лет назад) имел глобальное магнитное поле, толстую атмосферу и обширные водные резервуары на поверхности, окруженные протоками от эпизодических наводнений и руслами от впадающих рек. Вероятно, в течение Гесперийского периода (около 4–3 млрд лет тому назад) планета Марс претерпела глобальное преобразование, которое качественно изменило ее природную среду. Наиболее вероятно, что эта эпоха катастроф была вызвана столкновениями Марса с крупными небесными телами и сопровождалась активными вулканическими процессами.

¹⁶ Mazur P. et al. Biological Implications of the Viking mission to Mars // *Space Science Reviews*, 1978. V. 22. P. 3–34; Ксанфомалити Л.В. Парад планет. М.: Наука, 1997. С. 92–137.

¹⁷ Carr M.H., Head III J.W. Geologic history of Mars // *Earth and Planetary Science Letters*, 2010. V. 294, issue 3–4. P. 185–203.

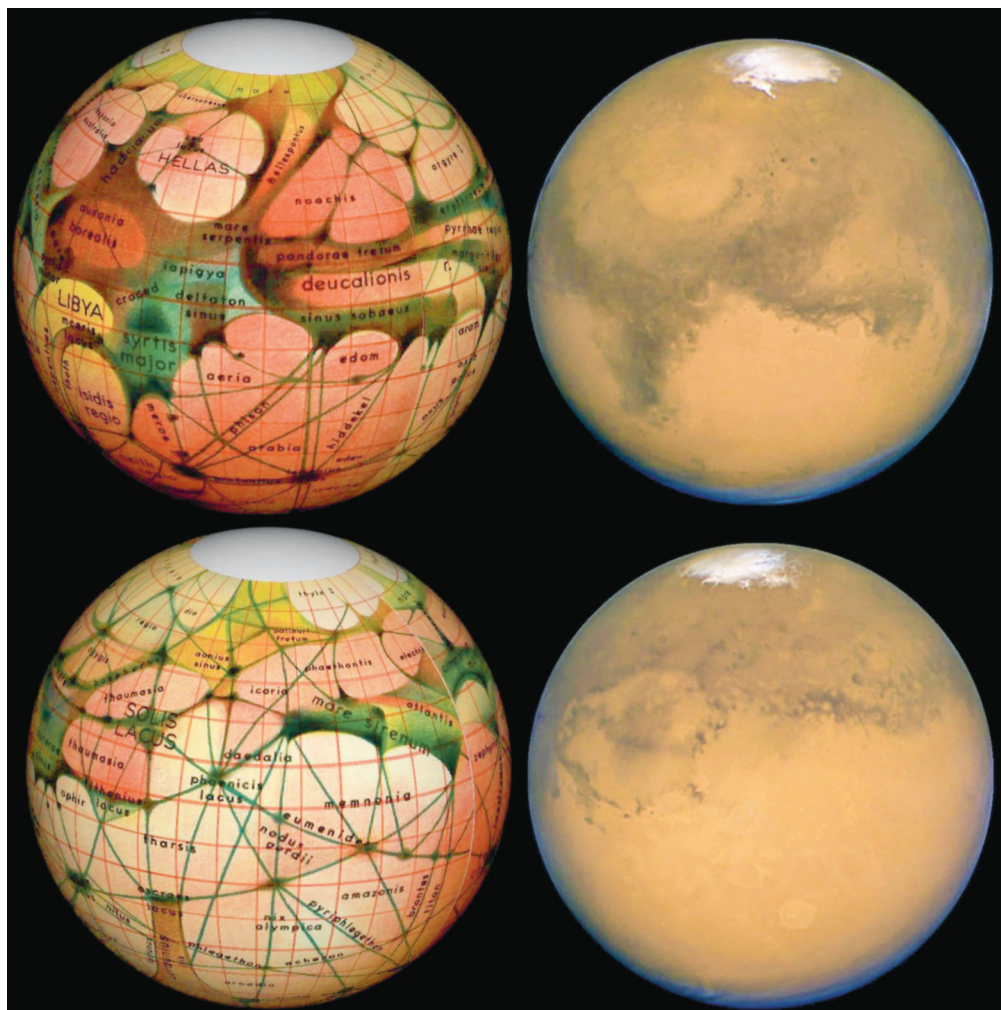


Рис. 5. Сравнение изображений рельефа поверхности Марса согласно рисункам на основе наблюдений великого противостояния Марса 1909 г. французского астронома Э.М. Антониади и современным, созданным по наблюдениям космического телескопа Hubble.

NASA, Antoniadi E.M. La Planète Mars, 1930

Марс в современную Амазонийскую эпоху, которая наступила примерно 3 млрд лет назад, потерял глобальное магнитное поле и толстую атмосферу. Его холодная и сухая поверхность, напоминающая холодные каменистые пустыни Антарктиды, сохранила отпечатки ранних этапов его бурной эволюции – русла протоков и высохших рек, кратеры вулканического происхожде-

ния и ударные кратеры от астероидов, слоистые донные отложения высохших озер и морей. Наряду с бассейном Эллады (Hellas Planitia) диаметром 2300 км, глубиной 7152 м на поверхности выделяется гигантский каньон Маринера (Valles Marineris) длиной более 4000 км, шириной 200 км и огромный кратер Олимпус (Olympus Mons) высотой 21 229 м – свидетели древних глобальных катастроф.

До сих пор остается неясным вопрос об отсутствии этих хорошо различимых деталей рельефа на старых рисунках и фотографиях Марса, которые, по мнению астрономов-любителей конца XIX – начала XX в., свидетельствовали о наличии на Марсе искусственных каналов (см., например, рис. 5).

ВОПРОС «ЕСТЬ ЛИ ЖИЗНЬ НА МАРСЕ?» ОСТАЕТСЯ АКТУАЛЬНЫМ

Несмотря на огромный объем данных о современном Марсе, вопрос о существовании жизни на этой планете остается открытым. Молодой Марс Нойского периода был очень похож на молодую Землю, и на нашей планете в то время уже была примитивная жизнь. Нам неизвестна причина возникновения земной жизни – или в раннем земном океане произошло ее спонтанное зарождение, или в этот океан кометами или астероидами были занесены споры космической жизни. Но и в первом, и во втором случаях предположение, что аналогичное событие могло бы произойти на похожем на Землю молодом Марсе, представляется вполне естественным.

Поэтому и после отрицательного результата в 1976–1980 гг. *AMC Viking-1/2* (NASA) исследователи Марса продолжают искать признаки существования жизни на этой планете¹⁸. Хотя на современном Марсе нет глобальной биосферы, реликтовая форма жизни из палеонтологической эпохи могла бы сохраниться в локальных «оазисах», где имеются физико-химические условия для ее существования. Или – если современный Марс безжизнен,

то остатки древних организмов могли бы остаться в древних отложениях среди гидратированных минералов или в реликтовой водной вечной мерзлоте, сохранившейся с Нойских времен. И в первом, и во втором случаях поиски признаков жизни на Марсе должны следовать девизу «Following the water!» (Следовать за водой!)¹⁹, провозглашенному NASA в конце XX в. для программы исследований Марса. Этот девиз основан на предположении о сходстве земной и гипотетической марсианской форм жизни и на том известном факте, что земная жизнь зародилась и эволюционировала в благоприятной водной среде.

В современной марсианской атмосфере есть водяной пар²⁰, но для поддержания жизни его очень мало. Значительные массы водяного льда присутствуют в полярных шапках Марса, однако возраст этих шапок невелик, всего около сотни тысяч лет. Дело в том, что Марс испытывает циклы Миланковича²¹, вследствие которых наклон полярной оси планеты к плоскости эклиптики периодически значительно изменяется. В периоды больших наклонов полярные ледники пропадают на полюсах и возникают вблизи экватора. Поэтому-то вода Амазонийской эпохи, скопившаяся вокруг современных холодных полюсов, регулярно испытывала процессы сублимации и конденсации, в которые она теряла возможные

¹⁹ Переключается с девизом Ф.А. Цандера «Вперед, на Марс!».

²⁰ Titov D.V. Water vapour in the atmosphere of Mars // Adv. In Soace Research, 2002. V. 29, issue 2. P. 183–191.

²¹ Они описывают влияние изменений в движении планеты на ее климат. Названы в честь сербского астрофизика М. Миланковича, который в 1941 г. сформулировал это предположение. Schorghofer N. Temperature response of Mars to Milankovitch cycles // Geophysical Research Letters, 2008. V. 35, issue 18.

¹⁸ Иванов М.В. Наземная микробиология и стратегия поиска жизни на Марсе // Природа. 2002. № 2 (1038). С. 5–13.

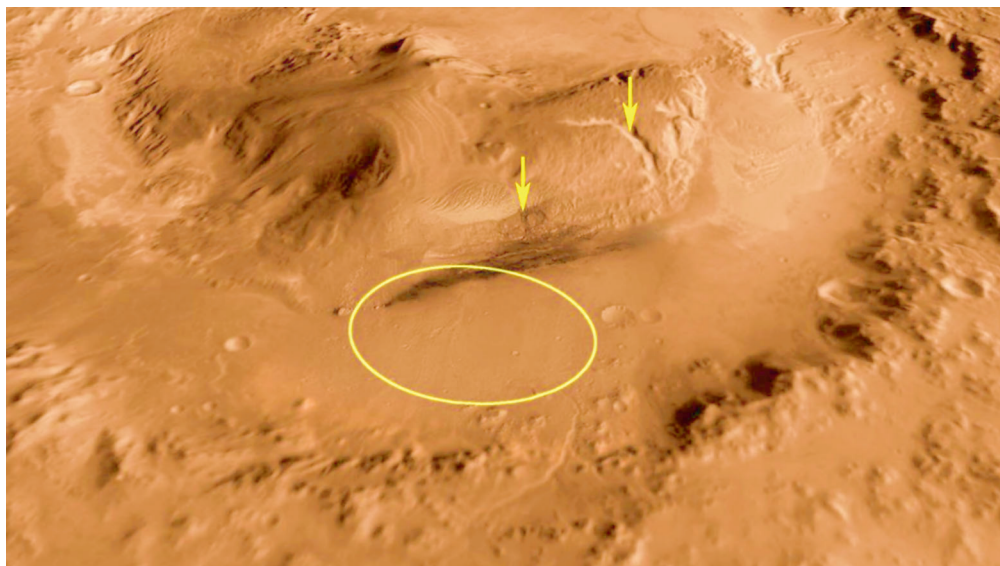


Рис. 6. Трехмерный вид марсианского кратера Гейл (Gale) – района посадки и исследований марсохода Curiosity в 2012–2025 гг. – получен с помощью орбитальных аппаратов Mars Odyssey и Mars Global Surveyor. Стрелками показаны разломы в горе Шарпа внутри кратера, эллипсом – место работы марсохода Curiosity. JPL/NASA, 2011

реликтовые примеси от предшествующих эпох²².

Вероятно, возможность обнаружить признаки марсианской жизни из палеонтологической эпохи все еще сохраняется для древних ледников непосредственно под поверхностью Марса или для древних подземных озер. Также фрагменты реликтовой жизни могут сохраниться в веществе с высоким содержанием гидратированных минералов. Возраст этого вещества должен соответствовать Нойскому или раннему Гесперийскому периодам, когда условия обитания для простейших форм жизни были еще вполне приемлемы.

Одним из таких районов, наиболее привлекательных для поиска признаков существования марсианской жизни, является ударный кратер Гейла

(Gale) диаметром 154 км возрастом 3.5–3.8 млрд лет, расположенный на западе Элизийской равнины (Elysium Planitia) (рис. 6). Он образовался вследствие удара метеорита и в Гесперийском периоде был дном соленого озера. Этот кратер был отобран в качестве района посадки марсохода NASA Mars Science Laboratory (Марсианская научная лаборатория), получившего после удачной посадки свое имя собственное Curiosity («Любопытство»)²³. Марсоход оснащен химическими лабораториями SAM и CheMin для исследований присутствия в грунте органики. В настоящее время он прошел около 35 км.

Учитывая девиз «Following the water!», американцы пригласили для участия в проекте российскую команду с целью установки на борту марсохода прибора

²² Калашиников Д.В., Митрофанов И.Г. Гигантский ледник на Марсе // Земля и Вселенная. 2023. № 3. С. 13–22.

²³ Grotzinger J.P. Habitability, Taphonomy, and the Search of Organic Carbon on Mars // Science, 2014. V. 343, issue 6169. P. 386–387.

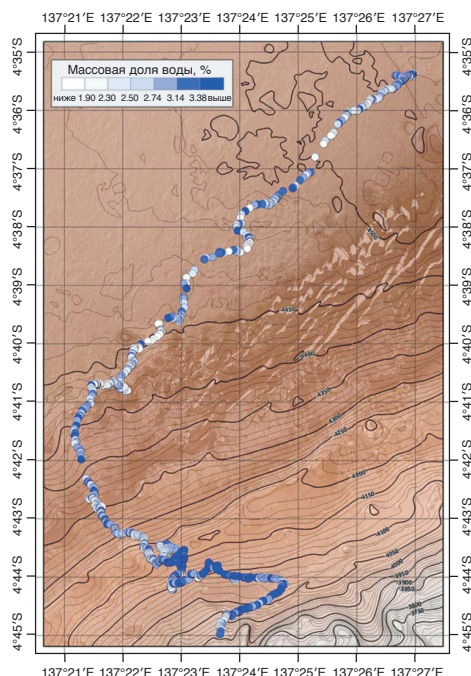


Рис. 7. Оценки массовой доли воды в грунте Марса вдоль трассы движения марсохода Curiosity, согласно данным российского прибора ДАН, полученных во время сеансов нейтронного зондирования за 10 лет измерений. ИКИ РАН, 2023

с импульсным нейтронным генератором ДАН для зондирования грунтовой воды²⁴. Такие генераторы умеют делать только наши коллеги из ВНИИ автоматики им. Н.Л. Духова госкорпорации «Росатом», и совместно с ними в ИКИ РАН сделали такой прибор. Мощные короткие импульсы нейтронов с энергией около 14 МэВ излучаются генератором на стоянках марсохода и просвечивают вещество под поверхностью на глубину около 1 м. Нейтронное послесвечение имеет разные энергии и про-

должительность в зависимости от массовой доли воды и хлора в веществе. ДАН был предназначен для поиска локальных участков вдоль трассы движения марсохода с самым высоким содержанием воды. На этих участках с применением других научных приборов на борту марсохода планировалось искать жизнь или признаки ее существования в прошлом.

За 12 лет успешной работы по данным прибора ДАН были построены пространственные профили распространенности воды и хлора вдоль трассы марсохода на дне кратера Гейла (рис. 7). Максимальное измеренное значение воды составило около 10%, она, вероятно, связана с присутствием гидратированных минералов²⁵. Относительно недавно появилось сообщение²⁶, что в грунте на дне кратера были обнаружены сложные молекулярные соединения в виде длинноцепочечных карбоновых кислот $C^{10}H^{22}$, $C^{11}H^{24}$ и $C^{12}H^{26}$. Хотя такие соединения могут быть биомаркерами – признаками биологической активности, но они также могут возникать в абиотических химических процессах.

Таким образом, несмотря на успешные исследования на борту марсохода Curiosity, достоверных свидетельств наличия признаков жизни в веществе

²⁴ Митрофанов И.Г., Дьячкова М. В. и др. Эксперимент ДАН: термоядерный синтез для нейтронного зондирования поверхности Марса // Земля и Вселенная. 2023. № 3. С. 23–41.

²⁵ Nikiforov S.Yu. Water and Chlorine in the Martian Subsurface Along the 27 km Traverse of NASA's Curiosity Rover According to DAN Measurements: 2. Results for Distinct Geological Regions // Journal of Geophysical Research: Planets, 2024. V. 129, issue 4, e2022JE007731; Djachkova M.V. et al. Testing correspondence between areas with hydrated minerals, as observed by CRISM/MRO, and spots of enhanced water content, as found by DAN along the traverse of Curiosity // Advanced in Astronomy, article 6672456, 2022.

²⁶ Frtissinet C. et al. Long-chain alkanes preserved in a Martian mudstone // Proceedings of the National Academy of Sciences, 2025. V. 122, issue 13, e24220580122.

кратера Гейла пока не обнаружено. Вероятно, следует организовать поиск марсианских «оазисов» с максимально высоким содержанием Нойской или Гесперийской воды, доставить эти пробы на Землю и произвести анализ состава вещества таких «оазисов» в ведущих аналитических лабораториях с применением наиболее чувствительных методов современной биохимии. Согласно такому плану была предложена амбициозная программа NASA Mars Sample Return (возврат образцов Марса) по доставке на Землю образцов марсианского вещества. Хотя в настоящее время миссия испытывает значительные организационные трудности²⁶, но ее первый проект – марсоход *Perseverance* («Настойчивость», технический аналог *Curiosity*) уже доставлен в 2021 г. в другой уникальный марсианский ударный кратер Джезеро (Jezero) (рис. 8). Этот марсоход должен собрать коллекцию наиболее интересных образцов марсианского вещества с высоким содержанием гидратированных минералов для доставки на Землю на борту последующего возвращаемого аппарата.

Детальный анализ этого вещества может принести ответ о существовании (или существовании когда-то) марсианской жизни. Однако отбор образцов по признаку присутствия в веществе химически связанной воды может оказаться все еще недостаточным для достоверного обнаружения признаков жизни. Может оказаться, что для исследований потребуется еще и анализ древнего марсианского льда.

ПОИСК «ОАЗИСОВ» С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ ВОДЫ В ГРУНТЕ

Возможности поиска районов с высоким содержанием воды в веществе Марса под поверхностью на глубине 1–2 м связаны с методом нейтронного

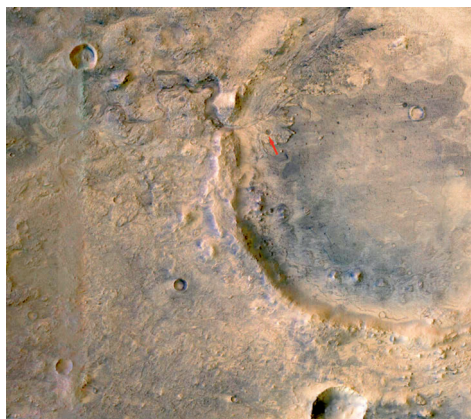


Рис. 8. Марсианский кратер Джезеро (Jezero) размером 7.7 × 6.6 км, расположенный на границе Большого Сырта (с востока) и равнины Исиды (с запада) – место посадки марсохода *Perseverance* (отмечено стрелкой). Здесь замечено русло древней реки и дельтовые отложения древнего озера. JPL/NASA, 2023

каротажа – с исследованиями собственного нейтронного излучения планеты с борта орбитальных АМС. Нейтронное излучение поверхности возникает в веществе в реакциях дробления ядер под воздействием тяжелых энергичных частиц галактических космических лучей. Известно, что первым признаком наличия уже небольшой массовой доли водорода в веществе является эффективное замедление образовавшихся в нем энергичных нейтронов. При этом поток нейтронов с поверхности планеты демонстрирует дефицит в энергетическом диапазоне быстрых и надтепловых нейтронов. Вторым признаком присутствия в грунте водорода является гамма-излучение с энергией 2.2 МэВ, которое образуется в реакциях захвата нейтронов протонами с образованием дейтерия на возбужденном квантовом уровне. Наиболее вероятным химическим соединением с водородом в марсианском грунте является вода, поэтому

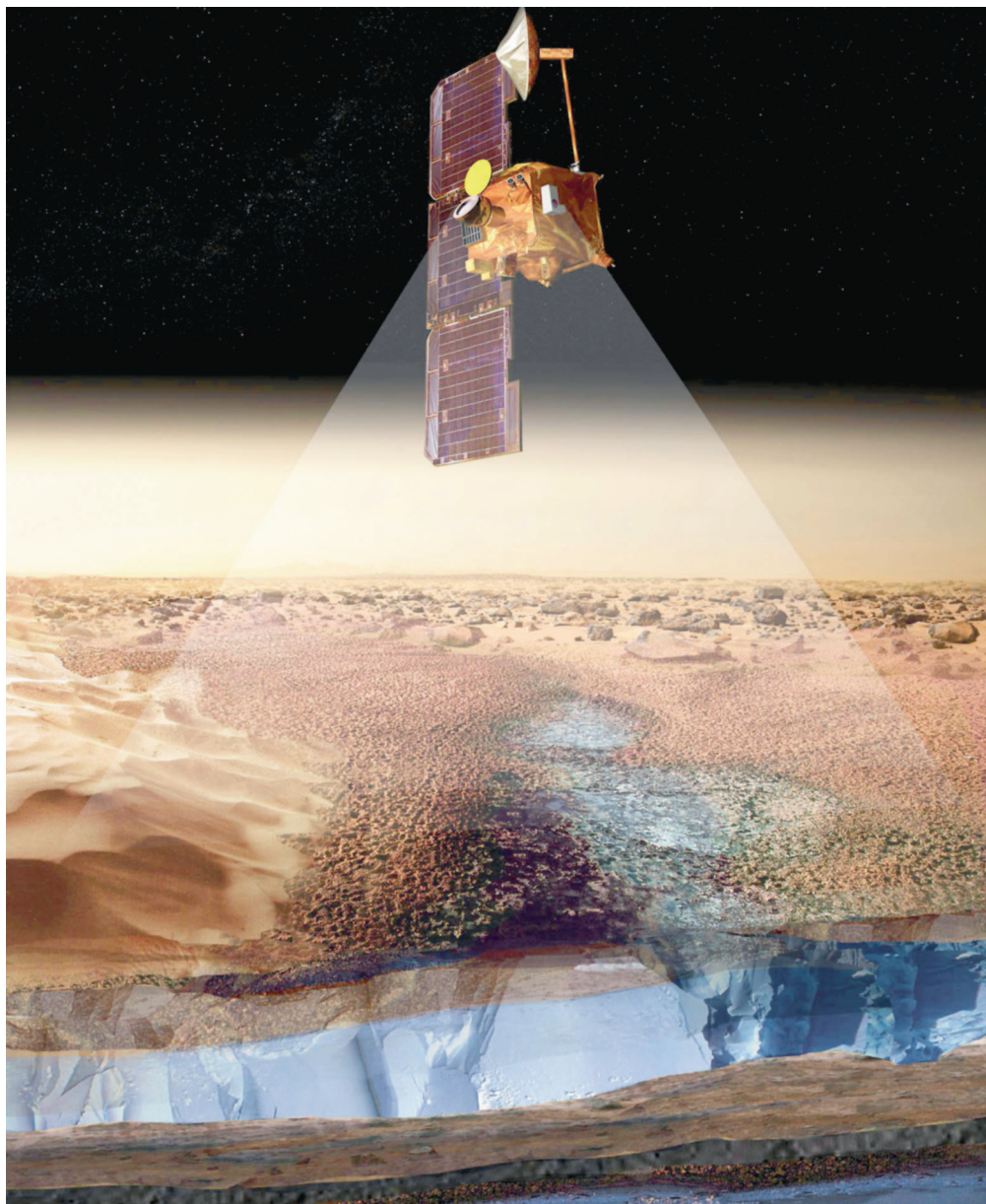


Рис. 9. Художественное изображение нейтронного зондирования водяного льда в приповерхностном слое Марса приборами, установленными на борту орбитального аппарата Mars Odyssey. JPL/NASA

ядерно-физические оценки концентрации водорода обычно используют для измерения массовой доли воды.

Уже в первых успешных американском и российском ядерно-физических

экспериментах GRS и HEND по картографированию гамма-лучей и потока нейтронов Марса с борта орбитального аппарата NASA Mars Odyssey были обнаружены районы с высоким

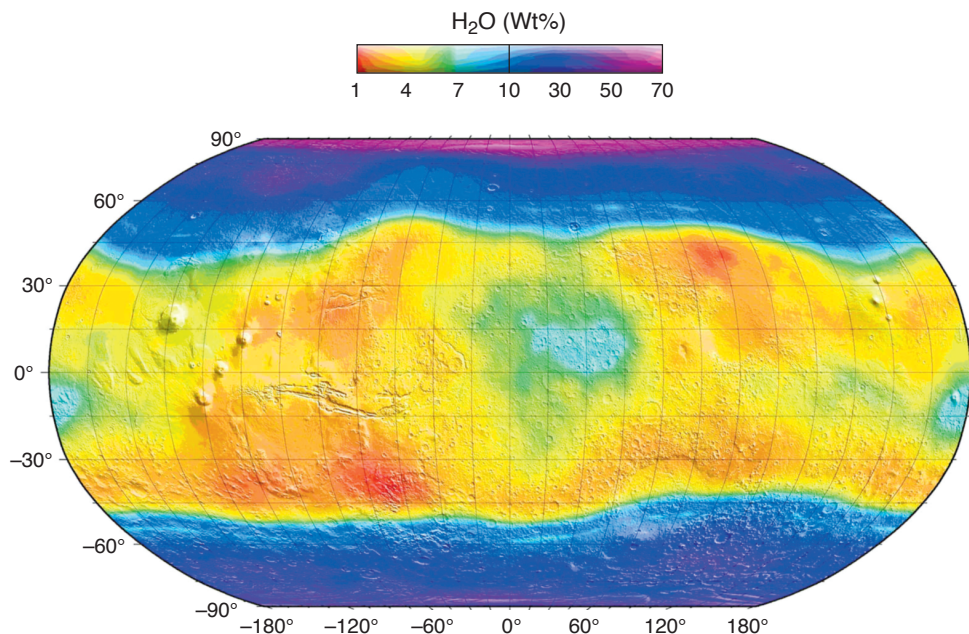


Рис. 10. Карта распространности воды в грунте Марса по данным гамма-спектрометра GRS и нейтронного детектора HEND, установленных на борту орбитального аппарата NASA Mars Odyssey. Вверху – шкала содержания воды в грунте. JPL/NASA, 2001

содержанием в грунте водорода²⁷. Во-первых, оказалось, что в грунте приполярных территорий выше 60° северной и южной широты присутствуют десятки процентов воды, вероятно, в виде слоев льда (рис. 9). Границы этих ледников хорошо совпали с границей современной изотермы приповерхностного слоя вещества, соответствующей современному условию сохранения ледяной вечной мерзлоты. При периодических изменениях климата Марса вследствие цикла Миланковича границы приполярной вечной мерзлоты должны изменяться. Поэтому современная приполярная вода много раз прошла через процессы испарения

и замерзания, и ее состав должен соответствовать условиям современной Амазонийской эпохи. Надежда найти фрагменты жизни палеонтологической эпохи в современных приполярных ледниках невелика.

На карте водных ресурсов, полученной на основе данных проекта *Mars Odyssey* (рис. 10), также присутствуют районы с повышенным содержанием воды вблизи экватора – это, например, территория Арабии. Можно предположить, что вода в грунте таких районов не отображает условия современной климатической эпохи, а сохраняет состав, соответствующий более ранней геологической эпохе формирования этих районов.

Детекторы нейтронов HEND и гамма-лучей GRS на борту орбитального аппарата NASA *Mars Odyssey*²⁷ являются всенаправленными, поэтому пространственное разрешение карт распространности воды по данным их измере-

²⁷ Boynton W. et al. Distribution of Hydrogen in the Near Surface of Mars: Evidence for Subsurface Ice Deposits // *Science*, 2002. V. 297, issue 5578. P. 81; Mitrofanov I.G. et al. Maps of Subsurface Hydrogen from the High Energy Neutron Detector, Mars Odyssey // *Science*, 2002. V. 297, issue 5578. P. 78.

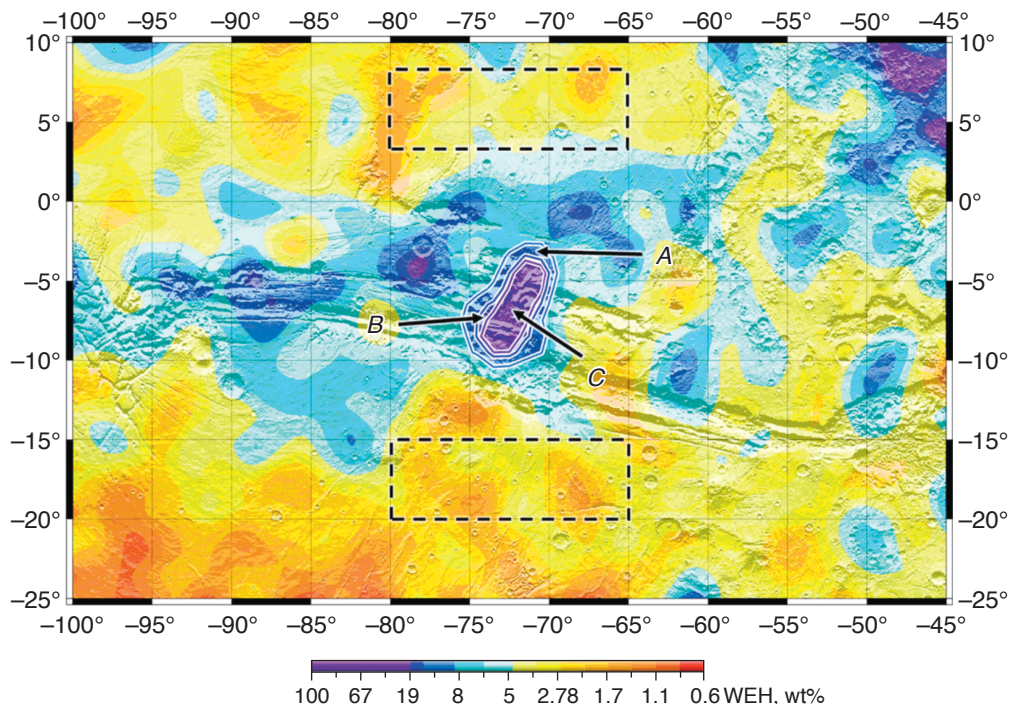


Рис. 11. Локальный «оазис» на дне каньона Маринера (Valles Marineris) с содержанием воды около десятков % по массе согласно эквивалентной концентрации водорода, WEH (на нижней шкале). А, В, С обозначают внешний, промежуточный и внутренний районы «оазиса» с оценками содержания воды $7.0^{+4.1}_{-2.2}\%$, $12.4^{+23.4}_{-5.9}\%$ и $40.3^{+59.7}_{-24.2}\%$ соответственно. Пунктиром выделены сухие области в окрестности каньона для сравнения. В них массовая доля воды составляет около 2%. ИКИ РАН

ний имеют низкое пространственное разрешение, порядка 600 км. Такого разрешения недостаточно для поиска локальных «оазисов» на марсианской поверхности, в которых большой геологический возраст поверхности сопровождается благоприятными морфологическими условиями для сохранности древних ледников.

Для разведки таких «оазисов» в ИКИ РАН был разработан нейтронный телескоп FRENД²⁸, для которого пространственное разрешение картографирования потока нейтронов составляет порядка нескольких десятков километров. В 2016 г. этот телескоп улетел на борту AMC Trace Gas Orbiter (орбитальный аппарат для исследования газов малых

концентраций в атмосфере Марса) по международной программе «Экзо-Марс»²⁸. Благодаря продолжительной работе прибора на марсианской орбите с 2018 г. по настоящее время были накоплены наблюдательные данные, достаточные для поиска и статистически достоверного отождествления вероятных «оазисов» на марсианской поверхности с очень высокой массовой долей воды.

²⁸ Родионов Д.С., Зелёный Л.М., Кораблёв О.И. Проект «ЭкзоМарс» // Земля и Вселенная. 2016. № 3. С. 3–20; Mitrofanov I.G. et al. Fine Resolution Epithermal Neutron Detector (FRENД) Onboard the ExoMars Trace Gas Orbiter // Space Science Reviews, 2018. V. 214. P. 86.

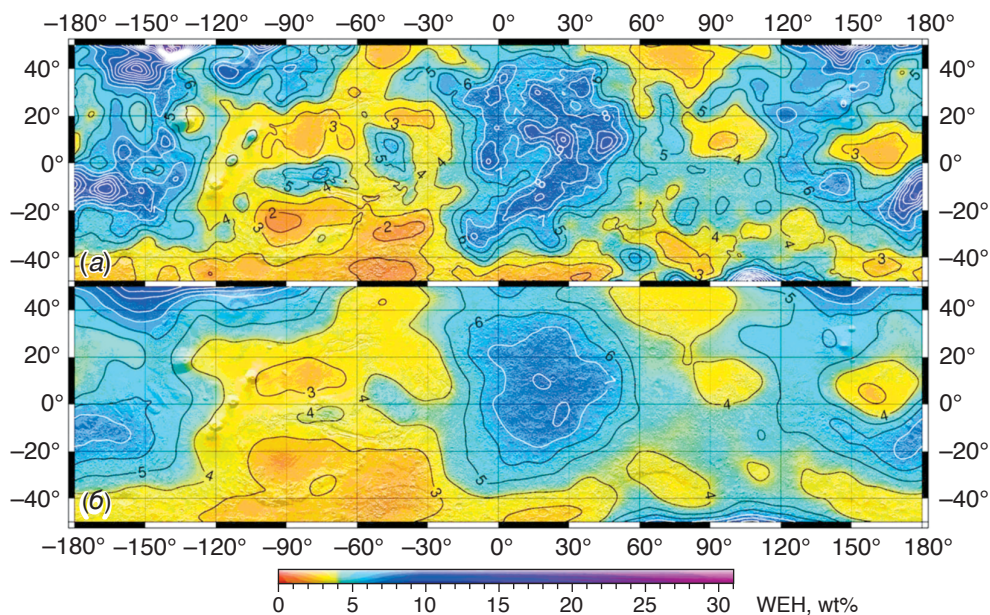


Рис. 12. Карты распространности воды в грунте Марса в единицах массовой доли в % согласно эквивалентной концентрации водорода (WEH). Верхняя карта (а) построена по данным измерений прибора FREND, нижняя (б) – измерений прибора HEND. ИКИ РАН, 2022

В 2022 г. была составлена карта распространности воды в каньоне Маринера, образовавшегося в Гесперийскую эпоху марсианских глобальных катастроф. Для вещества на дне каньона оценка массовой доли воды составляет около нескольких десятков процентов²⁹ (рис. 11). Такая большая доля указывает на то, что вода вероятно присутствует в фазе свободного льда – она слишком велика для отождествления с водой в гидратированных минералах. Учитывая древний возраст каньона, можно предположить, что вещество на его дне соответствует Нойскому или раннему

Гесперийскому периодам. Если в эти периоды на Марсе была примитивная жизнь, то ее реликтовые фрагменты в мерзлом веществе могут быть обнаружены высокоточными методами химического анализа.

Следует отметить, что в настоящее время на нейтронных картах, построенных по данным прибора FREND²⁸ (рис. 12), обнаружены еще несколько аналогичных локальных районов, для которых оценки содержания воды также соответствуют высоким значениям. Таким образом, локальные районы на дне каньона Маринериса и другие похожие районы с высоким содержанием воды в грунте Нойской или Гесперийской эпохи представляются наиболее интересными для поиска в них реликтовых органических фрагментов древней марсианской жизни. Для такого анализа образцы грунта должны быть доставлены в исследовательские

²⁹ Mitrofanov I.G. et al. The evidence for unusually high hydrogen abundance in the central part of Valles Marineris of Mars // *Icarus*, 2022. V. 374, P. 114805; Malakhov A.V. et al. High Resolution Map of Water in the Martian Regolith Observed by FRENED Neutron Telescope Onboard ExoMars TGO // *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2022. V. 127, issue 5, e2022JE007258.

лаборатории на Земле с максимальной чувствительной аппаратурой. Можно ожидать, что такие проекты в конце будущего десятилетия завершат этап исследований Марса космическими автоматами. В зависимости от полученных в нем ответов на вопрос «есть ли жизнь на Марсе?» дальнейшие исследования Марса будут иметь разное содержание.

АСТРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ МАРСА³⁰

В настоящее время эволюционные биологи предполагают, что все прошлые и нынешние живые организмы на Земле

Организмы LUCA жили на Земле около 3.5–4.0 млрд лет тому назад, и их свойства были выяснены методом проекции назад во времени эволюционных трендов современных организмов. LUCA были достаточно сложно устроены, причем некоторые из их свойств представляются вполне случайными (например, присутствие только вполне определенных типов ДНК из большой совокупности всех возможных, или *гомохиральность* биологических соединений).

Концепция LUCA как общего предка всего живого на Земле ставит перед исследователями множество вопросов. Неизвестно, как происходила ранняя эволюция жизни до LUCA. Также необходимо создать модель расщепления

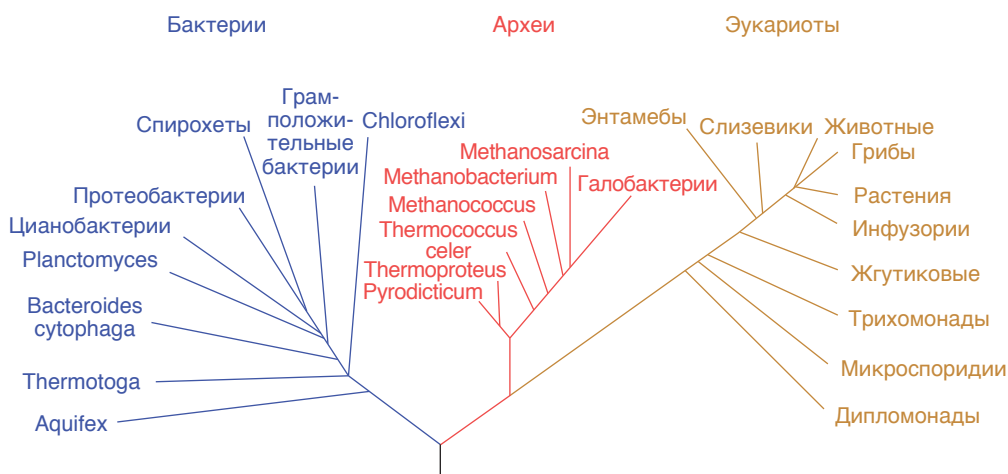


Рис. 13. Вероятная схема эволюции земной формы жизни

произошли от «последнего универсального общего предка»³¹ (Last Universal Common Ancestor, LUCA) (рис. 13).

³⁰ Часть текста этого раздела заимствована из статьи (Митрофанов И.Г. Поиски внеземной жизни в солнечной системе: статус и перспективы // *Астрономический журнал*, 2017. Т. 94. С. 315), посвященной 100-летию юбилею выдающегося советского астрофизика члена-корреспондента АН СССР И.С. Шкловского.

процесса эволюции после LUCA, который привел к возникновению двух различных доменов простейших организмов – бактерий и архей. Требуется объяснения качественный эволюционный скачок, который привел к возникновению домена одноклеточных организмов – эукариотов, которые явились заключительным этапом эволюции простейших. Последовавшая после этого эволюция была связана

с возникновением многоклеточных организмов с функциональной дифференциацией различных клеток. Очень важным для понимания механизма процесса эволюции до и после LUCA является вопрос о возможном параллельном существовании нескольких видов простейших организмов с качественно разной биохимической структурой, которые пропали, «не дав потомства». Их присутствие могло быть важным условием эволюции основной формы жизни на основе механизма горизонтального переноса генов.

Тайна эволюции жизни представляется не менее интригующей, чем тайна ее возникновения. И.С. Шкловский не верил в дарвиновский естественный отбор как необходимый и достаточный механизм эволюции³¹. Он писал: «Создается впечатление, что наряду с естественным отбором в эволюции жизни на Земле действуют какие-то факторы, роль которых пока еще окончательно не выяснена». Что же это за «какие-то» другие факторы, как работает механизм эволюции, если механистически простой механизм естественного отбора не может объяснить качественные скачки и этапы эволюционного процесса? Экспериментально проследить последовательность раннего эволюционного процесса нам не дано, так как в нашем распоряжении нет машины времени для исследований свойств и процессов биосферы эпохи LUCA на ранней Земле. Однако такую машину времени астробиологам могут предоставить космические исследования, их объектом должен стать Марс.

Как уже отмечалось, наиболее перспективным направлением решения вопроса о существовании жизни на Марсе представляется изучение вещества из «оазисов» его вечной мерзлоты.



Рис. 14. Поверхность древнего Марса могла быть покрыта первичным океаном. Cloelia Andronicus // Nature Geoscience

Если в первичном океане раннего Марса (рис. 14) возникла жизнь, то в этом океане должна была образоваться насыщенная микроорганизмами биосфера. Известно, что в каждом литре воды современного земного океана содержатся около 10 тыс. бактерий³². Можно ожидать, что в биосфере раннего океана Марса это число было аналогичным. Фрагменты и химические соединения от составлявших марсианскую биосферу организмов должны сохраниться во льдах современной вечной мерзлоты. Космические проекты в ближайшие 10–15 лет должны доставить на Землю образцы марсианской вечной мерзлоты. Биохимические исследования ее состава позволят заглянуть в раннюю марсианскую эпоху и выяснить, была ли на раннем Марсе жизнь, как она была устроена и по какому сценарию происходила ее первичная эволюция. Имеются три альтернативных варианта результатов таких исследований, каждый из которых окажет огромное

³¹ Шкловский И.С. Вселенная, жизнь, разум. 6-е изд. М.: Наука, Физматлит, 1987.

³² «Census of Marine Life News Release»: September 2010.

влияние на будущее развитие естествознания.

Первый вариант соответствует экспериментальному доказательству отсутствия в марсианском веществе каких-либо признаков древней жизни. Этот факт поставит перед исследователями достаточно трудный вопрос: почему на раннем Марсе не произошло событие зарождения жизни, которое когда-то случилось на ранней Земле? Экспериментальное доказательство того, что на Марсе нет и никогда не было жизни, окажет огромное воздействие на философские и естественнонаучные представления о нашем месте во Вселенной. Изучая безжизненный образец марсианской вечной мерзлоты, будущий исследователь повторит знаменитый вопрос Энрико Ферми: «Где они все?»³³ И испытает чувство вселенского одиночества.

³³ Парадокс Ферми – отсутствие видимых следов деятельности внеземных цивилизаций (ВЦ), которые должны были бы расселиться по всей Вселенной за миллиарды лет ее развития. Парадокс был предложен Нобелевским лауреатом, физиком Энрико Ферми (1901–1954), который подверг сомнению возможность обнаружения ВЦ, и связан с попыткой ответить на один из важнейших вопросов современности: «Является ли человечество единственной технологически развитой цивилизацией во Вселенной?» Попыткой ответа на этот вопрос служит уравнение Дрейка, которое оценивает возможное количество ВЦ, способных вступить в контакт. Оно может давать при некоторых значениях неизвестных параметров довольно высокую оценку шансам на такую встречу. На подобные выводы Ферми ответил, что если в Галактике есть ВЦ, то возникает вопрос: «Где они? Почему мы не наблюдаем никаких следов разумной внеземной жизни?» Парадокс заключается в том, что, с одной стороны, выдвигаются аргументы за то, что должно существовать множество технологически развитых ВЦ, с другой – нет этому подтверждения. Ситуация парадоксальная: или наше понимание природы жизни неверно, или наши наблюдения неполны. Если предположить, что ВЦ все же существуют, тогда либо они очень редки, либо обладают достаточно сложными технологиями, чтобы оставаться скрытыми от людей.

Если же реликтовые признаки марсианских микроорганизмов будут обнаружены, то в естествознании наступит новая эра. Впервые у естествоиспытателей появится возможность сопоставить две формы «живого», возникшие на разных небесных телах. Такому развитию событий соответствуют второй и третий варианты результатов исследований марсианской вечной мерзлоты.

Второму варианту соответствует случай, когда структура и биохимия марсианских живых организмов окажутся похожими на земные организмы древнего поколения LUCA (рис. 15) (*вариант сходства*). Отсюда последует вывод, что жизнь на Земле и на Марсе имеет общее происхождение. Либо жизнь возникла на Земле и была перенесена на Марс земными метеоритами, либо наоборот – жизнь вначале возникла на Марсе и была в марсианских метеоритах доставлена на Землю, либо, и это самое интересное, – межзвездные споры жизни были доставлены на обе планеты Солнечной системы кометами или астероидами из межзвездной среды. Сопоставление биологических структур с Земли и с Марса позволит выяснить универсальный характер законов возникновения и первичной эволюции жизни,

Рис. 15. Воображаемая картина колонии LUCA на молодой Земле





Рис. 16. Изображение ядра кометы 67P Чурюмова–Герасименко, сделанное камерой OSIRIS AMC Rosetta 17 марта 2015 г. ESA

того самого «качественного скачка от неживого к живому», о котором писал И.С. Шкловский. Астробиологи будут развивать механизмы кометной или астероидной транспортировки спор жизни в межпланетной или межзвездной среде, а астрономы будут активно искать сигналы от похожих на нас братьев по разуму.

Наконец, может реализоваться третий вариант: обнаруженные в марсианской вечной мерзлоте реликтовые биохимические структуры могут оказаться непохожими на земные (*вариант различия*). В этом случае у эволюционных биологов появится возможность экспериментально изучить альтернативный земному процесс зарождения и ранней эволюции жизни, выяснить общие и индивидуальные законы функционирования и развития живого. Вероятно, будет построена биохимическая модель возможного продолжения прервавшейся эволюции марсианской жизни, будет сконструирована концепция альтернативной биосферы, которой мог бы обладать современный Марс, если бы он избежал произошедшей с ним ката-

строфы. Возникновение жизни на экзопланетах будет рассматриваться как вполне вероятное событие с большим многообразием случайно реализовавшихся на них форм живого.

ЗНАЧЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ЛУНЫ ДЛЯ ВЫЯСНЕНИЯ ВОПРОСА О ЖИЗНИ НА МАРСЕ³⁴

В случае обнаружения признаков существования марсианской жизни вопрос о сходстве или различии земной и марсианской форм может быть решен благодаря исследованию состава образцов вечной мерзлоты с полярных районов Луны³⁵. Дело в том, что значительная доля воды в полярном реголите Луны могла быть принесена кометами или астероидами.

Изучение биохимических свойств «кометной» воды для современного естествознания представляет особый интерес (см. обзор³⁶). Оно позволит выяснить состав органических и предбиологических соединений космического происхождения в исходном протопланетном облаке. Наибольший интерес представляют кометные молекулы синильной кислоты HCN. Известно, что это простое химическое вещество может оказаться исходным компонентом для образования аминокислот.

³⁴ Часть текста этого раздела включена из доклада автора (Митрофанов И.Г. Происхождение земной жизни и космический проект «Луна-28» // Космические исследования, 2024. Т. 58, вып. 1. С. 72) на конференции по астробиологии, посвященной выдающемуся советскому и российскому астроному академику М.Я. Марову (1933–2023).

³⁵ Шевченко В.В. Вода сухой Луны // Земля и Вселенная, 2010, № 4. С. 3–17. Митрофанов И.Г. Вода на Луне и Меркурии // Земля и Вселенная, 2013, № 1. С. 3–15.

³⁶ McKay A.J., Roth N.H. Organic Matter in Cometary Environment // Life (Basel), 2021. V. 11(1). P. 37.

Согласно наблюдениям, массовая доля синильной кислоты относительно воды в кометном веществе составляет 0.1–0.2%. Такое биологически активное вещество как формальдегид H_2CO также достаточно распространено в водной кометном веществе. Его массовая доля для разных комет составляет 0.04–1.3%. Метанол CH_3OH также представляет собой химическую структуру, подходящую для формирования в первичном земном океане сложных органических молекул. При этом метанол в кометной воде является одним из наиболее распространенных органических соединений, его массовая доля для разных комет составляет 0.4–6.2% относительно массовой доли воды. Известно, что в кометах также наблюдаются такие гидрокарбонаты, как метан CH_4 , ацетилен C_2H_2 и этан C_2H_6 . Содержание этих летучих веществ в кометном льду составляет доли процента относительно массовой доли воды.

Кроме перечисленных выше в веществе комет также были обнаружены многие другие органические соединения³⁷. Очевидно, что среди них наибольший интерес вызвало открытие в веществе комет аминокислоты глицин. Имеются наблюдательные указания на присутствие в кометном веществе таких сложных органических соединений, как полициклические ароматические гидрокарбонаты и соединения типа CHON (объединяющее название для соединений углерода (C), водорода (H), кислорода (O) и азота (N)). Наиболее надежные данные об обнаружении гидрокарбонатов в форме толурола были получены в эксперименте на борту посадочного аппарата Philae AMC Rosetta (ESA; 2004–2016) для кометы Чурюмова–Герасименко

67P³⁸ (рис. 16). В масс-спектрометрическом эксперименте PUMA органические соединения CHON наблюдались в качестве компоненты в составе кометных пылинок, испускаемых ядром кометы Галлея³⁹.

Природу исходного органического вещества в ядрах комет еще предстоит изучить. Кометы образовались на заключительной фазе формирования Солнечной планетной системы из протопланетного облака, которое, в свою очередь, возникло после зарождения Солнца из протозвездного облака в нашей галактической окрестности. Поэтому вещество кометных льдов и замороженных в них органических соединений имеет межзвездное происхождение. В эпоху «великой бомбардировки» поток комет во внутренней области Солнечной системы был очень велик, и все три небесных тела Земля, Марс и Луна испытывали частые столкновения с кометами. На ранних Земле и Марсе кометы встречала плотная атмосфера – они нагревались, взрывались и испарялись. Можно предположить, что часть кометной органики в итоге долетала до вод первичного океана без разрушения. Эти молекулы могли обеспечить старт процесса возникновения первичной жизни. На Луне взрывы комет после столкновения формировали временную атмосферу, вещество которой постепенно конденсировалось на лунной поверхности. Оно накапливалось

³⁸ Чурюмов К.И., Зелёный Л.М., Ксанфомали-ти Л.В. «Розетта» исследует комету Чурюмова–Герасименко // Земля и Вселенная. 2015. № 4. С. 3–22; Altwegg K., Balsiger H. et al. Organics in comet 67P – A first comparative analysis of mass spectra from ROSINA-DFMS, COSAC and Ptolemy // Mon. Not. R. Astron. Soc., 2017. V. 469. P. 130–141.

³⁹ Kissel J., Krueger F. The organic component in dust from Comet Halley as measured by the PUMA mass-spectrometer // Nature, 1987. V. 326. P. 755–760.

³⁷ Викторова Л. Из чего состоит комета? // Химия и Жизнь. 2016. № 2. С. 31.

в «холодных ловушках» в окрестностях лунных полюсов. В результате большого числа кометных столкновений в полярной «вечной мерзлоте» могла накопиться значительная доля кометной воды, сохранившей принесенные на Луну межзвездные органические соединения.

Представленные соображения можно сформулировать в виде утверждения, основанного на гипотезе панспермии: кометные столкновения в ранние периоды эволюции Солнечной системы приносили на Землю, Марс и Луну одинаковые предбиологические органические соединения. На Луне вместе с кометной водой они конденсировались в естественных рефрижераторах полярных ледников. На Земле и Марсе они попадали в теплые воды естественного инкубатора первичного океана и инициировала зарождение жизни. Поэтому поиски признаков жизни на Марсе должны сопровождаться анализом состава вещества, доставленного из полярных районов Луны.

МАРСИАНСКИЕ ПИЛОТИРУЕМЫЕ ЭКСПЕДИЦИИ

До тех пор, пока не будет решен вопрос о существовании или отсутствии на Марсе реликтовых форм жизни, реализация марсианских пилотируемых экспедиций представляется потенциально опасной для жизни на Земле. Возврат на Землю экипажа и бортовой аппаратуры может доставить в земную биосферу чужеродные биологически активные структуры, присутствие которых может иметь для нее отрицательные последствия.

Аналогичный риск, но, вероятно, в гораздо меньшей степени, связан с возвратом на Землю потенциально опасных образцов марсианского вещества на автоматических аппаратах. Страхи от возможности такого события

были в крайне эмоциональной форме выражены в 2017 г. голливудскими кинематографистами в фантастическом фильме-катастрофе «Живое».

Очевидно, что проекты по доставке на Землю марсианского вещества будут так или иначе реализованы уже в обозримой перспективе (см. выше). В этом случае необходимо применить специальные меры предосторожности, обеспечивающие полную изоляцию доставленных образцов от внешней среды. Наиболее радикальным решением этого вопроса может быть возврат марсианского аппарата на Луну для последующих исследований доставленного вещества в лунной биохимической лаборатории.

На опасения о доставке космическими аппаратами на Землю инородной формы жизни в марсианском веществе могут возразить, что такое вещество на Земле уже есть – это марсианские метеориты. Их около 300, они образовались во время глобальных марсианских катаклизмов, вероятнее всего – во время катастрофических столкновений, и прибыли на Землю после длительных перелетов в межпланетном пространстве. Но условия такой доставки марсианского вещества гораздо более жесткие, чем на борту комфортабельного космического аппарата. Во-первых, метеорит образовался во время столкновения небесного тела с поверхностью в случайном районе Марса. Во-вторых, во время продолжительного перелета он прошел радиационную стерилизацию. В-третьих, его прибытие на Землю также сопровождалось разогревом и фрагментацией. Хотя метеоритный транспорт марсианского вещества на Землю нельзя исключить, его эффективность очень мала.

Обсуждая целесообразность марсианских пилотируемых экспедиций в среднесрочной перспективе, нужно сопоставить потенциальные риски от загрязнения нашей биосферы внезем-



Рис. 17. Колония людей на Марсе. Рисунок с конкурса дизайна города-штата Марс в США, 2020

ной формой жизни – с одной стороны, с пользой от получения дополнительных новых знаний о Марсе благодаря непосредственному участию людей – с другой. Представляется, что аргументы в пользу пилотируемых экспедиций проигрывают. Современные технологии позволяют создавать научную аппаратуру, которая сможет успешно проводить исследования Марса по заданию людей, но без их непосредственного участия.

Особняком стоит стратегический вопрос о подготовительных полетах на Марс для создания на нем в далекой перспективе человеческой колонии и террапреобразования природной среды на этой планете. Но и в этом случае есть огромный риск – потенциально возможное наличие на современном Марсе «оазисов» с реликтовыми формами примитивной жизни может направить этот процесс в неблагоприятном направлении. Возникающая в ходе террапреобразования реликтовая биосфера Марса может оказаться вовсе недружелюбной для земной жизни.

Представляется, что на сегодняшний день основным направлением развития пилотируемой космонавтики должна стать Луна. В обозримой перспективе наш естественный спутник станет единственным небесным объектом, для которого его изучение будет сопрово-

ждаться долгосрочным освоением. Луна постепенно превратится во внеземной континент нашей цивилизации, в ресурсную и научно-промышленную космическую территорию землян.

Параллельно изучению и освоению самой Луны будут изучаться медико-биологические эффекты продолжительного пребывания людей вне земной биосферы – в условиях отсутствия магнитного поля, пониженной гравитации и постоянной космической

радиации. Только после изучения этих эффектов полеты людей на Марс приобретут допустимый уровень биологической безопасности. И тогда встанет вопрос о стратегической целесообразности пилотируемых марсианских полетов даже в самой удаленной перспективе⁴⁰ (рис. 17). Основным аргументом сторонников колонизации Марса является тезис о «запасной планете» на случай столкновения Земли с крупным астероидом. Известно, что такие события уже имели место в прошлом. Однако цели колонизации Марса вполне может быть сопоставлена цель сохранения нашей «голубой планеты» благодаря созданию необходимых космических средств предотвращения астероидной угрозы методом коррекции орбит потенциально опасных небесных тел.

Наступит время, когда выбор между этими целями будет сделан. А пока ответ на сакраментальный вопрос о существовании жизни на Марсе представляется необходимым условием до отправки туда людей. И решение этого вопроса вполне может быть обеспечено автоматами.

⁴⁰ Герасютин С.А. Почему сегодня невозможно марсианская экспедиция // Земля и Вселенная. 2022. № 5. С. 65–87; Герасютин С.А. Стремление ввысь. Очерки космонавтики. М.: Ноократия, 2024. С. 579–603.