

*Баймахан Р. Б., докт. техн. наук, профессор
brysbekbai@gmail.com*

Мута А. Н., mutita@mail.ru

Тилейхан А.,

*Казахский национальный женский
педагогический университет, Казахстан*

Кожоголов К. Ч., НАН КР, Кыргызстан

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ РАЗВИТИЕ МАРСА: ПРОШЛОЕ И НАСТОЯЩЕЕ

В этой статье делается попытка обобщить основные моменты геологии Марса и указать на более глубокие и обширные источники важных научных достижений и будущих исследований. Знания о марсианской геологии чрезвычайно расширились за последние годы. Несколько миссий, вращающихся вокруг Марса или путешествующих по Марсу, произвели революцию в нашем понимании его эволюции и геологических особенностей, во многом похожих на Землю, но во многих отношениях совершенно отличающихся. Впечатляющая дихотомия между двумя марсианскими полушариями, связана с его историей образования кратеров от ударов, а не с внутренней динамикой, такой как на Земле. Вулканизм Марса был обширным, очень долгоживущим и довольно постоянным в своих условиях. Вода была доступна в больших количествах в далеком прошлом Марса, когда магнитное поле и более мощная тектоника были активны. Экзогенные силы формировали марсианские ландшафты и привели к множеству ландшафтов, сформированных ветром, водой и льдом. Динамическое поведение Марса продолжается, с его климатическими вариациями, влияющими на климат и геологию до самого недавнего времени.

Ключевые слова: *Марс, геология, Земля, красная планета, спутники.*

Баймахан Р. Б., *тех. илим. докт., проф.*
brysbekbai@gmail.com
Мута А. Н., *mutita@mail.ru*
Тилейхан А.,
Казак улуттук кыз-келиндер
педагогикалык университети, Казакстан
Кожоголов К. Ч., КР УИА, Кыргызстан

МАРСТЫН ГЕОЛОГИЯЛЫК ӨНҮГҮШҮ: ӨТКӨНҮ ЖАНА АЗЫРКЫСЫ

Макалада Марстын геологиясынын негизги моменттерин жалпылоого, маанилүү илимий жетишкендиктердин жана келечектеги изилдөөлөрдүн терең жана кеңири булактарын көрсөтүүгө аракет жасалат. Акыркы жылдары Марстын геологиясы жөнүндө билим абдан кеңейди. Марстын айланасында же Марста саякаттап жүргөн бир нече миссиялар анын жерге окшош, бирок көп жагынан таптакыр айырмаланган эволюциясы жана геологиялык өзгөчөлүктөрү жөнүндө түшүнүгүбүздү түп-тамырынан өзгөрттү. Марстын эки жарым шарынын ортосундагы таасирдүү дихотомия жердегидей ички динамикага эмес, урулуулардан кратерлердин пайда болуу тарыхына байланыштуу. Марстын вулканизми кеңири, өтө узак жашоочу жана өз шарттарында туруктуу болуп эсептелет. Магнит талаасы жана кыйла күчтүү тектоника активдүү болгон өткөн мезгилдеринде Марста суу көп болгон. Экзогендик күчтөр Марстын пейзаждарын калыптандырып, шамал, суу жана муздан улам пайда болгон көптөгөн пейзаждарга алып келген. Марстын жакынкы мезгилдерге чейин эле климатына жана геологиясына таасир тийгизген климаттык вариациялары бар динамикалык кыймылы уланууда.

Өзөктүү сөздөр: *Марс, геология, Жер, кызыл планета, жандоочулар.*

Baimahan R. B., d.t.s., prof.,
brysbekbai@gmail.com
Muta A. N., mutita@mail.ru
Tileihan A., Kazah state women's
pedagogical university, Kazakhstan
Kojogolov K. Ch. KR Academy of science, Kyrgyzstan

GEOLOGICAL DEVELOPMENT OF MARS: IN THE PAST AND PRESENT

This article attempts to summarize the main points of the geology of Mars and point to deeper and more extensive sources of important scientific achievements and future research. Knowledge of Martian geology has expanded enormously in recent years. Several missions orbiting Mars or traveling on Mars have revolutionized our understanding of its evolution and geological features, similar in many ways to Earth, but in many ways completely different. The impressive dichotomy between the two Martian hemispheres is most likely due to its history of impact crater formation, rather than internal dynamics such as on Earth. The volcanism of Mars was extensive, very long-lived and fairly constant in its conditions. Water

was available in large quantities in the distant past of Mars, when the magnetic field and more powerful tectonics were active. Exogenous forces shaped the Martian landscapes and led to many landscapes formed by wind, water and ice.

Keywords: Mars, geology, Earth, red planet, satellites.

Несмотря на половину размера Земли (рисунок 1.), Марс имеет удивительно богатую и сложную сохранившуюся геологическую летопись, охватывающую временной промежуток, возможно, больший, чем на Земле, где она была безвозвратно утеряна из-за непрерывной рециркуляции земной коры, осуществляемой земной тектоникой плит [1,2]. Наши знания о геологии Марса стремительно растут, но большая часть того, что мы знаем, уходит своими корнями в планетарные исследования 60-х и 70-х годов. Крупнейшую революцию в наших знаниях о Марсе со времен телескопических наблюдений произвели две миссии «Викинг», хотя телескопические кампании все еще широко использовались в 90-х годах. В частности, знания о глобальной геологии и стратиграфии получили огромную пользу от тогдашнего огромного набора данных, собранных Викинг. В эпоху после эпохи викингов, в 80-х и 90-х годах нашего прошлого века, этот относительно ограниченный набор данных, анализ и использование в течение нескольких лет, дали долгосрочные результаты во всех геологических и смежных дисциплинах. Большинство из них удивительно сопротивлялись десятилетиям более новым данным, некоторые меньше. В настоящее время, после еще примерно 10 успешных миссий, мы стоим перед огромным набором данных, которые необходимо переварить [2,3].



Рисунок 1. Полные диски сравниваются в одном масштабе: А. Земля, массы суши, океаны и облака видны (NASA Apollo 17 picture, 1972) В. Марс, видны высотные ледяные облака CO₂ (ESA Rosetta Osiris image, 2007) С. Луна (NASA Clementine UVIS mosaic, 1994).

Объединенные результаты Викинга и последующих миссий позволили обновить наши знания о геологии Марса. В этом отношении

изучение земных аналогов с точки зрения форм рельефа и процессов также помогло нашему пониманию геологии Марса, предоставив ограничения на условия формирования нескольких форм рельефа и месторождений. В настоящее время мы приближаемся к полевым наблюдениям Марса как с орбитальных, так и с марсоходных платформ (рисунок 2), но многие вопросы остаются до сих пор без ответа, такие как фактическое количество и время прошлого жидкой воды на поверхности и под ней, точные механизмы изменения горных пород, природа обширных слоистых отложений в долине Маринер и в других местах, а также фактический состав и точная изменчивость марсианской коры, и это лишь некоторые из них. Тем не менее, был достигнут огромный прогресс в области гиперспектрального анализа и идентификации местной минералогии с орбиты [4].

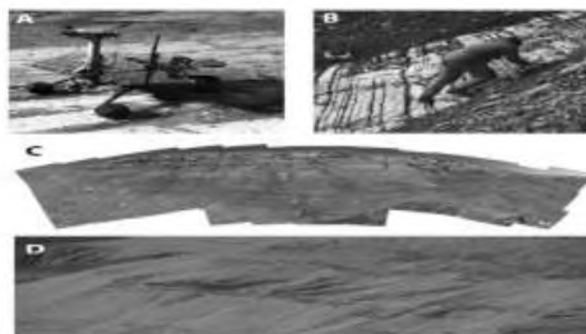


Рисунок 2. Геологические наблюдения на Земле и планеторазведке: А. Марсианское обнажение и планетарный дистанционно управляемый робот-геолог (NASA Mars Exploration Rover рендеринг над реальной местностью, сфотографированной MER Opportunity); Б. Земное обнажение и геолог за работой (фото М. Пондрелли). Масштаб обоих изображений схож; С. Фотомозаика марсианского обнажения, сфотографированная марсоходом NASA Mars Exploration Rover Opportunity (источник: NASA Photojournal no. PIA07110) D. Меловые приливные песчаные волны с острова Элсмир (фото Г. Г. Опу)

Первая поразительная глобальная характеристика Марса — его полушарие дихотомия, который отделяет низменное северное полушарие, по-видимому, обедненное кратерами, от высокого южного, с отчетливыми ударными кратерами и впадинами (рисунок 3). Геологические эпохи на Марсе (рисунок 4) явно намного грубее, чем на Земле и включают: ноахиан (4.65–3.7 лет), геспериан (3.7–3.0 лет) и амазонской (3.0 лет - настоящее). За свою 4,6 млрд лет истории Марс испытал крупномасштабный вулканизм и отсутствие тектоники плит или других средств для повторного использования его литосфера сохранил свою вулканическую летопись почти нетронутой, включая колоссальные

вулканические постройки и обширные флудные базальты. С пиками в ноях и гесперианах, марсианский вулканизм, возможно, был активен несколько десятков миллионов лет назад. Тектоническая деформация также была тесно связана с активным вулканизмом Марса, возможно, до относительно недавнего времени, в некоторых случаях. Выдающимися земными особенностями, видимыми в большом масштабе на Марсе, являются каналы и долины, вырезанные проточной водой на ранних этапах геологической истории Марса, такие как так называемые каналы оттока. До недавнего времени свидетельства прошлой деятельности, связанной с водными ресурсами, носили в основном геоморфологический характер. Менее чем за десятилетие гиперспектральные данные о составе подтверждают идею древнего богатого водой Марса [1-5].

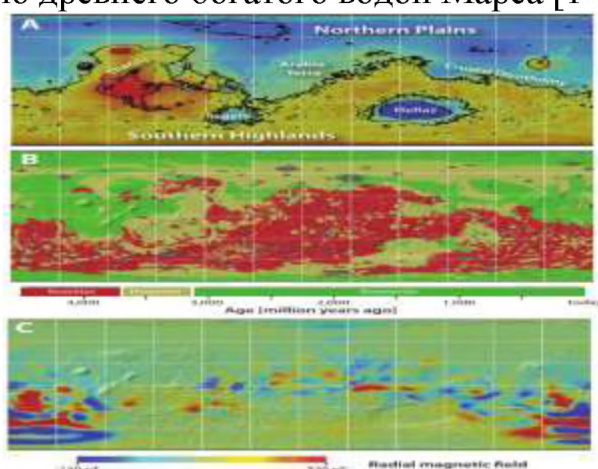


Рисунок 3. А. Глобальный заштрихованный рельеф с цветовой кодировкой (синий = низкий, красный = высокий). Указаны топографические изолинии с интервалом 5 км. Так называемая граница дихотомии земной коры находится примерно на границе между желтоватыми и зеленоватыми областями, где расположен нулевой контур отсчета (данные NASA Mars Global Surveyor (MGS) Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA), Smith et al. (1999)); Б. Упрощенная глобальная геологическая карта с указанием трех основных эпох на Марсе: Ноахиан (4.65–3.7 лет), геспериан (3.7–3.0 лет) и амазонской (3.0 лет–настоящее время) (данные Скотта и Танаки (1986); Грили и Гест (1987)); С. Радиальное магнитное поле, измеренное магнитометром MGS. Интенсивная остаточная намагниченность в древней коре Марса вызывает сильные магнитные аномалии Cooperney et al. (1999).

Орбита Марса слегка эллиптическая с большой полуосью 1,52 а.е. и расстоянием 1,381 а.е. в перигелии и 1,666 а.е. в афелии. Как и у Земли, ось вращения наклонена на $25,19^\circ$ (наклон Земли в настоящее время составляет $23,44^\circ$) и претерпевает значительные колебания между 15° до

35° с периодом 105 лет. Наклоны до 60° привести к более высокому солнечному потоку в полярных районах и, как следствие, к переотложению полярных льдов в средние широты. Эксцентриситет орбиты Марса составляет около 0,093°, а его орбита наклонена на 1,85° по отношению к эклиптике, что приводит к более ярко выраженным временам года по сравнению с Землей с длинной и холодной зимой в южном полушарии (т.е. ярко выраженным летом в северном полушарии продолжительностью 183 земных дня) и более коротким и теплым летом в южном полушарии (158 земных дней). Значения эксцентриситета могут значительно варьироваться и принимать значения от 0,0 до 0,15. Марсианские времена года даны не в месяцах, а в виде аэроцентрической долготы Солнца в градусах (солнечная долгота, L_S). Весна в северном полушарии (день весеннего равноденствия) начинается в $L_S=0^\circ$ соответствует началу падения в южном полушарии. Северное летнее солнцестояние происходит в $L_S=90^\circ$ соответствует зиме в южном полушарии. Марсианский день (называемый сол) сравним с продолжительностью земного дня в 24 часа 39 минут из-за его орбиты, однако его период вращения составляет 687 дней (или 669 сол), что соответствует 1,88 земного года.

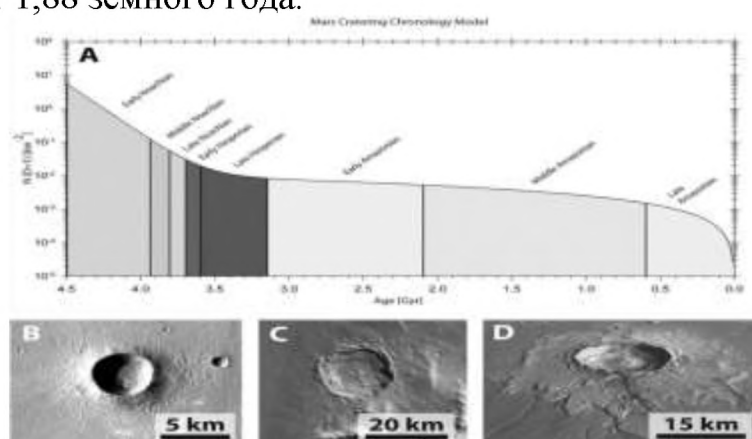


Рисунок 4. А. Модель марсианской хронологии, модифицированная по Hartmann and Neukum (2001), с указанием марсианских эр.; В. Пример свежего простого чашиобразного кратера (MRO CTX P05 002830 1511 XI 28S133W); С. Сложный кратер с центральной вершиной (полоса надира MEX HRSC с орбиты 411); D. Кратер Rampart. Такие кратеры типичны для Марса (орбита MEX HRSC 5122, вид в перспективе)

Марс имеет размер между Землей и Луной со средним радиусом $3389,5 \pm 0,2$ км, т. е. экваториальная ось $3396,19 \pm 0,1$ км и полярной оси $3376,2 \pm 0,1$ км, что привело к небольшому полярному уплощению 1:169,89, в основном полученному с помощью лазерного альтиметра Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA) на борту Mars Global Surveyor и измерений

покрытия. Площадь поверхности Марса составляет $149 \times 10^6 \text{ км}^2$ что примерно соответствует площади поверхности, покрытой массивами суши на Земле. Гравитация на поверхности Марса имеет значение $3,711 \text{ м/с}^2$, таким образом, находится между земными ($9,81 \text{ м/с}^2$) и Луна Земли ($1,63 \text{ м/с}^2$). Что касается Земли, то недра Марса дифференцируются в кору из базальтовый состав и переменная мощность 5-100 км большей мощностью в южном полушарии, мантия и ядро радиусом примерно 1300-1500 км. Отсутствие магнитного поля позволяет сделать вывод, что ядро Марса сегодня твердое. Марс считается планетой с одной плитой, не имеющей признаков тектоники плит. Глобальная физиография характеризуется ярко выраженной глобальной дихотомией с гладкими северными низменными равнинами и сильно изрытым кратерами южным полушарием. Граница дихотомии маркируется уступом, хорошо выраженным на средних долготах и менее развитым в районе вулканического поднятия Фарсис и восточной области Равнины Хрис. Топографически, Марс демонстрирует широкий диапазон высот от - 7550 м как самая глубокая точка, расположенная в ударном бассейне Hellas Planitia в восточном полушарии, до 22640 м на вершине горы Олимп, самого большого вулкана в Солнечной системе. Из-за отсутствия уровня моря эти значения зависят от используемого искусственного эталонного тела, поэтому значения до 29 км для самой высокой точки и -8,2 км для самой глубокой точки часто встречаются, когда высоты относятся к эквипотенциальной поверхности усеченной поверхности $r=3396 \text{ км}$ [1-7].

Атмосфера Марса состоит в основном из углекислого газа, 95% углекислого газа, 3% азота, 1,6% аргона, содержит следы кислорода и воды. Давление на поверхности колеблется от 6,9 до 9 мбар с пиковыми значениями 14 мбар на самой глубокой возвышенности и 0,7 мбар на вершине горы Олимп. Приземное давление значительно варьируется из-за сезонной конденсации CO_2 на полюсах, где ресублимируется до 25% атмосферы. Из-за тонкой атмосферы суточная температура поверхности колеблется от полярных -150 К до 240 К, но может достигать максимальных значений до 300 К. В этих диапазонах температуры и приземного давления CO_2 легко возгоняется поздней осенью/зимой на полюсах и ресублимируется весной и летом, так как трипельная точка углекислого газа находится при $T=216,55 \text{ К}/5,2 \text{ бар}$. Это также указывает на то, что жидкий CO_2 не может быть стабильным в марсианских условиях. В данных диапазонах давления жидкая вода, как правило, стабильна только в очень маленьком окне, и только кратковременно, но местные атмосферные воздействия могут увеличить диапазон стабильности [1-8].

У Марса есть два спутника, названные Фобос и Деймос, оба открытые в 1877 г. А. Холлом и считающиеся захваченными астероидами из главного пояса и спектрально сходными с астероидами С-типа или D-

типа. Фобос описывается трехосным эллипсоидом вращения с радиусом $13,4 \times 11,2 \times 9,2$ км и средней плотностью $1,887 \text{ г/см}^3$. Имеет слегка эксцентричную орбиту ($\epsilon=0,0151$) с периапсисом 9034 км и апоцентром 9517 км и, таким образом, находится внутри предела Роша, ведущего либо к распаду в будущем, либо к столкновению с Марсом. Его орбита слегка наклонена ($1,09^\circ$) относительно экватора Марса и Геология Марса спустя 40 лет 5 вращается вокруг Марса за 7ч39м. Благодаря синхронному вращению он всегда обращен к поверхности Марса одной и той же стороной. Деймос меньше по размеру с радиусом $7,5 \times 6,1 \times 5,2$ км, а его близкая к круговой орбита имеет большую полуось 23460 км. Средняя плотность Фобоса составляет около $1,47 \text{ г/см}^3$. Деймосу требуется 1дбч на его орбите, чтобы вращаться вокруг Марса [9,10].

На Марсе есть несколько типов вулканов, но самыми большими являются гигантские щиты, такие как Олимп Монс (рисунок 5). Щитовые вулканы на Земле образуются в местах в мантии, где поток тепла необычно высок и образуется большое количество магмы (расплавленной породы).

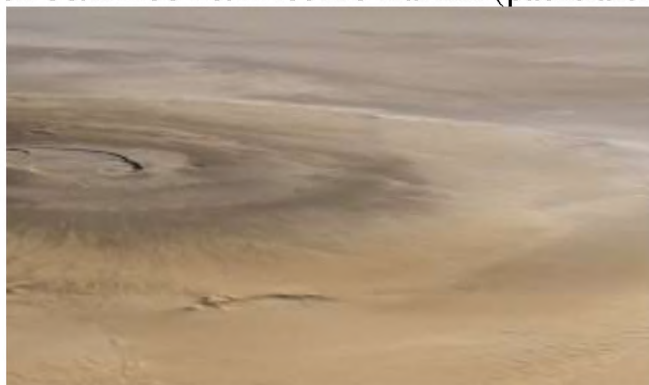


Рисунок 5. Mars Global Surveyor Mars Orbiter Camera широкоугольный синтезированный цветной снимок горы Олимп в апреле 1998 года. Север слева, восток вверху. Гора Олимп — крупнейший вулкан Солнечной системы с высотой вершины 24 км над окружающей равниной и диаметром у основания 550 км. Его окаймляет 6-километровый уступ спорного происхождения. (Источник: Malin Space Science Systems/НАСА)

Литосфера Земли состоит из ряда жестких плит, которые движутся относительно нижележащей астеносферы. В результате продолжающаяся, но слегка колеблющаяся активность в мантии может привести к образованию цепочек вулканов на поверхности, наиболее известной из которых является цепь Гавайских островов [11]. На Марсе такого крупномасштабного движения литосферы не происходило, по крайней мере, в недавнее геологическое время, поэтому в нескольких местах скопились большие объемы вулканических пород. Недавняя работа по закономерностям тепловой конвекции, ожидаемой в мантии планеты размером с Марс подразумевает, что, скорее всего, существуют две

основные области образования магмы. Это хорошо согласуется с наблюдением, что две области Марса были очень вулканически активными на протяжении последней части истории планеты. Один из них, называемый Фарсис (рисунок 6), содержит пять крупных вулканов: горы Аскрей, горы Павонис и горы Арсия выровнены вдоль широкого купола земной коры, с горой Олимп на северо-западе и гораздо более старым Сирийским плоскогорьем на юге - востоке. Другая крупная вулканическая область, Элизиум, содержит вулканы Элизиум Монс, Гекатес Толус и Альбор Толус [12].

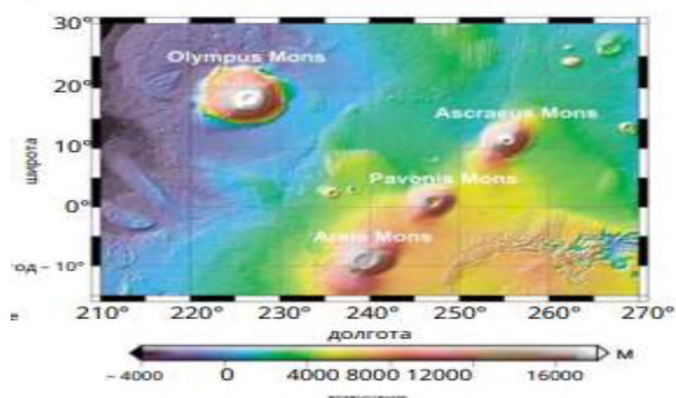


Рисунок 6. Топографическая карта Марсианского орбитального лазерного альтиметра региона Фарсис с обозначенными крупными щитовыми вулканами в планетоцентрических координатах. (Карл Митчелл, из продукта с координатной сеткой MOLA IEGDR, любезно предоставлено НАСА/Центром космических полетов имени Годдарда; программное обеспечение GMT)

Вулканические интрузии, как и питающие их резервуары магмы, имеют большое значение, когда речь идет о возможности жизни на Марсе. Температура поверхности в настоящее время ниже точки замерзания воды почти везде, почти все время, а разреженная атмосфера почти не обеспечивает защиты от потенциально смертельного солнечного ультрафиолетового излучения. Любая вода на небольшой глубине под поверхностью (возможно, до 2–3 км) также будет заморожена, образуя криосферу. Но в районах, где присутствуют магматические резервуары или интрузии, будет значительное увеличение доступного тепла, а также увеличится диапазон глубин, на которых могут выжить организмы.

Большая часть марсианского ландшафта была сформирована водой и льдом в прошлом, и даже сегодня, и обилие форм рельефа указывает на присутствие жидкой воды на поверхности Марса в ранней истории. Вблизи поверхности вода и углекислый лед сегодня присутствуют в высоких широтах и в пределах полярных шапок (рисунок 7) размер самого верхнего слоя – сезонной шапки – подвержен сезонным колебаниям. Южная и

северная полярные шапки Марса различаются по своему внешнему виду: белая северная полярная шапка имеет диаметр 800 км, тогда как южная полярная шапка имеет диаметр не более 300 км, но обе шапки простираются далеко за пределы видимой части, видимой на полярные снимки Марса. Высота этих особенностей составляет примерно 3 км над окружающей местностью [13]. Подстилающие остаточные части полярных шапок состоят из тонкослоистых отложений пылевидного материала, перемешанного с водяным льдом, и образуют остаточную единицу, называемую полярно-слоистыми отложениями, которые имеют диаметр 1000 км на севере и около 1500 км на юге. Ряд необычных форм рельефа, таких как так называемые пауки и рельеф швейцарского сыра, являются индикаторами сезонных процессов, связанных с исчезновением и отложением льда из углекислого газа. В то время как полярные шапки покрыты льдом на поверхности и близко к ней, основной резервуар льда считается скрытым под землей в виде вечной мерзлоты, поскольку планета контролируется перигляциальной областью во всех местах на поверхности. Это означает, что вода на Марсе замерзла и что эволюция ландшафта контролируется взаимодействием грунтового льда (вечной мерзлоты) [14,15]. Кроме того, Марс имеет сухую вечную мерзлоту. Здесь нет значительных осадков, и поэтому окружающая среда Марса сопоставима с аналогичными регионами на Земле, такими как Сухие долины в Антарктиде или высокогорная канадская Арктика. Внутреннее строение марсианских полярных шапок было впервые исследовано благодаря радарам орбитального зондирования MARSIS, которые позволили обнаружить общую толщину и объем полярных шапок, их эрозионного состояния и их геофизических признаков.

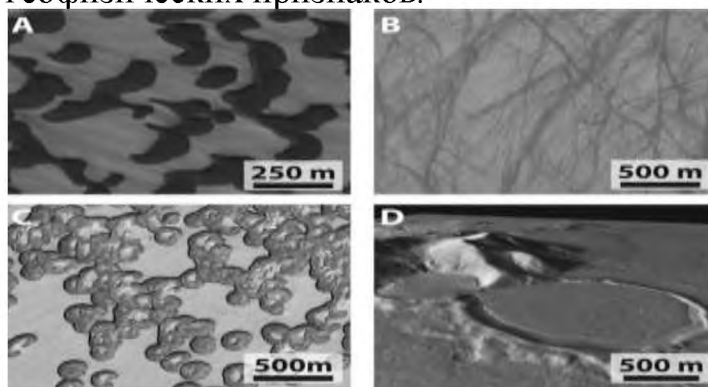


Рисунок 7. Примеры ледниковых, перигляциальных и эоловых отложений и форм рельефа; А. Эоловые осадочные формы рельефа: барханские дюны (MRO HIRISE PSP 009324 2650 RED); В. Изменение поверхности Марса: следы пылевых дьяволов на плоской равнине (MRO HIRISE ESP 013958 1170 RED); С. Рельеф типа Swiss Cheese на марсианских полярных шапках (MGS MOC R1303615); D. Ледник-кандидат на Марсе: кратер в виде песочных часов (надир MEX HRSC по стереофонической топографии HRSC)

Мы попытались обобщить самые основы геологической летописи Марса. В эти годы новые миссии с новыми инструментами и терабайтами данных дают новое представление об эволюции Марса, и картина планеты после эпохи викингов либо подтверждается, либо пересматривается. Многие открытия были сделаны благодаря космическим кораблям, запущенным недавно и в настоящее время, но в связи с ними возникло гораздо больше вопросов о сложной геологической летописи Марса. Существует достаточно широкое согласие относительно того, что вода в жидком виде была доступна в первые сто лет. Мир геологической истории Марса, которые привели как к формированию хорошо известных эрозионных и осадочных форм рельефа. Кроме того, на раннем Марсе была очень интенсивная геодинамическая активность, которая определила менее суровые условия поверхности, недр и атмосферы, чем современные. Точное количество, продолжительность и время связанной с водой активности на поверхности все еще обсуждаются, как и хронология и геодинамика долгоживущего колоссального вулканизма на Марсе, который, возможно, действовал до самого недавнего времени. Возможность развития и появления жизни на Марсе и его ранняя обитаемость являются одними из самых больших открытых вопросов, все еще открытых для Марса, и его геологическая эволюция, безусловно, сыграла ключевую, но все же не полностью понятая роль [15].

Будущее роботизированного исследования Марса попытается решить некоторые из этих тесно взаимосвязанных проблем с помощью различных архитектур миссий, включая орбитальные аппараты, посадочные модули, вездеходы или миссии по возврату образцов. Важность наземной мобильности уже была продемонстрирована миссией Mars Exploration Rover (MER) с 2004 года, и она станет ключевым фактором в проведении полевых геологических наблюдений, подобных Земле, в различных условиях на Марсе. Использование земных аналогов с учетом всех их ограничений с точки зрения морфологии, структуры и процессов оказалось очень полезным при попытке интерпретировать инопланетную геологическую летопись, такую как марсианская. Данные будущих миссий, а также данные текущих и прошлых миссий будут доступны международному сообществу через долгосрочные архивы, такие как Система планетарных данных НАСА или Архив планетарных наук ЕКА и существуют общедоступные инструменты для обработки и анализа массивов планетарных данных, такие как интегрированное программное обеспечение для формирователей изображений и спектрометров (ISIS) Геологической службы США (USGS), для которого учебная документация доступна из различных источников. В этом отношении роль будущих миссий, таких как китайская Yinghuo-1, и дальнейшее развитие

международного сотрудничества в исследовании Марса улучшат использование данных и, в долгосрочной перспективе, существенно увеличат наше понимание Марса. Следовательно, так же знание марсианской геологии, несомненно, увеличится в ближайшие годы и десятилетия, особенно если амбициозные программы исследования Марса (несколько марсоходов, возвращение образцов Марса) действительно осуществляются в ближайшем будущем. Использование доступного в настоящее время набора данных значительно расширит наши геологические знания о планете. Только викинги, немногие Гигабайты (PDS, 2010) наборов данных, за более чем 20 лет получено множество научных результатов.

На нашей Земле у нас было несколько сотен лет современной геологии с полным доступом к поверхностным и подповерхностным отборам проб. С другой стороны, на Марсе у нас было на порядок меньше времени и гораздо меньше возможностей для отбора проб. Какой бы ни была форма будущего исследования планет, необходимо будет решить серьезные фундаментальные проблемы эволюции Марса и планет земной группы в целом.

Литература:

1. Rossi, A. P. & Gasselt S. van. Geology of Mars after the first 40 years of exploration. // Research in Astronomy and Astrophysics. – 2010. – 34 p.
2. Andrews-Hanna J., Phillips R., and Zuber M., Nature 446(7132), 163. – 2007.
3. Arvidson R., Goettel K., and Hohenberg C. // Reviews of Geophysics 18(3). -1980.
4. Baker V. //Journal of Geophysical Research 84, 7985. – 1979.
5. Baker V. Megaflooding on Earth and Mars. – 2009. - 1 p.
6. Baker V., Carr M., Gulick V., Williams C., and Marley M. // Mars. – 1992. 493–522 pp.
7. Batson R. M., Edwards K., and Duxbury T. C., in Kieffer H. H., Jakosky B. M., Snyder C. W., & Matthews M. S. (ed.), Mars. // University of Arizona Press. – 1992. - 1249–1256 pp.
8. Bell J. The Martian surface: composition, mineralogy, and physical properties. // Cambridge University Press. – 2008.
9. Anderson D. T. //Geophys. Res. 107 10.1029/2000JE001436. – 2002.
10. Cabrol N. A. and Grin E. A. // Icarus 142 160–72. – 1999.
11. Karl L. Mitchell and Lionel Wilson.. Geologically active planet, Mars. // Recent geological activity. – 2017.
12. http://allplanets.ru/novosti_2011.html
13. <http://www.geologam.ru/geophysics/tectonics/kora-i-verhnyaya-mantiya-pod-okeanami>

14. NASA's Jet Propulsion Laboratory. Mars. Facts & Figures. // Solar System Exploration. NASA. Дата обращения: 20 ноября 2017.
15. Williams David R. Mars Fact Sheet. // National Space Science Data Center. NASA (1 сентября 2004). Дата обращения: 22 марта 2011
16. <https://handcent.ru/stati/7705-geologiya-marsa.html>
17. Chapman M.G.. The geology of Mars. // Cambridge University press. – 2007. – 484 p.