

УДК 523.4

ДОЛИННЫЙ РЕЛЬЕФ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЗЕМЛИ КИММЕРИЯ НА МАРСЕ

© 2024 г. А. Э. Мухамеджанова

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия

e-mail: alinam2001@gmail.com

Поступила в редакцию 23.11.2023 г.

После доработки 19.12.2023 г.

Принята к публикации 18.01.2024 г.

Выполнено исследование долинного рельефа северо-восточной части Земли Киммерия на Марсе. Результаты исследования позволяют сделать следующие выводы. 1) Морфология изученных долинных систем соответствует их предполагаемому флювиальному происхождению. 2) Остатки палеodelьты в кратере Гусев, фрагменты прослеживаемых по долине террасовых уровней, регулярные изменения их высоты, а также остатки эродированных аккумулятивных тел, обнаруженные в долине Ма'адим указывают на существование отдельных эпизодов частичного заполнения долин наносами, вероятно, за счет активизации самых верхних звеньев долинной сети, поставивших обломочный материал в главную долину. Детальное изучение морфологии и топографии долины Дуриус позволяет предположить такой же механизм и ее формирования.

Ключевые слова: Марс, Земля Киммерия, долина Ма'адим, долина Дуриус, долинный рельеф, водная эрозия, флювиальное происхождение

DOI: 10.31857/S0320930X24030027, **EDN:** NEERJA

ВВЕДЕНИЕ

На Марсе существуют формы рельефа, визуально напоминающие речные долины и русла водотоков (Carr, 1981; Baker, Partridge, 1986). Одним из возможных объяснений этого факта является флювиальный характер этих образований, предполагающий наличие жидкой воды как агента формирования такого рода рельефа (Carr, 1996; Baker, 2001). Наиболее важными в таком случае являются вопросы об источниках воды, длительности ее активной работы, возрасте этих форм, приемных бассейнах.

Земля Киммерия — крупный марсианский регион, располагающийся в пределах Южного кратерированного материка и представляющий собой обширную территорию (4–5 тыс. км в поперечнике) с центром на 34.7° ю. ш.; 145° в. д. К северу от него располагается обладающая специфическим рельефом переходная зона между древним южным кратерированным материком и относительно более молодыми и низкими равнинами северного полушария (Нупек и др., 2010). Выбор ключевого участка исследования обусловлен наличием данной специфической переходной зоны и предполагал исследование долинного рельефа северо-восточной части Земли Киммерия с учетом особенностей строения конкретной части переходной зоны на Марсе.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Цель данной работы — выявить наиболее вероятный вариант происхождения долин северо-востока земли Киммерия. Для этого необходимо решить следующие задачи:

- провести мониторинг и анализ представлений о происхождении долинных и долинно-руслых форм на Марсе,
- охарактеризовать геолого-геоморфологическое строение ключевого участка исследований — северо-восточной части Земли Киммерия,
- провести дешифрирование долинных форм рельефа северо-восточной части Земли Киммерия и охарактеризовать их геоморфологическое строение и пространственные взаимоотношения с прочими формами и комплексами форм рельефа разного возраста и происхождения.

Основными методами, используемыми в работе, являются геоморфологическое дешифрирование данных дистанционного зондирования Марса и геоморфологическое картографирование территории, а также морфометрические измерения с использованием ГИС-технологий. Методика исследования долинных форм включала в себя: дешифрирование тальвегов долин, изучение структуры долинной сети, изучение морфологии отдельных долин, изучение соотношения долин с формами рельефа иного генезиса.

На основе глобальной геологической карты Марса (Tanaka и др., 2014), геологической карты квадранта Аэолис (Scott и др., 1978), а также визуального дешифрирования космических снимков CTX (Context Camera на борту Mars Reconnaissance Orbiter) с пространственным разрешением 6 м была составлена геоморфологическая карта исследуемого участка. Было выявлено, что северо-восток Земли Киммерия представляет собой сочетание существенно переработанных в Гесперийское и Амазонийское время комплексной денудацией и импактно-взрывными процессами равнин различной морфологии, сформированных на древних (предположительно, ранне- и средненейского возраста) комплексах горных пород. Эти равнины прорезаны двумя субмеридионально ориентированными долинными системами – Ма’адим и Дуриус.

В качестве дешифровочных признаков долинных форм использовался набор характеристик, которые помогли идентифицировать и описать данный тип рельефа. Так, например, узкие и глубокие долины свидетельствуют о том, что условия формирования такого рода форм существовали короткое время, но с активными процессами врезания. Широкие долины свидетельствуют о продолжительном времени их формирования. В некоторых случаях долины имеют довольно четкий облик, по которому можно определить их структуру, рисунок и морфологию. Так, и в системе долин Ма’адим, и в системе долин Дуриус по форме, размеру и альбедо отчетливо выделяются главные долины и их притоки. В ходе дешифрирования было проведено кодирование структуры долинной сети. При этом использовалась система определения порядка долин Штралера (Strahler, 1957), где каждый приток реки классифицируется в соответствии с его положением в общей сети. Были получены основные характеристики сети: длины долин, их ширина, уклон, а также морфологические характеристики долин: продольный профиль, глубина и ширина по бровкам и днищу, форма поперечного профиля. Анализировалось также изменение формы и параметров поперечного профиля вниз по долинам для выяснения закономерностей развития долин.

ДОЛИННЫЕ ФОРМЫ НА МАРСЕ

На Марсе обнаружены разнообразные типы долин, имеющие большое морфологическое сходство с долинами земных рек и представляющие собой свидетельство в пользу того, что когда-то, в геологическом прошлом, на поверхности планеты происходила флювиальная деятельность (см., например, Pieri, 1976).

На основании рассмотренных при литературном обзоре гипотез можно сказать, что большинство из долин глубоко врезаны в поверхность кратерированных возвышенностей южного полушария и имеют прямоугольное или U-образное сечение. Предположительно, их образование было интенсивным в Ноахийский период, но затухло к его концу; вновь активизировалось в Гесперийский и в начале Амазонийского периодов. Более теплый и влажный климат по сравнению с современным, вероятно, был необходим для обеспечения стока. Если это так, то возраст долин подразумевает устойчивые теплые условия в Ноахийский период и климатические оптимумы впоследствии (Бронштэн, 1977; Кац, Макарова, 1987; Кузьмин, 1983; Лукашов, 1996; Маров, 1986; Gaidos, Marion, 2003; Leverington, 2019; Neukum, Hiller, Henkel, Bodechtel, 1979).

Изучение структуры долинных сетей необходимо для проверки гипотезы об их флювиальном происхождении. Существует несколько вариантов формирования долин: например, вода поступала из атмосферных осадков. Для подтверждения данного предположения необходимо выделить водосборный бассейн каждой долины, однако это представляется невозможным вследствие полной переработки рельефа эндогенными и экзогенными процессами за более чем 3 млрд лет с момента их образования. Другим возможным вариантом является поступление воды из точечных источников, таких как выходы грунтовых вод. Данное предположение также трудно подтвердить или опровергнуть из-за вышеупомянутой причины. Однако исследование морфологических и морфометрических параметров рельефа ключевого участка территории может способствовать получению более четкого представления о происхождении долинных форм на Марсе.

Ключевой район исследований – северо-восточная часть Земли Киммерия – интересен своим расположением вблизи глобальной переходной зоны (рис. 1).

Его характерной чертой является наличие нескольких крупных долинных систем, начинающихся во внутренних районах материка и открывающихся в крупные кратеры в пределах переходной зоны, либо вообще на низколежащих равнинах севера. В ходе исследования долин Ма’адим и Дуриус было проведено кодирование их структуры (рис. 2).

СИСТЕМА ДОЛИН МА’АДИМ

Долинная система Ма’адим располагается на северо-востоке Земли Киммерия и рассекает поверхность высоких равнин древнего кратерированного материка южного полушария Марса

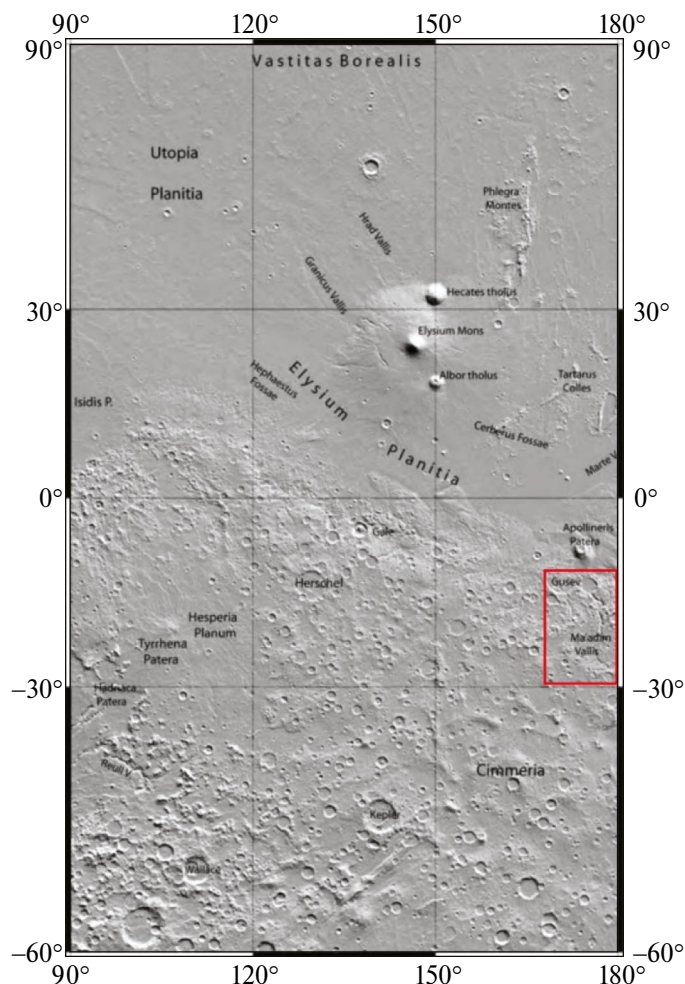


Рис. 1. Область исследования на карте Марса (Carr, 2006).

к югу от кратера Гусев. Долинная сеть вытянута субмеридионально с юга на север на ~ 900 км, с запада на восток на ~ 250 км. Площадь территории, которую прорезает долинная сеть, составляет около 900000 км^2 . Расположена она между 15° и 25° ю. ш. и 25° и 35° в. д.

Структура долинной сети Ма'адим представляет собой сеть узких и глубоких каньонов и долин, которые разветвляются и соединяются между собой, образуя сложную и переплетенную систему. Они имеют различную длину, ширину и глубину вследствие действия разных агентов рельефообразования, преобразовавших долинные формы.

Долина имеет большое количество притоков в своем верхнем течении, ее остальные 2/3 протоков — единая долина с единичными притоками первого порядка. Главная долина четвертого порядка вбирает в себя суммарно 142 долины меньших порядков. Их общая протяженность составляет ≈ 3966 км.

Долина Ма'адим берет свое начало на 28° ю. ш. и 177° в. д. Ее верховья располагаются на возвышенной равнине, обладающей сильно

расчлененным рельефом. Точечный исток долинной сети Ма'адим определить невозможно. Участок возможного водосбора представляет собой широкую слаборасчлененную равнину, простирающуюся на сотни километров на юг. Возможно, верховья долины Ма'адим были сильно сnivelированы за счет вулканической и/или эоловой активности.

Морфологические характеристики долины можно охарактеризовать при изучении ее продольного профиля (рис. 3).

Рассматривая продольный профиль долины, можно заметить, что самая верхняя его часть (примерно первые 200 км) выглядит субгоризонтальной и оканчивается заметным топографическим валом и переломом склона (рис. 3). Вал соответствует выбросам из ударного кратера, частично перекрывшим долину. Нижние 3/4 долины сначала характеризуются вогнутым рельефом (250–450 км), затем профиль выполаживается (450–750 км), а в нижней части долины (750–900 км) профиль снова становится вогнутым (см. рис. 3). Единичные пики, наблюдаемые

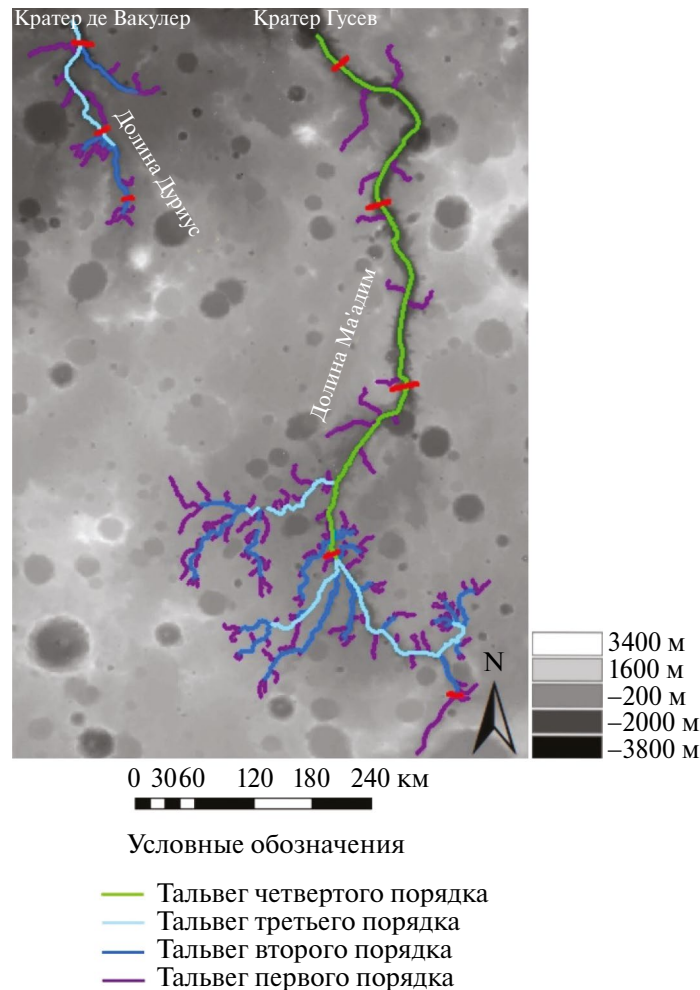


Рис. 2. Долинные сети Ма'адим и Дюриус на снимке ЦМР MOLA (пространственное разрешение — 463 м/пкс).

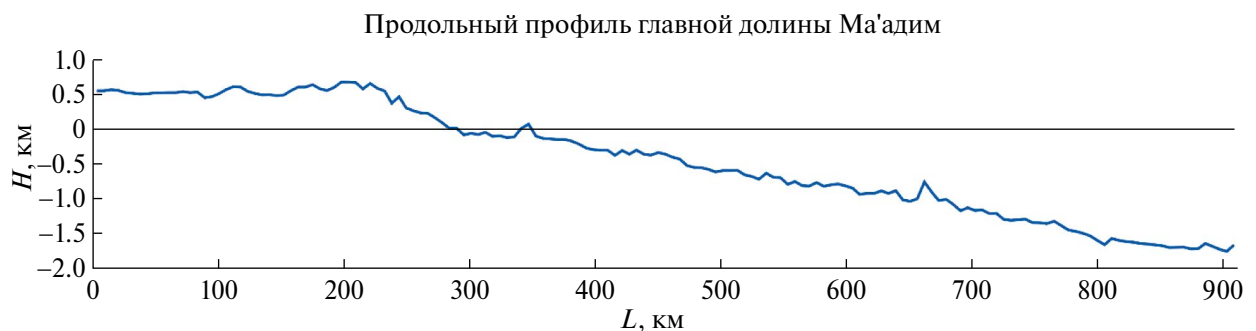


Рис. 3. Продольный профиль главной долины системы долин Ма'адим на основе данных ЦМР MOLA (пространственное разрешение — 463 м/пкс), где L — расстояние вдоль профиля и H — высота.

в районе 140 км и 580 км от истока, соответственно, представляют собой выбросы из более молодых кратеров, а также, возможно, проявлений оползневых процессов на бортах долины.

Для главного русла Ма'адим, можно выявить общий тренд — это пологонаклонная долина с вогнуто-выпуклым профилем длиной в 913.5 км. Она берет свое начало на возвышенной равнине на высоте ≈ 500 м, достигая в устье-

вой части отметки ≈ -1600 м. Амплитуда высот составляет чуть более 2 км, следовательно, средний уклон значительно меньше одного градуса ($\sim 0.12^\circ$). Длинноволновая компонента продольного профиля долины имеет незначительные перегибы. Для характеристики локальной топографической конфигурации долины Ма'адим была построена серия поперечных профилей с шагом ~ 200 км (рис. 4).

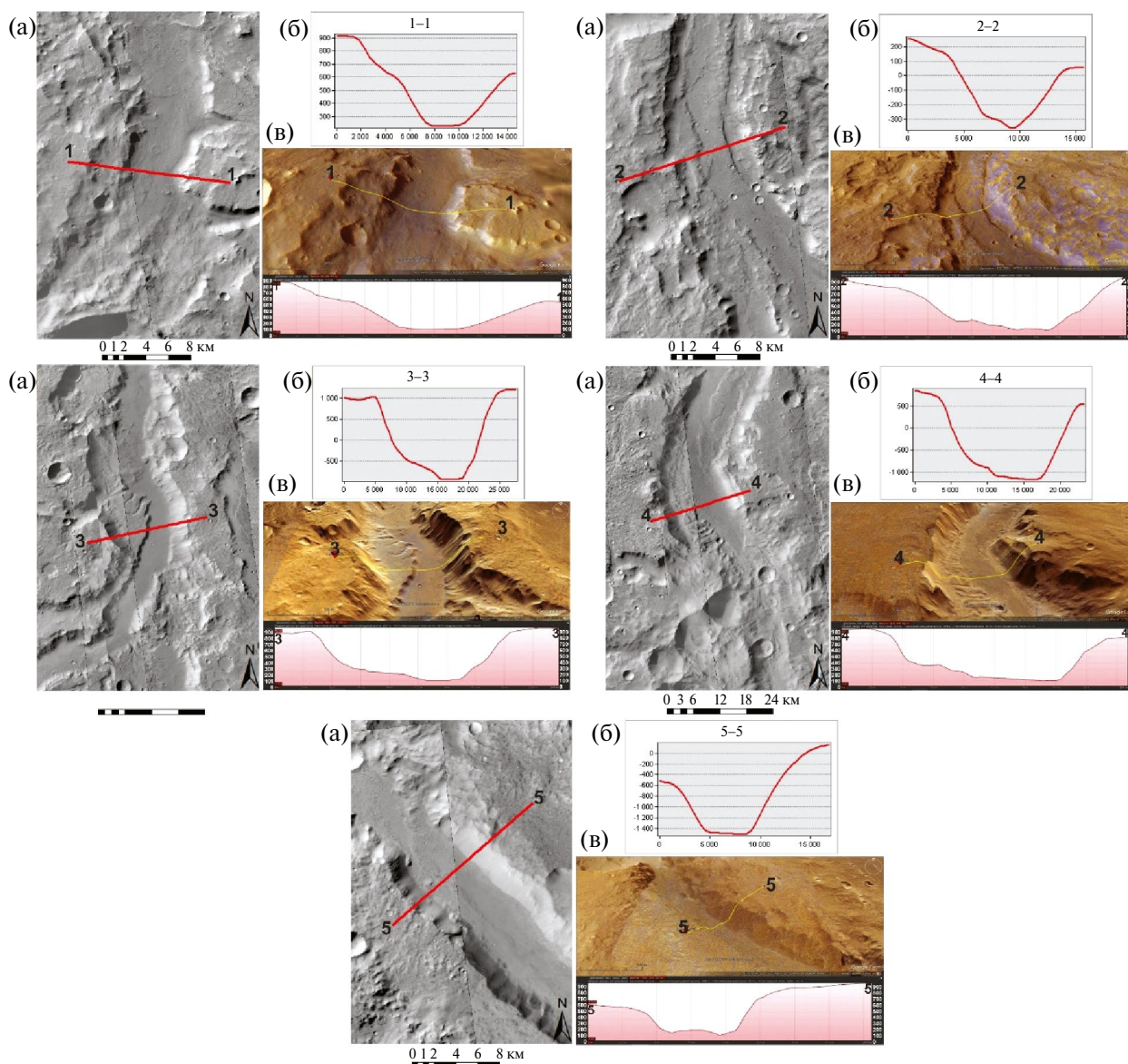


Рис. 4. Поперечные профили 1–1 – 5–5 главной долины системы долин Ма'адим: (а) – на основе снимков CTX; (б) – ЦМР MOLA; (в) – на основе ЦМР HRSC, полученных на КА Mars Express.

При исследовании поперечных профилей главной долины Ма'адим наблюдается закономерное расширение дна долины, а также увеличение ее глубины. Такие характеристики могут свидетельствовать о длительных процессах врезания исследуемой долиной сети. Также обращает на себя внимание обнаружение на трех из пяти поперечных профилей террас (или террасовых уровней). Террасы не отмечены в верховьях и в низовьях долины. Высота террасовых уровней максимальна в среднем течении – убывая и вверх, и вниз по долине. Такая ситуация характерна для хордовых террас речных долин Земли. В днище долины, в среднем ее течении, также были обнаружены вытянутые положительные формы (гряды) длиной около 30 км и максималь-

ной шириной около 3 км. Высота гряд достигает 100 м. Возможно, они представляют собой останцы продольных наносных гряд заполнения дна долины.

Долина Ма'адим открывается в кратер Гусев ($14^{\circ}30'$ ю. ш., $175^{\circ}24'$ в. д., 150 км в диаметре), прорезая его на южный вал. В южной части дна долины имеются следы предполагаемой палеодолины Ма'адим, простирающейся субмеридионально на ≈ 33 км и ≈ 39 км субширотно. Исследования марсохода Spirit показали наличие большого количества различных стратиграфических единиц в пределах данной формы рельефа, в которых наблюдается слоистость, что свидетельствует о многочисленных событиях осадконакопления и эрозии (McSween, Moersch, Burr, 2019).

СИСТЕМА ДОЛИН ДУРИУС

Долинная сеть Дуриус располагается в 160 км к западу от долинной сети Ма'адим. Она вытянута субмеридионально с юга на север на ~220 км, с запада на восток на ~100 км. Площадь территории, которую прорезает долинная сеть, составляет около 20000 км², т. е. она меньше площади территории сети долин Ма'адим в 45 раз.

Долина имеет небольшое количество притоков, и они распределены относительно равномерно на протяжении всей главной долины сети

Дуриус. Главная долина третьего порядка вбирает в себя суммарно 25 долин меньших порядков. Их общая протяженность составляет ~589 км.

Верховья главной долины Дуриус представляют собой некое подобие водосборного бассейна. Большое количество притоков первого порядка впадает в единую долину (до двух километров в поперечнике), где она начинает свое расширение.

Морфологические характеристики главной долины долинной сети Дуриус можно охарактеризовать при изучении ее продольного профиля (рис. 5).

Продольный профиль главной долины Дуриус

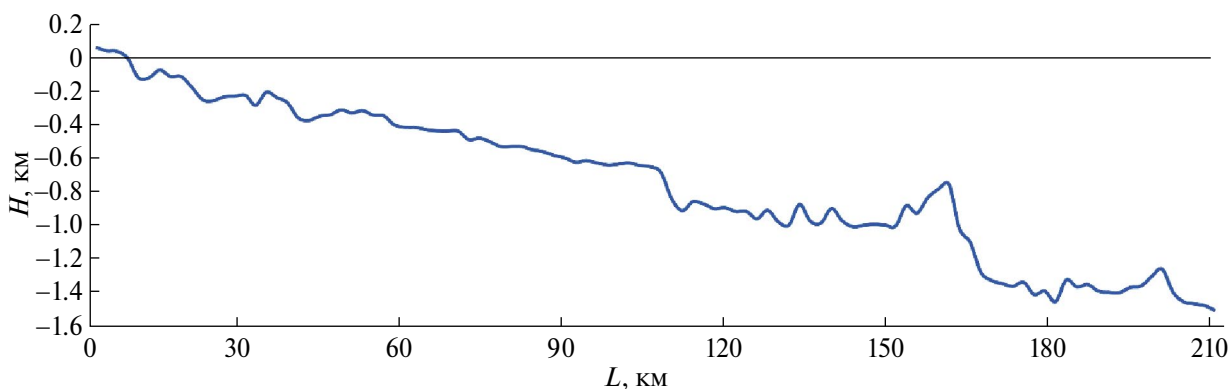


Рис. 5. Продольный профиль главной долины системы долин Дуриус на основе данных ЦМР MOLA (пространственное разрешение — 463 м/пкс), где L — расстояние вдоль профиля и H — высота.

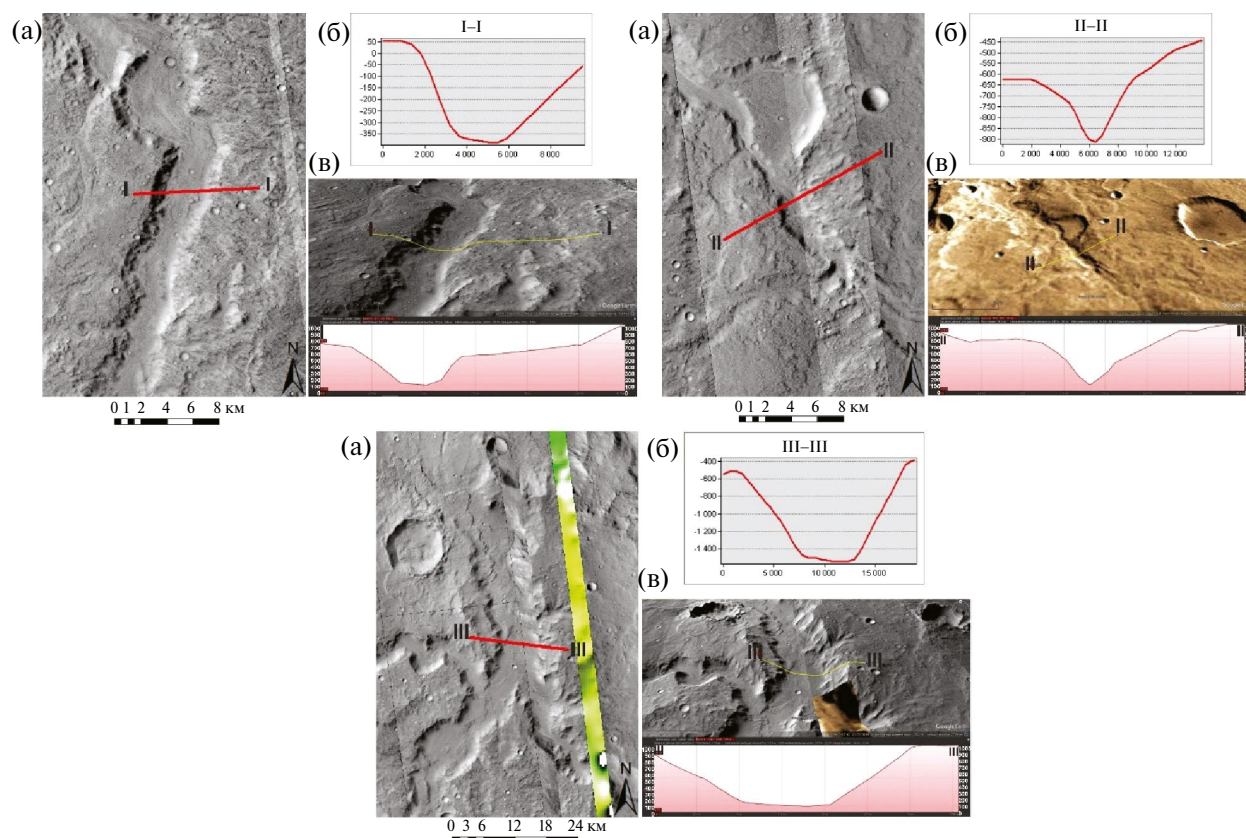


Рис. 6. Поперечные профили I-I—III главной долины системы долин Дуриус: (а) — на основе снимков CTX; (б) — ЦМР MOLA; (в) — на основе ЦМР HRSC, полученных на КА Mars Express.

Рассматривая продольный профиль долины, можно заметить, что он прямой, за исключением нижней части, где наблюдается резкое валообразное повышение (рис. 5). Эта часть долины была перекрыта выбросами из более молодого ударного кратера диаметром около 40 км, располагающегося к северо-западу от самой долины.

Для главной долины Дуриус, можно выявить общий тренд — это пологонаклонная долина длиной в 215 км. Она берет свое начало практически на нулевой отметке, достигая в устьевой части отметки ≈ -1500 м.

Для характеристики локальной топографической конфигурации долины была построена серия поперечных профилей (рис. 6).

Для верховьев долины характерен корытообразный профиль с плоским дном шириной 2 км (рис. 6, профиль I—I). Поперечный профиль II—II располагается на территории, где долинная форма местами теряет свои очертания, вероятно, вследствие перекрытия долины материалами вулканической или импактной природы. Также видно, что, хотя долина была ими временно перекрыта, впоследствии эрозионная деятельность возобновилась и прорезала новое русло, имеющее V-образный профиль (рис. 6, профиль II—II). Поперечный профиль III—III расположен в близустьевой части главной долины. Конфигурация долины корытообразная с выровненным дном, а ее ширина составляет около 5 км.

Долина Дуриус прорезает юго-восточный вал кратера Де Вакулер ($13^{\circ}18'$ ю. ш. $171^{\circ}00'$ в. д., 300 км в диаметре). На области предполагаемого устья долины Дуриус не наблюдается ни дельты, ни конусов выноса или их останцев.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования было установлено, что для обеих долинных систем характерна разветвленность (наличие водотоков нескольких порядков) в совокупности со слабым развитием верхних звеньев эрозионной сети: притоки низких порядков имеют незначительную длину и недостаточную морфологическую выраженность по сравнению с главной долиной. Выявлен общий тренд врезания с юга на север. Обе главные долины имеют тенденцию к выработке U-образного профиля и к расширению дна по приближению к устью. Коррелирующие формы рельефа (конусы выноса, террасы) в долине Ма'адим могут указывать на деятельность текучей воды.

Долины прорезают окружающие равнины, сложенные породами ранне- и среднеохийского возраста, что свидетельствует о более молодом возрасте долин. Отмечаются участки, где долинная система частично уничтожена в результате

ударных событий, а также наблюдается достаточно низкая морфологическая сохранность палеодельты долины Ма'адим. Эти факты позволяют предполагать достаточно древнее заложение долины и прекращение ее активного функционирования еще в доамазонийское время.

Таким образом, наиболее вероятным временным промежутком для формирования данных долинных систем видится позднеохийское — раннегесперийское время, что не противоречит существующим оценкам по некоторым другим долинам. Вероятнее всего, рассмотренные долины формировались за счет относительно быстрого (по геологическим меркам) эрозионного врезания. Однако относительно простая морфология рассматриваемых долин не дает оснований предполагать действие многочисленных циклов флювиальной активности. В то же время отмеченные в долине Ма'адим террасы и частично эродированные фрагменты древнего аккумулятивного дна долины указывают на существование отдельных эпизодов частичного заполнения долин наносами, вероятно, за счет активизации самых верхних звеньев долинной сети, поставлявших обломочный материал в главную долину.

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета института (ГЕОХИ РАН). Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бронштэн В.А. Планета Марс. М.: Наука, 1977. 95 с.
- Кац Я.Г., Макарова Н.В. Основы сравнительной геологии планет. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1987. 102 с.
- Кузьмин Р.О. Криолитосфера Марса. М.: Наука, 1983. 114 с.
- Лукашов А.А. Рельеф планетных тел. Введение в сравнительную геоморфологию: Учеб. Пособие. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1996. 112 с.
- Маров М.Я. Планеты Солнечной системы. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1986. 320 с.
- Baker V.R., Partridge J.B. Small Martian valleys: Pristine and degraded morphology // J. Geophys. Res. 1986. V. 91. P. 3561–3572.
- Baker V.R. Water and Martian Landscape // Nature. 2001. V. 412. P. 228–236.
- Carr M.H. The Surface of Mars. New Haven: Yale Univ. Press, 1981. 232 p.
- Carr M.H. Water on Mars. New York: Oxford Univ. Press, 1996. 229 p.
- Carr M.H. The surface of Mars. U.S. Geological Survey. Menlo Park, CA, 2006. P. 307.
- Gaidos E., Marion G. Geologic and geochemical legacy of a cold early Mars // J. Geophys. Res. 2003. P. 108.

- Hynek B.M., Beach M., Hoke M.R.T.* Updated global map of Martian valley networks and implications for climate and hydrologic processes // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. id. E09008.
- Leverington D.W.* Formation of Ares Vallis (Mars) by effusions of low-viscosity lava within multiple regions of chaotic terrain // *Geomorphology*. 2019. P. 345.
- McSween H.Y., Moersch J.E., Burr D.M.* Planetary Geoscience. Cambridge Univ. Press, 2019. 340 p.
- Neukum G., Hiller K., Henkel J., Bodechtel J.* Surface age of Martian shield volcanoes and channels // Abstracts X // Lunar and Planet. Sci. Conf. March 19–23. 1979. P. 907–909.
- Pieri D.* Distribution of small channels of the Martian surface // *Icarus*. 1976. V. 27. № 1. P. 25–50.
- Scott D.H., Morris E.C., West M.N.* Geologic map of the Aeolis Quadrangle of Mars // U.S.G.S. Misc. Inv. Map 1–1111. 1978.
- Strahler A.N.* Quantitative analysis of watershed geomorphology // *Transactions Am. Geophys. Union*. 1957. V. 38. № 6. P. 913–920.
- Tanaka K.L., Skinner J.A. Jr., Dohm J.M., Irwin R.P. III, Kolb E.J., Fortezzo C.M., Platz T., Michael G.G., Hare T.M.* Geologic map of Mars: U.S. Geological Survey. Scientific Investigations Map 3292, scale 1:20,000,000 // U.S.G.S. 2014. P. 43.