

УДК 523.43

## ГЕОЛОГО-МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО РАЙОНА ПОСАДКИ КА “ЭКЗОМАРС” OXIA PLANUM

© 2020 г. М. А. Иванов<sup>а, \*, \*\*</sup>, Е. Н. Слюта<sup>а</sup>, Е. А. Гришакина<sup>а</sup>, А. А. Дмитриевский<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского, ГЕОХИ РАН, Москва, Россия

\*e-mail: mishaivn@mtu-net.ru

\*\*e-mail: Mikhail\_Ivanov@Brown.edu

Поступила в редакцию 28.05.2019 г.

После доработки 04.06.2019 г.

Принята к публикации 01.08.2019 г.

В исследовании был проведен детальный фотогеологический и топографический анализ поверхности в области Oxia Planum, являющейся наиболее вероятным местом посадки марсохода экспедиции Экзо Марс. Вся область посадки состоит из двух топографических доменов (материк и низменность), разделенных резким региональным уступом. Материковый домен составляет примерно 25% области посадки. Главным вещественным комплексом этого домена являются лавовые равнины с абсолютным модельным возрастом 3.65 млрд лет. Эти равнины распространяются на запад и подстилают практически всю поверхность низменностей, где они перекрыты сравнительно тонким (первые десятки метров) слоем материала, вынесенного из пределов материка в период флювиальной активности. Возраст ее завершающей фазы оценивается величиной 3.53 млрд лет. Вещество, которое предстоит опробовать марсоходу экспедиции Экзо Марс, связано, главным образом, с завершающей аккумуляционной фазой и представлено отложениями темных и светлых гладких равнин в пределах низменностей. Материал темных равнин преимущественно состоит из более грубозернистой фракции материковых лавовых равнин, переотложенной вблизи топографической границы, разделяющей материк и низменности. Отложения светлых равнин доминируют в области посадки и представлены более тонкой фракцией материала лавовых равнин и веществом светлых покровов, в составе которого, вероятно, доминируют глинистые минералы.

**Ключевые слова:** Марс, Экзо Марс, марсоход, стратиграфия, флювиальная активность

**DOI:** 10.31857/S0320930X20010053

### ВВЕДЕНИЕ

На март 2021 г. запланировано начало работы марсохода экспедиции Экзо Марс (Loizeau и др., 2019). Марсоход будет проводить детальные исследования геохимии и минералогии поверхности марсианского реголита и каменного материала, а также передавать снимки поверхности, что позволит понимать природу вещества, проанализированного различными инструментами. На сегодняшний день из нескольких предварительных кандидатов для посадки спускаемого аппарата экспедиции Экзо Марс осталось только два, Oxia Planum (18.14° с.ш., 24.24° з.д.) и Mawrth Vallis (22.16° с.ш., 17.95° з.д.), которые расположены в западной части региона Arabia Terra. Посадочные эллипсы для каждого места посадки сильно вытянуты (100 × 15 км) и ориентированы в северо-западном направлении (азимут большой полуоси может меняться от 95° до 120° для области Oxia Planum и от 102° до 129° для места посадки Mawrth Vallis).

Первое из предполагаемых мест посадки (Oxia Planum) расположено на правом борту крупнейшей системы каналов истечения Ares–Simud–TiuValles (Carr, 1981; 1996; 2006; Rotto, Tanaka, 1995; Ivanov, Head, 2001; Rajolai др., 2016) вблизи устья речной долины Coogoon Vallis, которая протягивается в субширотном направлении примерно на 300 км вглубь Arabia Terra (Quantini др., 2016; Molina др., 2017; Fawdoni др., 2019). Главный научный интерес района Oxia Planum представляют скопления глинистых минералов, пространственно тесно связанные с долиной Coogoon Vallis и отложения которых могут представлять собой вещество, перенесенное водными потоками долины из внутренних частей региона Arabia Terra (Carteri др., 2016; Quantin и др., 2016; Rajola и др., 2017). Вещественные комплексы, в составе которых присутствуют глинистые минералы, представляют собой основной объект исследований, планируемых в месте посадки Oxia Planum.

Второе место посадки расположено к югу канала истечения Mawrth Vallis в его нижнем тече-

нии. Хотя Mawrth Vallis представляет собой наименьший из известных каналов истечения на Марсе, тем не менее, его русло протягивается минимум на 650 км вглубь ArabiaTerra (Ivanov, Head, 2001). Таким образом, регион ArabiaTerra является главным источником вещества, перенесенного и переотложенного при формировании долин Coogoon и Mawrth Valles.

Область вокруг Mawrth Vallis привлекает особый интерес исследователей после открытия там одного из крупнейших скоплений филлосиликатов (глин) на Марсе (Bibring и др., 2006; 2007; Loizeau и др., 2006). С тех пор эта область интенсивно исследуется с помощью дистанционных спектральных методов (Loizeau и др., 2012; Bishori др., 2013; Poulet и др., 2014), которые позволили установить широкое разнообразие глинистых минералов, слагающих отчетливые вещественные подразделения. Фотогеологические исследования вокруг канала Mawrth Vallis позволили выявить четкую стратификацию слоев, несущих глинистую минерализацию (Loizeau и др., 2010; 2015; Dobreaи др., 2010). Глинистые и соленосные (Bishori др., 2018) слои предположительно имеют ноахийский возраст (~4 млрд лет, Loizeau и др., 2012), располагаются на древнем кратерированном фундаменте и перекрыты отложениями вещества, в составе которого преобладают пироксены. Этот контрастный минералогический комплекс был вскрыт процессами флювиальной и ветровой (Chojnacki и др., 2018) эрозии в начале гесперийского периода геологической истории Марса примерно 3.7–3.6 млрд лет назад (Loizeau и др., 2012).

Наше исследование предполагаемых мест посадки экспедиции Экзо Марс посвящено детальному фотогеологическому анализу территории, заключенной внутри всех возможных расчетных посадочных эллипсов в районе Oxia Planum, так как эта область была рекомендована как окончательное место посадки. Район Mawrth Vallis из-за высокой степени расчлененности рельефа и изобилия протяженных крутых уступов представляется слишком опасным для посадки и труднопроходимым для движения марсохода в случае успешной посадки. Систематический геологический анализ поверхности в пределах посадочных эллипсов в районе Oxia Planum еще не проводился.

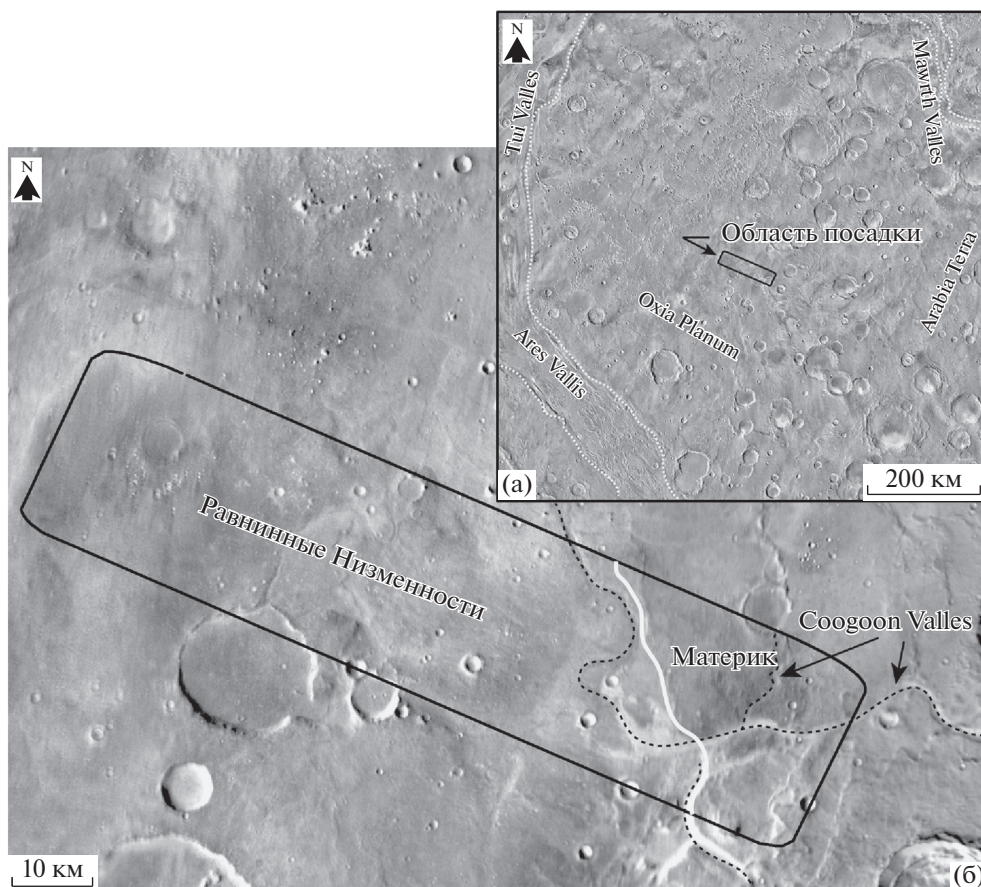
Главной целью нашего исследования было выявление и картирование вещественных подразделений, слагающих область посадки, и установление природы этих подразделений, что позволило бы более надежно проводить интерпретацию результатов, полученных марсоходом. Кроме того, знание о геологическом строении района места посадки является важным для оценки физико-механических свойств грунта и предварительного планирования маршрута марсохода.

Для фотогеологического анализа области осадки в нашем исследовании мы использовали мозаики снимков CTX с пространственным разрешением ~5 м/пкс [[http://murray-lab.caltech.edu/CTX/tiles/beta01/E-180/Murray-Lab\\_CTX-Mosaic\\_beta01](http://murray-lab.caltech.edu/CTX/tiles/beta01/E-180/Murray-Lab_CTX-Mosaic_beta01)]. Мозаики перекрывают всю область исследования без разрывов и позволяют проводить геолого-морфологическое картирование в масштабе 1 : 20000. Более детальные морфологические особенности поверхности выделенных вещественных подразделений оценивались по снимкам HiRISE, разрешение которых составляет 0.25 м/пкс. Рельеф поверхности в области посадки оценивался по цифровым моделям рельефа (ЦМР), сконструированным по данным лазерного высотомера MOLA (Smithи др., 1999) (пространственное разрешение модели 128 пкс/град или 440 м/пкс на широте места посадки) и постереопарам снимков HiRISE (McEwen и др., 2007) (пространственное разрешение модели примерно 1 м/пкс).

#### ОБЩАЯ ТОПОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЛАСТИ ПОСАДКИ

Район посадки Oxia Planum находится на краю материковых возвышенностей Марса в области между крупными каналами истечения Ares (к западу) и Mawrth (к северо-востоку, рис. 1а), а расчетные посадочные эллипсы располагаются на продолжении системы флювиальных русел Coogoon Valles (рис. 1б). Переход материк/низменность и наличие русел определяют основные геологические особенности района посадки. Русла прорезают поверхность материковой местности и сливаются, образуя единый канал, который протягивается в пределы обширной низменности вблизи восточного края района посадки (рис. 1б).

Общая топографическая конфигурация района Oxia Planum составляет, таким образом, двумя главными доменами: равнинными низменностями и приподнятой материковой местностью (рис. 2а). В пределах низменностей рельеф меняется слабо, в пределах 100–150 м на расстоянии около 80 км. Главными топографическими деталями в этой провинции являются пологие холмы, соответствующие положительным формам рельефа более древней местности, и реликты ударных кратеров (рис. 2а, 2б). ЦМР высокого разрешения показывают, что характерный размах коротковолнового рельефа в пределах низменностей составляет около 50 м, но вблизи южного края района посадки амплитуда рельефа может достигать 150 м на расстоянии около 2 км (рис. 2в–2д). Более крутые уступы наблюдаются в центральной части района посадки и соответствуют границам некоторых вещественных комплексов. Тем не менее коротковолновые уклоны в пределах низменностей малы и примерно 75% поверхности рав-



**Рис. 1.** Область исследования. (а) Общий вид региона, окружающего область посадки, (б) область посадки и ее непосредственное окружение. Фрагменты мозаики изображений THEMIS-IR-daytime-v.12. Простая цилиндрическая проекция.

нин в этом топографическом домене имеют уклоны менее  $7^\circ$  на базе 1 м.

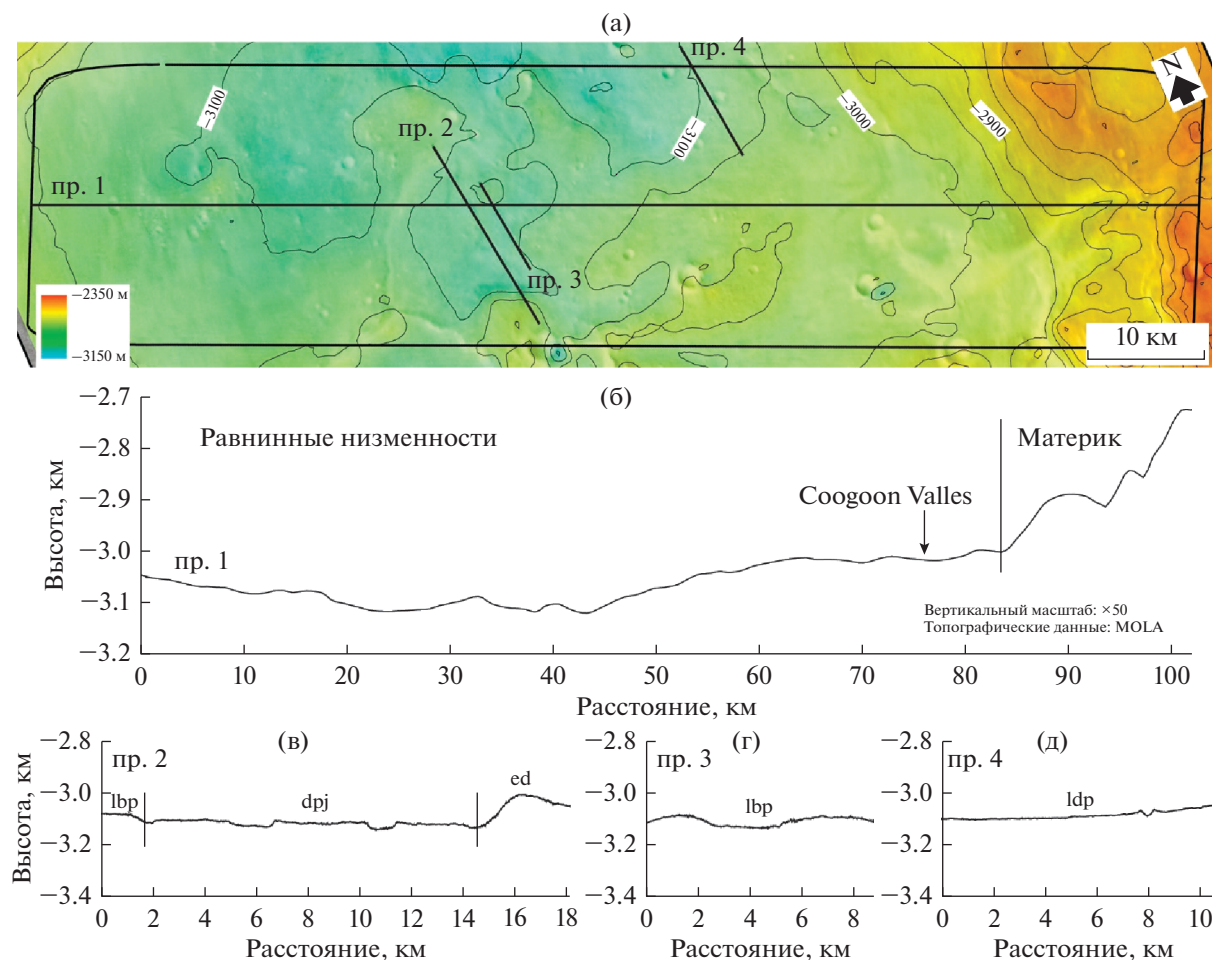
В пределах материковой провинции поверхность расположена на более высоких топографических горизонтах и расчлененность рельефа заметно сильнее (рис. 2а, 2б). Основными формами, характеризующими топографию материковой местности в районе посадки Oxia Planum, являются депрессии флювиальных русел Coogoon Valles глубиной около 50–60 м и покровы выбросоводного из крупных материковых кратеров, которые достигают в высоту нескольких десятков метров.

### ВЕЩЕСТВЕННЫЕ КОМПЛЕКСЫ В ОБЛАСТИ ПОСАДКИ И ИХ ВОЗРАСТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Пространственное разрешение снимков СТХ позволяет выделять ряд вещественных комплексов (подразделений), не различимых на снимках с более низким разрешением (например, THEMIS) и более уверенно определять природу этих комплексов. Подразделения различаются по морфо-

логии, альбедо и топографической конфигурации и формировались под действием различных геологических процессов. Идентификация и интерпретация природы подразделений, а также определение их относительного и абсолютного модельного возраста позволяет реконструировать последовательность геологических процессов, действовавших в области посадки Oxia Planum. Следующие подразделения слагают поверхность в области посадки.

**Вещественный комплекс иет** (рис. 3а). Наиболее древнее вещество в области посадки обнажается в пределах материкового топографического домена и представлено выбросами из крупного ударного кратера (подразделение иет, рис. 4). Это подразделение представляет собой грубообломочный и плохо сортированный материал древнего материка, вероятно, ноахийского возраста, и перекрывает незначительную площадь в пределах области изучения, 2,5% (табл. 1). Само ударное событие произошло позднее формирования основной части материкового домена в области исследования. Выбросы кратера различимы



**Рис. 2.** (а) Топографическая карта области посадки. Топографические данные MOLA, пространственное разрешение 440 м/пкс. Значения изолиний в метрах, сечение изолиний 50 м. Черные жирные линии показывают положение топографических профилей. (б) Продольный топографический профиль через всю область посадки, топографические данные MOLA, пространственное разрешение 440 м/пкс. (б), (в), (г) – топографические профили, построенные по ЦМР высокого разрешения (стереопары снимков HiRISE, пространственное разрешение 1 м/пкс). Для всех профилей высокого разрешения вертикальный масштаб увеличен в 10 раз.

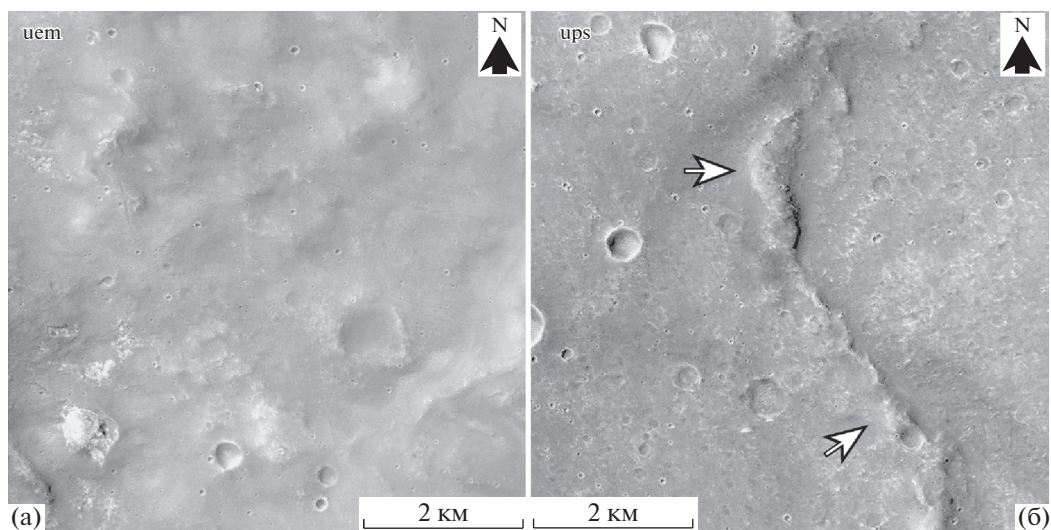
только в его пределах, но не видны на примыкающих низменностях. Это значит, что ударное событие произошло до формирования вещественных комплексов низин, которые стерли основную часть удаленных выбросов из кратера.

**Вещественный комплекс ups** (рис. 3б). Наиболее важным древним комплексом в области посадки выступает равнинная местность с морфологически гладкой поверхностью и извилистыми грядами (подразделение ups), которая обнажается в пределах материкового домена (рис. 4) и занимает примерно 10.8% изученной площади (табл. 1).

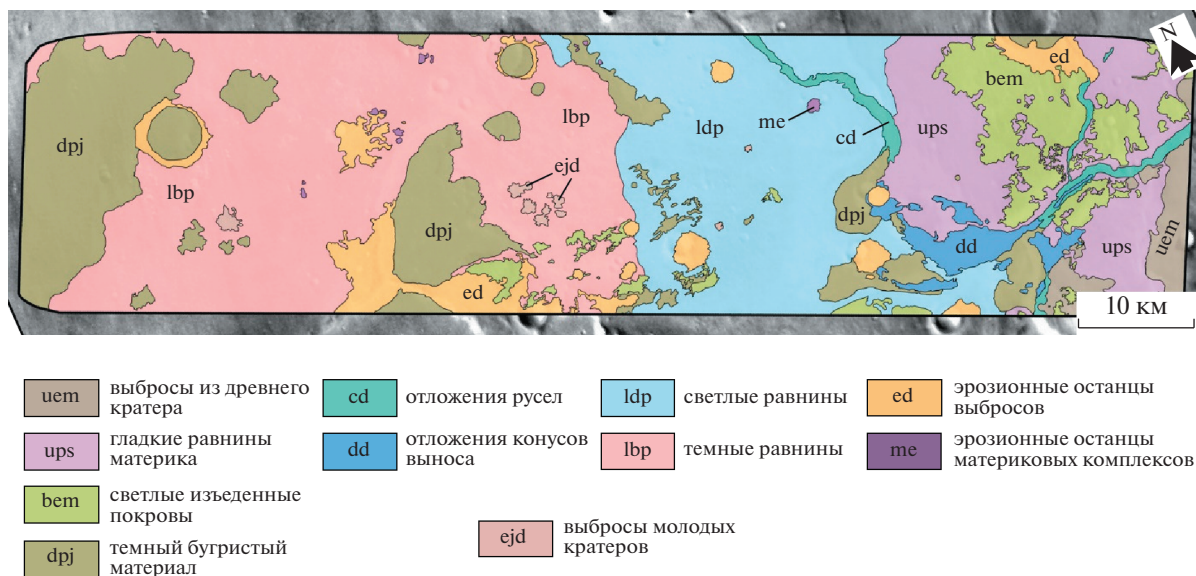
Морфологически гладкие равнины, деформированные извилистыми грядами и подобные тем, что слагают часть материкового домена, распространены в обширном регионе, окружающем область посадки Oxia Planum, и всегда древнее форм рельефа, относящихся к флювиальной деятельно-

сти. Таким образом, равнинная местность представляет собой основание, на котором залегают практически все остальные вещественные комплексы в районе посадки. Оценка абсолютного модельного возраста подразделения ups в области Oxia Planum составляет  $3.65 \pm 0.05/-0.08$  млрд лет (рис. 5), что представляет собой нижний возрастной предел для большинства других вещественных комплексов, которые распространены в районе посадки.

**Вещественные комплексы cd и dd** (рис. 6) связаны с отложениями долин Coogoon Valles и занимают малую долю площади области исследования в пределах низменностей (1.5 и 2%, соответственно, табл. 1) Терминальное русло долин Coogoon Valles (рис. 1б) прорезает вещественные комплексы материкового топографического домена и открывается в обширную низменность с уплощенным рельефом. Таким образом, флювиальная де-



**Рис. 3.** (а) Выбросы из древнего ударного кратера, подразделение uem. (б) Гладкие материковые равнины, подразделение ups. Подразделение uem имеет грубую бугристую поверхность, образованную отдельными фрагментами выбросов. Поверхность подразделения ups морфологически гладкая, нарушенная узкими извилистыми грядами (стрелки). Фотооснова – мозаика снимков СТХ, разрешение 5 м/пкс.



**Рис. 4.** Геологическая карта области посадки.

тельность, приведшая к формированию русел и связанных с ними вещественных комплексов, проявилась после становления гладких материковых равнин.

Днище терминального русла перекрыто морфологически гладким материалом (подразделение cd, рис. 6а), который, по всей вероятности, представляет собой поздние скопления песка и пыли, перенесенных ветром и не имеющих отношения к формированию русла. В тех местах, где русло выходит за пределы материка, наблюдаются

удлиненные веерообразные и линзовидные скопления материала длиной до 10–15 км и шириной первые километры. Морфология и местоположение этих образований указывают, что они представляют собой конусы выноса (подразделение dd, рис. 6б), образовавшиеся при смене флювиального режима от эрозионного (в пределах материка) к аккумуляционному (в пределах низменности). Малая площадь подразделения dd исключает возможность получения реалистичных оценок абсолютного модельного возраста с использованием статистики кратеров.

**Таблица 1.** Площадь, занятая разными морфологическими подразделениями в области посадки Oxia Planum

Подразделение	Площадь, км <sup>2</sup>	Площадь, %
ejd	9.0	0.4
bem	176.6	7.1
lbp	778.3	31.2
ldp	503.3	20.2
dpj	457.2	18.4
dd	50.9	2.0
cd	37.2	1.5
me	3.6	0.1
ed	144.0	5.8
ups	268.1	10.8
uem	62.9	2.5

Поверхность конусов морфологически гладкая, пологоволнистая, а их толща слабо стратифицирована и состоит из нескольких слоев (рис. 6б), что, возможно, указывает на несколько эпизодов формирования конусов. У подножия уступов, ограничивающих слои, нет ни каменных развалов, ни отдельных глыб, различимых на изображениях HiRISE (рис. 6в). Поверхность пологих склонов нижних слоев покрыта частыми грядами, образующими дюнные поля; характерное расстояние между дюнами составляет 5–10 м (рис. 6в).

**Вещественный комплекс lbp** (рис. 7а). Наибольшее распространение в пределах низменностей имеет подразделение светлых равнин (lbp, табл. 1), которое распространено в западной части района посадки (рис. 4). Поверхность этого подразделения выглядит светлее, чем многие примыкающие типы местности. Она пологоволнистая и на ней местами встречаются узкие (10–20 м шириной) и низкие (первые метры) гряды. Гряды иногда сливаются в сплошные поля и представляют собой дюны.

Материал подразделения lbp перекрывает равнинный домен в обширном регионе вокруг области посадки Oxia Planum и, следовательно, занимает более высокое стратиграфическое положение по сравнению с гладкими материковыми равнинами. Оценки абсолютного модельного возраста светлых равнин отличаются большими отклонениями от среднего значения  $3.53 \pm 0.08/-0.17$  млрд лет (рис. 5б). Несмотря на значительные вариации, средний возраст светлых равнин заметно меньше возраста гладких материковых равнин (рис. 5а), что полностью соответствует стратиграфической позиции подразделений ups и lbp.

В некоторых местах в пределах светлых равнин там, где дюны развиты слабо, а поверхность выглядит несколько более яркой, заметна расчлененность поверхности на многоугольные блоки поперечником первые метры (рис. 7б). Такие

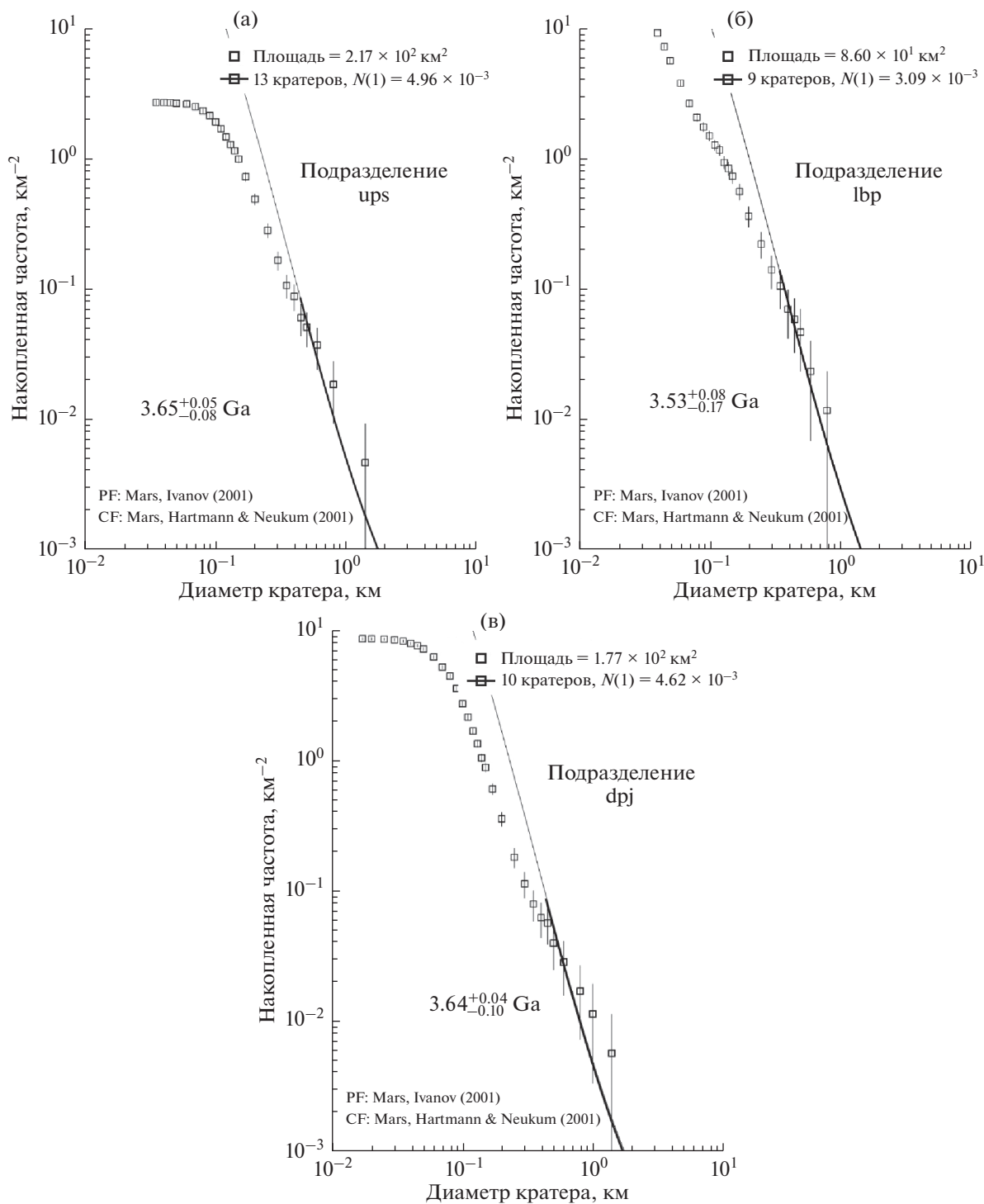
участки сравнительно редки (первые проценты от площади подразделения lbp), но их морфология может указывать на то, что они состоят из скопленных глинистых минералов. В других областях Марса данные спектрометра CRISM, несомненно, указывают на присутствие железомagneзиальных глинистых минералов в местностях, аналогичных по альбедо и морфологии участкам поверхности с полигональной текстурой в области посадки Oxia Planum (Mangold и др., 2007; Mustard и др., 2007; 2008; 2009; Ehlmann и др., 2008; 2009; Murchie и др., 2007; 2009).

**Вещественный комплекс ldp.** Вторым по распространенности комплексом в области исследования выступает подразделение темных равнин (ldp), которое занимает примерно 20% поверхности изученной территории (табл. 1). По своей морфологии темные равнины аналогичны светлым (lbp), но обладают заметно более низким альбедо. Темные равнины образуют широкую (около 20 км) полосу, протягивающуюся поперек области посадки вдоль края материкового топографического домена (рис. 4). Полоса темных равнин представляет собой участок низменностей, куда открываются южные части русел Coogoon Valles. Обнажения светлого материала с полигональной отдельностью, характерные для светлых равнин, в пределах темных равнин не отмечены.

**Вещественный комплекс dpj** (рис. 7в). Следующим по распространенности подразделением в пределах низменностей выступает темный бугристый материал (подразделение dpj, табл. 1). Этот вещественный комплекс развит преимущественно в местных понижениях рельефа (днища крупных ударных кратеров) или встречается на продолжении русел Coogoon Valles вблизи материкового домена. Характерными признаками подразделения dpj являются его явно более низкое альбедо по сравнению с подразделениями lbp и ldp и крайне неровная поверхность, состоящая из множества коротких (первые десятки метров) хаотично ориентированных гряд. Края подразделения dpj часто представляют собой протяженный уступ или серию уступов (рис. 7в), отчетливо выраженных на топографических профилях с высоким пространственным разрешением (рис. 2в). Высота уступов составляет первые десятки метров.

На изображениях сверхвысокого разрешения видно, что в материале данного подразделения присутствует большое количество камней крупнее 1 м, особенно вблизи валов и стенок ударных кратеров разной степени сохранности (рис. 7г). Широко развиты в пределах этого подразделения и дюнные поля, свидетельствующие о наличии песчаной фракции в материале подразделения dpj.

Частотно-размерное распределение ударных кратеров на поверхности темного бугристого материала аппроксимируется изохронной, соответ-

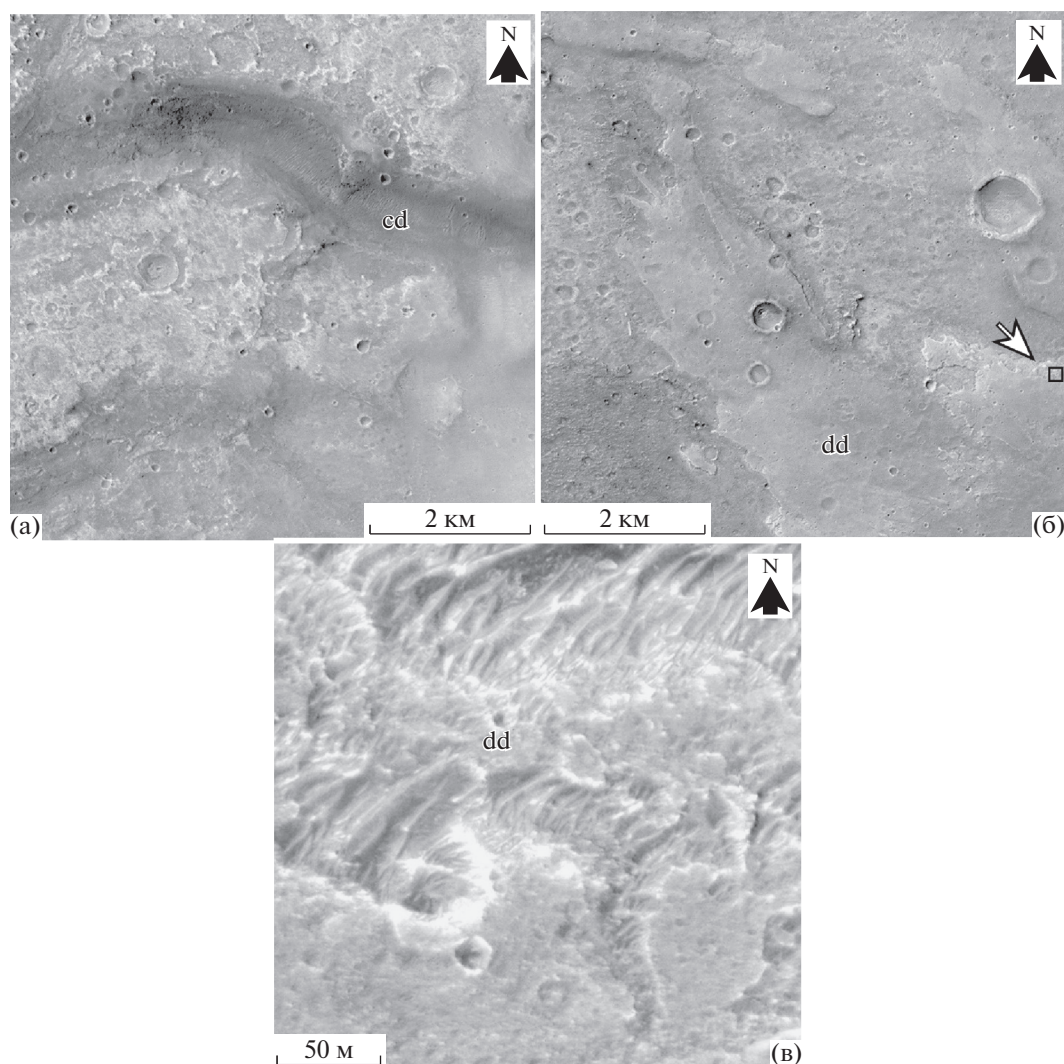


**Рис. 5.** Оценки абсолютных модельных возрастов ключевых подразделений. Planum составляет  $3.65 + 0.05/-0.08$  млрд лет (рис. 5), что представляет собой нижний возрастной предел для большинства других вещественных комплексов, которые распространены в районе посадки.

ствующей возрасту  $3.64 + 0.04/-0.10$  млрд лет (рис. 5в). Эта оценка неотличима от абсолютного модельного возраста гладких материковых равнин (рис. 5а). Таким образом, оба подразделения, ups и дрj, представляют собой наиболее древ-

ние вещественные комплексы в пределах изучаемой территории.

**Вещественный комплекс vem** (рис. 8а). Светлые покровы с неровной, глыбовой, поверхностью и чрезвычайно извилистыми границами (подразде-



**Рис. 6.** (а) Отложения русел флювиальной системы Coogoon Valles, подразделение cd. (б) Отложения конусов выноса, подразделение dd. Черный квадрат со стрелкой отмечает положение снимка бв. Фотооснова – мозаика снимков CTX, разрешение 6 м/пкс. (в) Поверхность подразделения dd при максимально возможном разрешении камеры HiRISE (0.25 м/пкс). Видна слоистая структура конусов выноса и скопление дюн в пределах нижних горизонтов конусов. Крупнообломочный материал в конусах отсутствует. Фрагмент снимка ESP\_019084\_1980.

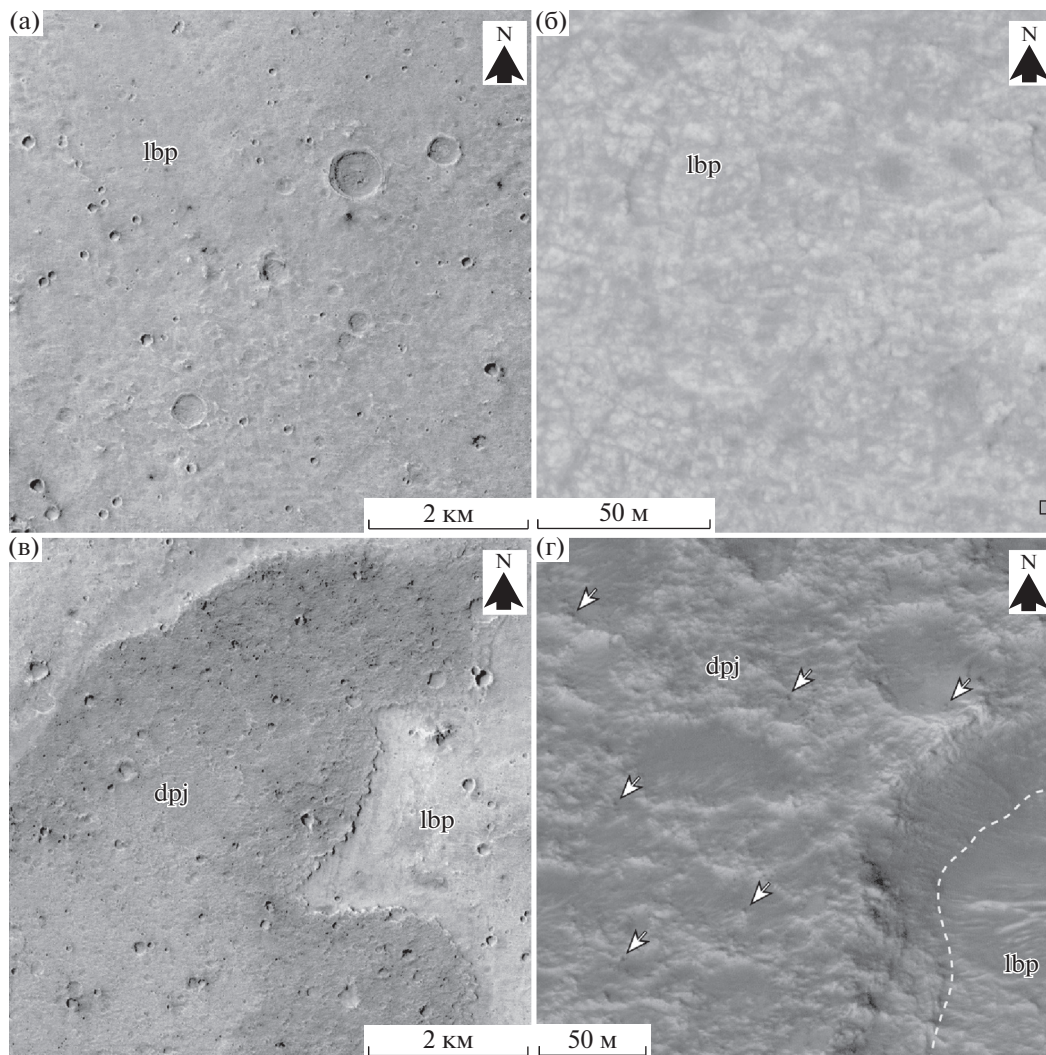
ление bem) развиты преимущественно в пределах материкового топографического домена на правом (северном) борту русел Coogoon Valles (рис. 4).

На снимках сверхвысокого разрешения видно, что поверхность этого подразделения комковатая, состоящая из многочисленных блоков с характерными размерами первые метры (рис. 8б). По альбедо и текстуре поверхности подразделения bem подобно участкам в пределах светлых равнин с полигональной текстурой поверхности. Для образований со схожей морфологией и альбедо в других местах Марса данные спектрометра CRISM указывают на присутствие глинистой компоненты в грунте. Вероятно, подразделение bem в районе посадки Oxia Planum также характеризуется скоплениями глинистых минералов.

Малая площадь подразделения bem не позволяет получить реалистичные оценки абсолютного модельного возраста. Стратиграфические соотношения этого подразделения установить также трудно, так как оно не контактирует с большинством других вещественных комплексов, кроме гладких материковых равнин, на которых залегают светлые покровы. Однако на бортах терминального русла Coogoon Valles светлые покровы отсутствуют, что, вероятно, может свидетельствовать о большей относительной древности покровов, размытых при формировании флювиальных русел.

Остальные типы местности (рис. 9) в пределах низменности занимают крайне малую долю площади района посадки (табл. 1) и представляют со-





**Рис. 7.** (а) Поверхность светлых равнин (подразделение lbp). Фотооснова – мозаика снимков СТХ, разрешение 5 м/пкс. (б) В некоторых районах светлых равнин при высоком разрешении видна полигональная отдельность, характерная для глинистых отложений Марса. Фрагмент снимка ESP\_037558\_1985, разрешение 0.25 м/пкс. (в) Поверхность темного бугристого материала (подразделение dpj). Фотооснова – мозаика снимков СТХ, разрешение 5 м/пкс. (г) На поверхности подразделения dpj при максимально возможном разрешении различимы отдельные камни (стрелки). Фрагмент снимка ESP\_039299\_1985, разрешение 0.25 м/пкс.

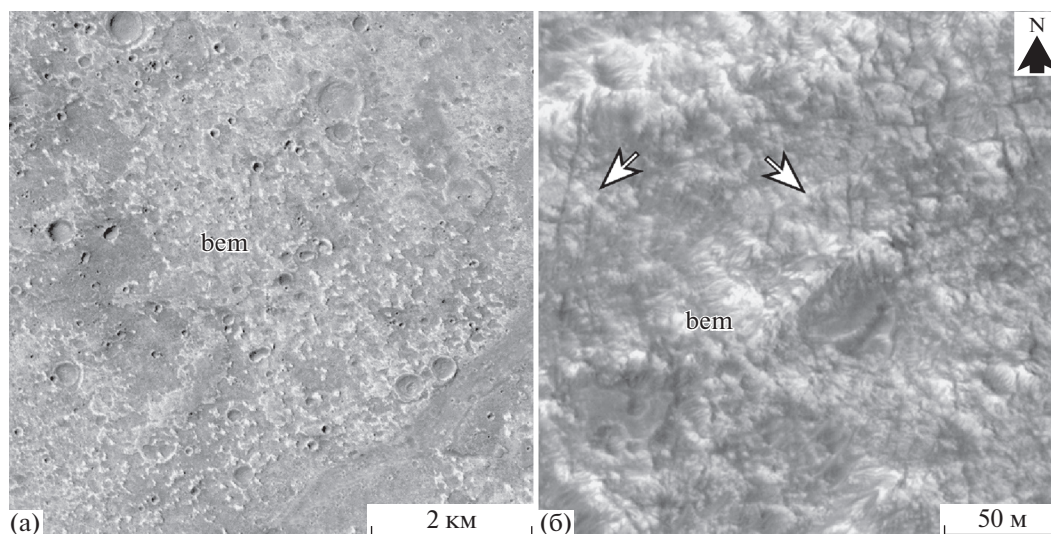
бой эрозионные останцы материковой местности (подразделение me, рис. 9а) и ударных кратеров (подразделение ed, рис. 9и), а также свежие выбросы из кратеров (подразделение ejd, рис. 9с).

#### ОБСУЖДЕНИЕ: ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ОБЛАСТИ ПОСАДКИ OXIA PLANUM

Определение и документация вещественных комплексов в области посадки Oxia Planum позволяют установить пространственное распределение этих комплексов в изучаемом регионе (рис. 4). В свою очередь, установление относительных и абсолютных возрастных соотношений закартиро-

ванных комплексов и выяснение их природы дает возможность реконструировать последовательность событий и процессов, действовавших в регионе, окружающем область посадки (рис. 10).

Наиболее древним комплексом в изучаемом регионе являются гладкие материковые равнины с извилистыми грядами (подразделение ups, рис. 3б). Морфологические аналоги гладких равнин, нарушенных извилистыми грядами, распространены во многих регионах Марса, где они образуют обширные плато в пределах материковой местности (например, Hesperia Planum, Lunae Planum). Во всех этих регионах гладкие равнины образованы наслоениями потоков базальтовых лав и представляют собой вулканические провинции (Gree-



**Рис. 8.** Морфология поверхности изъеденных покровов в районе посадки Oxia Planum (подразделение bem) при разном разрешении. (а) Мозаика снимков CTX, разрешение 6 м/пкс. Поверхность подразделения сильно эродирована, а его границы чрезвычайно извилисты. (б) Фрагмент снимка ESP\_042345\_1985 камеры HiRISE, разрешение 0.25 м/пкс. На поверхности подразделения различима полигональная текстура, образованная пересечениями темных линейментов (стрелки).

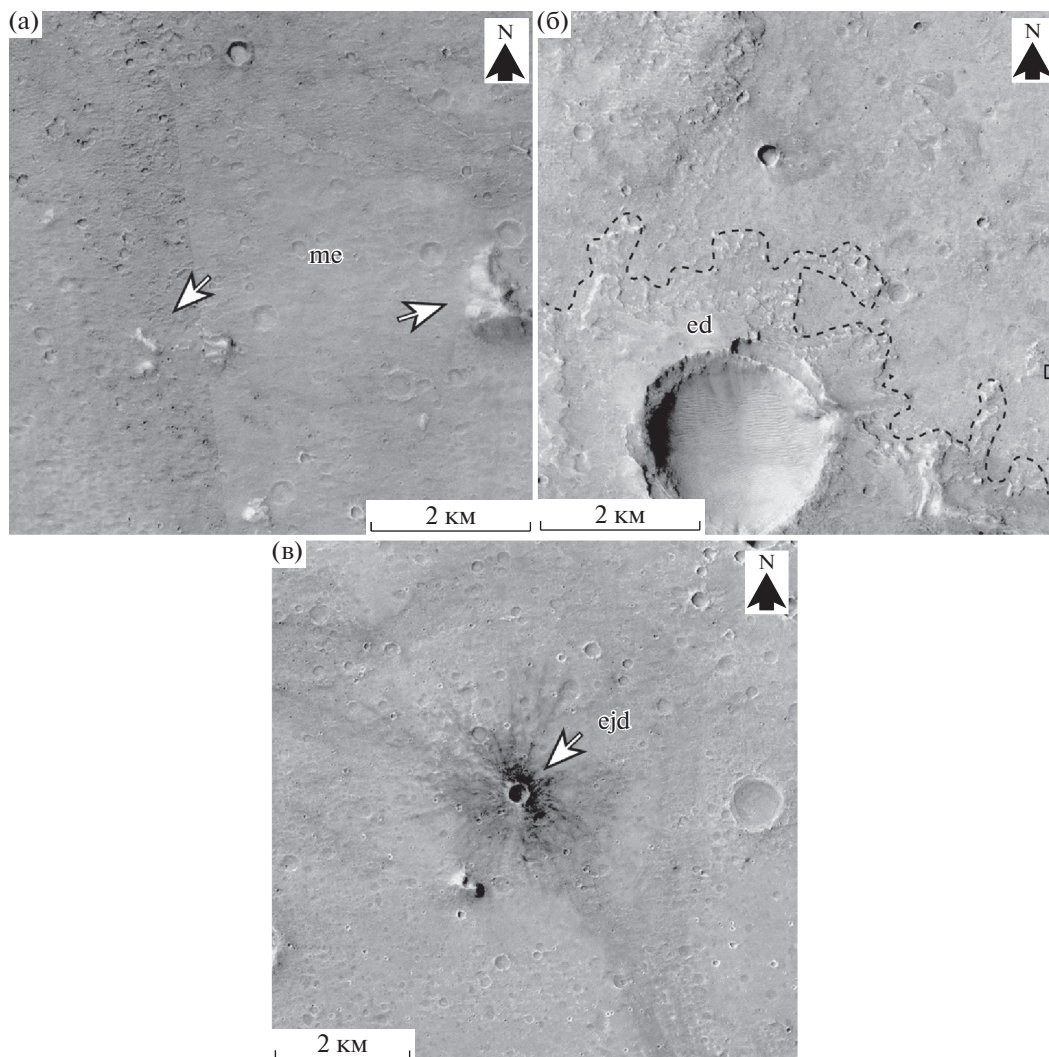
ley, Spudis, 1981), характерными структурами которых являются извилистые гряды. Для формирования гряд необходима слоистая среда и иногда гряды деформируют поверхность осадочных толщ (Plescia, Golombek, 1986). На всех планетах земной группы, однако, в подавляющем большинстве случаев извилистые гряды представляют собой характерные структуры вулканических провинций. Таким образом, наличие извилистых гряд на поверхности того или иного подразделения — надежный признак вулканической природы его материала.

Абсолютный модельный возраст многих лавовых равнин Марса в области Фарсида оценивается величинами примерно 3.6–3.7 млрд лет. В зависимости от модельных представлений о длительности геологических периодов марсианской геологической истории, этот возраст соответствует либо ранне-Гесперийскому (Ivanov, 2001), либо поздне-Нохийскому (Hartmann, 2005) периоду (рис. 10). Абсолютный модельный возраст подразделения ups составляет 3.65 млрд лет (рис. 5а), что соответствует времени становления значительной части вулканических провинций Марса (Headi др., 2002). Таким образом, первым различимым эпизодом геологической истории района, окружающего область посадки Oxia Planum, было формирование обширных лавовых равнин в период высокой вулканической активности на Марсе. Эти равнины слагают основную часть материкового домена области посадки, где равнины выходят на поверхность и, вероятно, подстилают весь домен равнинных низменностей, где лавовые равнины перекрыты более поздними отложениями.

На присутствие лавовых равнин в основании низменностей указывает также тот факт, что все молодые кратеры в пределах низин имеют небольшой диаметр (первые сотни метров), а их выбросы характеризуются низким альбедо (рис. 9в). Следовательно, на небольшой глубине равной примерно 1/10 диаметра кратеров под покровом более молодого материала залегает темный материал, характерный для базальтовых вулканических комплексов.

Другой комплекс материкового домена (подразделение uem) представляет собой останцы выбросов из крупного (16 км в диаметре) кратера (17.52° с.ш., 23.31° з.д.). Получить надежную оценку абсолютного модельного возраста этого кратера не представляется возможным, но он явно моложе лавовых равнин подразделения ups (рис. 10). Выбросы кратера эродированы и прорезаны терминальным руслом системы Соогоон Valles, так что данное ударное событие произошло до начала флювиальной активности в регионе посадки. Размер кратера указывает на то, что глубина экскавации составляла 1.5–2 км и в материале выбросов должно присутствовать вещество как лавовых равнин, так и подстилающего мега-реголита.

Наиболее интересным с научной точки зрения веществом материкового домена является материал светлых покровов (подразделение bem), которые по своей морфологии и текстуре поверхности аналогичны скоплениями филлосиликатов в других регионах Марса (Murchie и др., 2009). Основное скопление светлых покровов в области



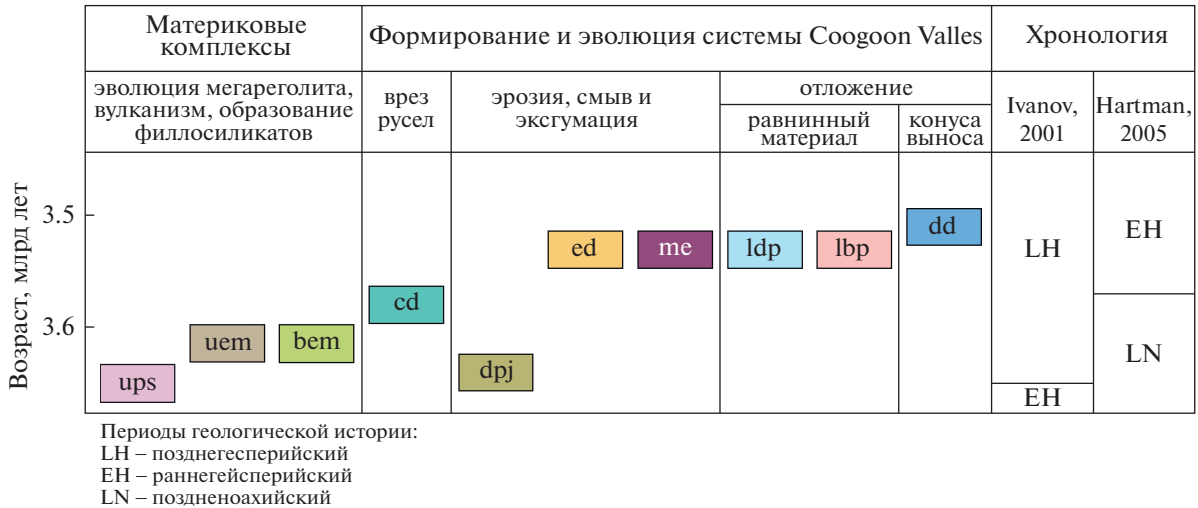
**Рис. 9.** (а) Эрозионные останцы (подразделение *me*), (б) деградированные кратерные выбросы (подразделение *ed*), (в) свежие темные кратерные выбросы (подразделение *ejd*). Выбросы таких кратеров, как правило, имеют заметно более низкое альbedo, чем окружающая местность. Во всех случаях фотооснова – мозаика снимков СТХ, разрешение 5 м/пкс.

исследования расположено в пределах материкового домена на правом борту терминального русла Coogoon Valles. Важно отметить, что светлые покровы в этой области не распространяются ни на днище русла, ни на его борта (рис. 4) и, вероятно, их формирование предшествовало эпизоду флювиальной активности. В этом случае образование подразделения *bet* относится к более ранним этапам геологической истории региона, окружающего область посадки Oxia Planum (рис. 10). Отложения предположительно глинистых минералов были размыты при формировании флювиальных русел и переотложены в пределах низменностей (рис. 4).

Следующий крупный эпизод геологической истории изучаемого эпизода связан с флювиальной активностью, которая привела к формирова-

нию целого набора структур и вещественных комплексов.

Русла системы Coogoon Valles представляют наиболее заметные флювиальные структуры, образованные в результате вертикальной эрозии под действием локализованных потоков. Топографически выразительные русла, глубина которых составляет десятки метров, присутствуют только в пределах материкового домена (рис. 2а), а в пределах низменностей они практически не имеют рельефа и заметны только по скоплениям рыхлого материала (подразделение *cd*, рис. 4). Такая разница глубины русел указывает на резкую смену режимов флювиальной деятельности при переходе от материка к низменностям. В пределах материкового домена доминировал локализованный эрозионный режим, приведший к формированию более глубоких флювиальных долин. В



**Рис. 10.** Корреляционная диаграмма подразделений, закартированных в области посадки. Диаграмма калибрована по оценкам абсолютного модельного возраста ключевых подразделений. Пояснения в тексте.

пределах низменностей, вероятно, действовали как эрозионный, так и аккумуляционный режимы (рис. 10). Резкая смена режимов указывает, что общая топографическая конфигурация района посадки Ochia Planum (два домена, разделенные региональной топографической ступенью) существовала до формирования системы русел Coogoon Valles.

На эрозионную деятельность в пределах низменностей указывают многочисленные деградированные выбросы ударных кратеров и эрозионные останцы (подразделения ed и me, соответственно), а также отсутствие извилистых гряд. Высота извилистых гряд на материке составляет первые десятки метров. Лавовые равнины подстилают низменности и перекрыты более поздними отложениями небольшой мощности, на что указывают темные выбросы малых ударных кратеров (рис. 9в). Отсутствие извилистых гряд на низменностях указывает на то, что слой толщиной первые десятки метров в пределах низменностей был удален после формирования лавовых равнин. На небольшую мощность эродированного слоя указывает также то, что выбросы относительно крупных ударных кратеров в пределах низин эродированы только в своей нижней части (рис. 9б).

Темный бугристый материал (подразделение dpj) может представлять собой еще одно свидетельство действия эрозионного режима в пределах низменностей. Заметно более низкое альbedo подразделения dpj, и ассоциация его обнажений с топографическими депрессиями древних кратеров и с руслами системы Coogoon Valles, где они выходят на низменность (рис. 4), может указывать на то, что материал подразделения представ-

ляет собой эксгумированные лавовые равнины (подразделение ups).

Наличие эродированных и эксгумированных типов местности (me, ed и dpj) в пределах топографического домена низменностей свидетельствует о выносе материала из региона, где располагается основная часть области посадки Ochia Planum. В то же время, на равнинных низменностях не видны формы рельефа, указывающие на существование локализованных потоков (основные и паразитные русла, каплевидные останцы, промоины). Отсутствие таких образований может говорить о том, что низменности в районе исследования представляли собой область, где доминировал площадной смыв.

Аккумуляционный режим в пределах низменностей был связан с отложением материала наиболее распространенных вещественных комплексов темных и светлых равнин (подразделения ldp и lbp, соответственно, рис. 10). Эти подразделения доминируют в области посадки (таблица) и частично перекрывают эрозионные и эксгумированные формы рельефа в пределах низменностей. Следовательно, они образовались позднее. Средняя оценка абсолютного модельного возраста светлых равнин составляет 3.53 млрд лет (рис. 5б), что, вероятно, отражает возраст отложения материала этих равнин и завершения главного этапа флювиальной активности в регионе, окружающей область посадки (рис. 10).

Светлые и темные равнины связаны постепенными переходами и, вероятно, представляют собой фациальные разности одного и того же подразделения, образованного в результате отложения материала материковой местности. Темные равнины расположены вблизи границы материкового домена (рис. 4). Более низкое альbedo под-

разделения ldp, вероятно, связано с преобладанием в нем относительно грубозернистой фракции вулканических материковых равнин (подразделение ups). С переотложением вулканического материала связано более низкое альбедо подразделения ldp.

В составе материала светлых равнин, которые располагаются дальше от материкового домена, вероятно, преобладает как более тонкая фракция, так и вещество светлых покровов (подразделение bet). Светлые полигональные грунты, встречающиеся среди светлых равнин (рис. 7б), могут представлять собой скопления переотложенного вещества светлых покровов. Кроме того, в пределах подразделения lbr широко развиты дюны и дюнные поля, которые практически всегда присутствуют в местных понижениях рельефа и ударных кратерах разной степени сохранности. Обилие дюн свидетельствует, что материал подразделения lbr во многом состоит из частиц песчаного размера, типичных для марсианских грунтов, 0.06–0.2 мм. Тем не менее поверхность подразделения lbr не представляет собой сплошное дюнное поле. Следовательно, песчаная компонента частично сцементирована и может представлять собой комковатый грунт и корки выветривания, из которых частицы песчаной и пылевой размерной фракции выдуваются ветром.

К завершающим этапам флювиальной активности в изучаемом регионе относится формирование конусов выноса (подразделение dd, рис. 10), которые перекрывают поверхность прилегающих гладких равнин (подразделение ldp). Отложения конусов локализованы вблизи топографической границы материк/низменность и представляют собой сравнительно небольшие образования (рис. 4, табл. 1). В строении конусов различимы немногочисленные слои (рис. 6б), свидетельствующие о том, что конусы формировались в несколько этапов. Изображения HiRISE показывают, что конусы сложены тонкозернистым материалом, отдельные глыбы или их скопления отсутствуют (рис. 6в). В понижениях рельефа на поверхности конусов развиты дюны. Дюны и отсутствие глыб свидетельствуют, что конусы сложены песками, переотложенными маломощными потоками из русел Coogoon Valles.

## ВЫВОДЫ

Детальный фотогеологический и топографический анализ поверхности в области посадки Oxia Planum, проведенный с использованием мозаик снимков CTX (разрешение 5 м/пкс) и точных ЦМР (предельное разрешение 1 м/пкс) позволяет сделать следующие выводы.

(1) Вся область посадки состоит из двух топографических доменов (материк и низменность),

разделенных резким региональным уступом. Такая конфигурация области региона, окружающего область посадки, существовала на протяжении всей различной геологической истории области исследования.

(2) Рельеф в пределах материкового домена контрастный с перепадами высот несколько десятков метров на расстояниях первые километры. В пределах низменностей рельеф выглажен, и меняется слабо, в пределах 100–150 м на расстоянии около 80 км. Уклоны на малых базах (1 м) не превышающие 7°, характеризуют примерно 75% поверхности в пределах низменностей.

(3) Первым главным эпизодом геологической истории изучаемого региона было становление обширных лавовых равнин, абсолютный модельный возраст которых, 3.65 млрд лет, относится ко времени высокой вулканической активности на Марсе. Лавовые равнины обнажаются в пределах материкового домена и подстилают основную часть низменностей в области посадки.

(4) Следующий после становления лавовых равнин крупный эпизод геологической истории в регионе посадки связан с флювиальной деятельностью, которая включала эрозионный и аккумуляционный режимы.

(5) Образования, связанные с эрозионной деятельностью, представлены руслами системы Coogoon Valles в пределах материкового домена и с эрозионными останцами и эксгумированными лавовыми равнинами в пределах низменностей. Отсутствие в пределах низменностей структур, указывающих на существование локализованных потоков говорит о том, что в этом топографическом домене доминировал площадной смыв.

(6) Вещество, которое предстоит опробовать марсоходу экспедиции Экзо Марс, связано главным образом с аккумуляционной деятельностью и представлено отложениями темных и светлых гладких равнин низменностей (подразделения ldp и lbr, соответственно). Материал обоих типов равнин представлен веществом, вынесенным из материкового домена. Абсолютный модельный возраст аккумуляционной фазы флювиальной активности оценивается величиной 3.53 млрд лет.

(7) Материал темных равнин преимущественно состоит из более грубозернистой фракции материковых лавовых равнин, переотложенной вблизи топографической границы, разделяющей материк и низменности.

(8) Отложения светлых равнин доминируют в области посадки и представлены более тонкой фракцией лавовых равнин и веществом светлых покровов (подразделение bet), в составе которого, вероятно, доминируют глинистые минералы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Bibring J.-P., Langevin Y., Mustard J.F., Poulet F., Arvidson R., Gendrin A., Gondet B., Mangold N., Pinet P., Forget F.* Global mineralogical and aqueous Mars history derived from OMEGA/Mars Express data // *Science*. 2006. V. 312. P. 400–404.
- Bibring J.-P., Loizeau D., Pelkey S.M., Murchie S., Mustard J.F., Bishop J., Ehlmann L., Gondet B., Mangold N., Poulet F., Roach L.H., Seelos F.* Coupled OMEGA-CRISM observations of Marwth Vallis // 37th Lunar and Planet. Sci. Conf. 2007. Abstract #2160.
- Bishop J., Loizeau D., McKeown N.K., Saper L., Dyar M.D., Des Marais D.J., Parente M., Murchie S.L.* What the ancient phyllosilicates at Mawrth Vallis can tell us about possible habitability on early Mars // *Planet. and Space Sci.* 2013. V. 86. P. 130–149.
- Bishop J., Wray J.J., Sessa A., Danielsen J., Ehlmann L., Murchie S.L., Horgan B., Gross C., Parente M., Seelos F.P.* Evidence of salty residues in layered outcrops at Mawrth Vallis and implications for evaporite environment on early Mars // 49th Lunar and Planet. Sci. Conf. 2018. Abstract #1117.
- 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. Cambridge Univ. Press, 2006. 307 p.
- Carter J., Quantin C., Thollot P., Loizeau D., Ody A., Lozach L.* Oxia Planum, a clay-laden landing site proposed for the ExoMars rover mission: Aqueous mineralogy and alteration scenarios // 47th Lunar and Planet. Sci. Conf. 2016. Abstract #2064.
- Chojnacki M., Banks M., Urso A.* Wind-driven erosion and exposure potential at Mars 2020 rover candidate-landing sites // *J. Geophys. Res.* 2018. V. 123. P. 468–488. <https://doi.org/10.1002/2017JE005460>
- Dobrea E.Z.N., Bishop J.L., McKeown N.K., Fu R., Rossi C.M., Michalski J.R., Heinlein C., Hanus V., Poulet F., Mustard J.F., Murchie S., McEwen A.S., Swayze G., Bibring J.-P., Malaret E., Hash C.* Mineralogy and stratigraphy of phyllosilicate-bearing and dark mantling units in the greater Mawrth Vallis/west Arabia Terra // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. E00D19. <https://doi.org/10.1029/2009JE003351>
- Ehlmann B.L., Mustard J.F., Fassett, C.I., Schon S.C., Head J.W., Des Marais D.J., Grant J.A., Murchie S.L.* Clay minerals in delta deposits and organic preservation potential on Mars // *Nature Geosci.* 2008. V. 1. P. 355–358.
- Ehlmann B.L., Mustard J.F., Swayze G.A., Clark R.N., Bishop J.L., Poulet F., Des Marais D.J., Roach L.H., Milliken R.E., Wray J.J., Barnouin-Jha O., Murchie S.L.* Identification of hydrated silicate minerals on Mars using MRO-CRISM: Geologic context near Nili Fossae and implications for aqueous alteration // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. E00D08. <https://doi.org/10.1029/2009JE003339>
- Fawdon P., Balme M.R., Bridges J., Davis J.M., Gupta S., Quantan-Nataf C.* The ancient fluvial catchment of Oxia Planum: The ExoMars 2020 rover landing site // 50th Lunar and Planet. Sci. Conf. 2019. Abstract #2356.
- Greeley R., Spudis P.* Volcanism on Mars // *Rev. Geophys. Space Phys.* 1981. V. 19. P. 13–41.
- Hartmann W.K.* Martian cratering 8: Isochron refinement and the chronology of Mars // *Icarus*. 2005. V. 174. P. 294–320.
- Head J.W., Kreslavsky M.A., Pratt S.* Northern lowlands on mars: Evidence for widespread volcanic flooding and tectonic deformation in Hesperian Period // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. NE1. 5003. <https://doi.org/10.1029/2000JE001445>
- Ivanov B.A.* Mars/Moon cratering rate ratio estimates // *Space Sci. Rev.* 2001. V. 96. P. 87–104.
- Ivanov M.A., Head J.W.* Chryse Planitia, Mars: Topographic configuration, outflow channel continuity and sequence, and tests for hypothesized ancient bodies of water using Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA) data // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. P. 3275–3296.
- Loizeau D., Mangold N., Poulet F., Bibring J.-P., Gendrin A., Gomez C., Langevin Y., Gondet B., Ansan V., Masson P., Neukum G.* Phyllosilicates rich terrains in Mawrth Vallis region, Mars, as seen by OMEGA and HRSC/Mars Express // 37th Lunar and Planet. Sci. Conf. 2006. Abstract #1658.
- Loizeau D., Mangold N., Poulet F., Ansan V., Hauber E., Bibring J.-P., Gondet B., Langevin Y., Masson P., Neukum G.* Stratigraphy in the Mawrth Vallis region through OMEGA, HRSC color imagery and DTM // *Icarus*. 2010. V. 205. P. 396–418.
- Loizeau D., Werner S.C., Mangold N., Bibring J.-P., Vago J.L.* Chronology of deposition and alteration in the Mawrth Vallis region, Mars // *Planet. and Space Sci.* 2012. V. 72. P. 31–43.
- Loizeau D., Mangold N., Poulet F., Bibring J.-P., Bishop J.L., Michalski J., Quantin C.* History of the clay-rich unit at Mawrth Vallis, Mars: High resolution mapping of a candidate landing site // *J. Geophys. Res.* 2015. V. 120. P. 1820–1846. <https://doi.org/10.1002/2015JE004894>
- Loizeau D., Balme M.R., Bibring J.-P., Bridges J.C., Fair A.G., Flahaut J., Hauber E., Lorenzoni L., Poulakis P., Rodionov D., Vago J.L., Werner S., Westall F., Whyte L., Williams R.M.* Exo Mars 2020 surface mission: Choosing a landing site // 50th Lunar and Planet. Sci. Conf. 2019. Abstract #2378.
- Mangold, N., Poulet F., Mustard J.F., Bibring J.-P., Gondet B., Langevin Y., Ansan V., Masson P., Fassett C., Head J.W., Hoffmann H., Neukum G.* Mineralogy of the Nili Fossae region with OMEGA/Mars Express data: 2. Aqueous alteration of the crust // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. E08S04. <https://doi.org/10.1029/2006JE002835>
- McEwen A.S., Eliason E.M., Bergstrom J.W., Bridges N.T., Hansen C.J., Delamere W.A., Grant J.A., Gulick V.C., Herkenhoff K.E., Keszthelyi L., Kirk R.L., Mellon M.T., Squyres S.W., Thomas N., Weitz C.M.* Mars Reconnaissance Orbiter's High Resolution Imaging Science Experiment (HiRISE) // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. E05S02. <https://doi.org/10.1029/2005JE002605>
- Molina A., Lopez I., Prieto-Ballesteros O., Fernandez-Remolar D., de Pablo M.A., Gomez F.* Coogoon Valles, western

- Arabia Terra: Hydrological evolution of a complex Martian channel system // *Icarus*. 2017. V. 293. P. 27–44.
- Murchie S., Arvidson R., Bedini P. (47 others)*. Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars (CRISM) on Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. E05S03. <https://doi.org/10.1029/2006JE002682>
- Murchie S., Mustard J.F., Ehlmann B.L. (14 others)*. A synthesis of Martian aqueous mineralogy after 1 Mars year of observations from the Mars Reconnaissance Orbiter // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. E00D06. <https://doi.org/10.1029/2009JE003342>
- Mustard J.F., Poulet F., Head J.W., Mangold N., Bibring J.-P., Pelkey S.M., Fassett C.I., Langevin Y., Neukum G.* Mineralogy of the Nili Fossae region with OMEGA/Mars Express data: 1. Ancient impact melt in the Isidis Basin and implications for the transition from the Noachian to Hesperian // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. E08S03. <https://doi.org/10.1029/2006JE002834>
- Mustard J.F., Murchie S.L., Pelkey S.M. (32 others)*. Hydrated silicate minerals on Mars observed by the Mars Reconnaissance Orbiter CRISM instrument // *Nature*. 2008. V. 454. P. 305–309.
- Mustard J.F., Ehlmann B.L., Murchie S.L., Poulet F., Mangold N., Head J.W., Bibring J.-P., Roach L.H.* Composition, morphology, and stratigraphy of Noachian crust around the Isidis basin // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. E00D12. <https://doi.org/10.1029/2009JE003349>
- Pajola M., Rossato S., Baratti E., Mangili C., Mancarella F., McBride K., Coradini M.* The Simud-Tiu Valles hydrologic system: A multidisciplinary study of a possible site for future Mars on-site exploration // *Icarus*. 2016. V. 268. P. 355–381.
- Pajola M., Rossato S., Baratti E., Pozzobon R., Quantin C., Carter J., Thollot P.* Boulder abundances and size-frequency distributions on Oxia Planum-Mars: Scientific implications for the 2020 ESA ExoMars rover // *Icarus*. 2017. V. 296. P. 73–90.
- Plescia J.B., Golombek M.P.* Origin of planetary wrinkle ridges based on the study of terrestrial analogs // *Geol. Soc. Am. Bull.* 1986. V. 97. P. 1289–1299.
- Poulet F., Carter J., Bishop J.L., Loizeau D., Murchie S.M.* Mineral abundances at the final four curiosity study sites and implications for their formation // *Icarus*. 2014. V. 231. P. 65–76.
- Quantin C., Carter J., Thollot P., Broyer J., Lozach L., Davis J., Grindrod P., Pajola M., Baratti E., Rossato S., Allemand P., Bultel B., Leyrat C., Fernando J., Ody A.* Oxia Planum, the landing site for ExoMars 2018 // 47th Lunar and Planet. Sci. Conf. 2016. Abstract #2863.
- Rotto S., Tanaka K.L.* Geologic/geomorphic map of the Chryse Planitia region of Mars // *U.S. Geol. Surv. Misc. Inv. Ser. Map. I-2441* 1995.
- Smith D.E., Zuber M.T., Solomon S.C., Phillips R.J., Head J.W., Garvin J.B., Banerdt W.B., Muhleman D.O., Pettengill G.H., Neumann G.A., Lemoine F.G., Abshire J.B., Aharonson O., Brown C.D., Hauck S.A., Ivanov A.B., McGovern P.J., Zwally H.J., Duxbury T.C.* The global topography of Mars and implications for surface evolution // *Science*. 1999. V. 284. P. 1495–1503.