

Посвящается 270-летию МГУ имени М.В. Ломоносова

УДК 523.43-1/-8

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2023-63-2-3-13

**ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ТИПЫ ГРЯЗЕВОГО ВУЛКАНИЗМА
В РАЙОНАХ CYDONIA И ACIDALIA НА МАРСЕ****Цзюнь Чу¹, Михаил Арсеньевич Иванов², Анатолий Михайлович Никишин³**¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; vladimirchujun@yandex.ru² Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия; mikhail_ivanov@brown.edu³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; amnikishin@gmail.com

Аннотация. Малые конусообразные структуры широко распространены на северных равнинах Марса. Они обычно интерпретируются как грязевые вулканы из-за их близкого морфологического сходства с грязевыми вулканами Земли (например, в Азербайджане и около Азовского моря). Если такая интерпретация верна, то малые конусы могут служить свидетельством существования обширного подповерхностного грязевого источника, который, в свою очередь, мог быть образован донными отложениями крупного водного резервуара (океана), существовавшего на северных равнинах Марса в прошлые эпохи геологической истории этой планеты. По сравнению с грязевыми вулканами Земли, морфология малых конусов на Марсе меняется в более широком диапазоне, что может быть связано с большим разнообразием механизмов формирования марсианских холмов. В данном исследовании мы изучали морфологию малых холмов в областях Cydonia и восточная Acidalia, которые расположены вблизи дихотомической границы в пределах северных равнин Марса и установили, что существуют 5 типов холмов, морфология которых, вероятно, характеризует особенность водо-грязевого резервуара.

Ключевые слова: грязевые вулканы; генетические типы; холмы; моренное отложение; Формация Vastitas Borealis

Для цитирования: Чу Ц., Иванов М.А., Никишин А.М. Генетические типы грязевого вулканизма в районах Cydonia и Acidalia на Марсе // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2023. № 2. С. 3–14.

**GENETIC TYPES OF MUD VOLCANISM IN THE CYDONIA
AND ACIDALIA REGIONS OF MARS****Chu Jun¹, Mikhail A. Ivanov², Anatoly M. Nikishin³**¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; vladimirchujun@yandex.ru² Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, Moscow, Russia; mikhail_ivanov@brown.edu³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; amnikishin@gmail.com

Abstract. Small cone/mound-shaped structures are widespread on the northern plains of Mars. They are usually interpreted as mud volcanoes because of their close morphological resemblance to mud volcanoes on Earth (for example, in Azerbaijan and near the Sea of Azov). If this interpretation is correct, the small cones/mounds could be evidence of the existence of an extensive subsurface mud source, which, in turn, could be formed by the bottom sediments of a large water reservoir (ocean) that existed on the northern plains of Mars in the past eras of this planet's geological history. Compared to mud volcanoes on Earth, the morphology of small cones/mounds on Mars varies over a wider range and, which may be due to a greater variety of mechanisms of formation of Martian cones/mounds. In this study, we studied the morphology of small hills in the Cydonia and eastern Acidalia regions, which are located near the dichotomous boundary within the northern plains of Mars and found that there are 5 types of cones/mounds, whose morphology probably characterizes the water-mud reservoir features.

Keywords: mud volcanoes; genetic types; cones/mounds; moraine deposition; Vastitas Borealis Formation

For citation: Chu J., Ivanov M.A., Nikishin A.M. Genetic types of mud volcanism in the Cydonia and Acidalia regions of Mars. *Moscow University Geol. Bull.* 2023; 2: 3–14. (In Russ.)

Введение. Формация Vastitas Borealis, покрывающая основную часть поверхности северных равнин Марса, может представлять собой донные отложения древнего марсианского океана [Parker et al., 1989, 1993, Clifford and Parker, 2001; Head et al., 1998; Kreslavsky and Head, 2002; Carr and Head, 2003]. Эта гипотеза подкрепляется рядом морфологических признаков, таких как наличие обширных областей развития гигантских полигонов [Lucchitta, 1981; Mc-

Gill and Hills, 1992; Hiesinger and Head, 2000; Ivanov et al., 2020], скопления ударных кратеров с необычной морфологией выбросов (лепешковидные выбросы [Barlow et al., 2000; Tanaka et al., 2005; Ivanov et al., 2014]), широкое распространение малых конусов [Davis and Tanaka, 1995; Tanaka, 1997, 2005; Tanaka et al., 2000, 2003, 2008]. Кроме того, узкий интервал изменения высотного положения внешней границы формации Vastitas Borealis, так называемый контакт

Deuteronilus, так же серьезно подкрепляет гипотезу существования крупного водного резервуара на северных равнинах Марса [Head et al., 1999; Carr and Head, 2003; Perron et al., 2007; Ivanov et al., 2017; Citron et al., 2018].

Малые конусы — одни из наиболее распространенных образований на поверхности северных равнин. Первоначально эти конусы интерпретировались как результат обычного, «горячего», вулканизма [Frey et al., 1979; Frey and Jarosewich, 1982; Bridges et al., 2003]. Однако по мере появления изображений более высокого разрешения, новых данных о спектральных характеристиках поверхности и высокоточных топографических данных, малые конусы стали интерпретировать как постройки «холодного», грязевого вулканизма, подобные тем, что распространены на Земле, например, в Азербайджане или около Азовского моря [Farrand et al., 2005; Kite et al., 2007; Rodriguez et al., 2007; Skinner and Tanaka, 2007; Allen et al., 2009; Oehler and Allen., 2009; Skinner and Mazzini., 2009; McGowan, 2009; McGowan and McGill, 2010; Okubo et al., 2016].

На северных равнинах Марса конусы наиболее распространены на равнинах Cydonia, Acidalia, где они были разделены на северную и южную группы [Frey and Jarosewich, 1982; Farrand et al., 2005; Oehler et al., 2010] и Utopia, где конусы иногда образуют извилистые цепочки, характерные для паппилярной местности (Thumbprint terrain, [Lockwood et al., 1992; Ivanov, et al., 2014]). Во всех этих регионах морфология и особенности пространственного распределения конусов изменяются, что, возможно, отражает разные условия их формирования [Farrand et al., 2005]. В предыдущих исследованиях, однако, конусы описывались как единая популяция грязевых вулканов, связанная с вероятным присутствием северного океана, а морфологическим вариациям уделялось недостаточное внимание. С нашей точки зрения такие вариации могут характеризовать генетические типы конусов и, следовательно, условия их образования. В настоящей работе мы рассматриваем области Cydonia и восточная Acidalia с целью выделения специфических морфологических типов конусов.

Данные и методы. Фотогеологический анализ основан на изображениях, полученных камерами CTX (Context Camera, разрешение 6 м/пикс) и HiRISE (High Resolution Image Science Experiment, разрешение 0.25–0.32 м/пикс). Кроме того, использовались данные спектрометров THEMIS (Thermal Emission Imaging System, дневные и ночные), позволяющие анализировать вариации тепловой инерции грунта (пространственное разрешение 100 м/пикс).

Изображения с высоким разрешением позволяют выделить однородные морфологические комплексы, детально изучить их морфологию и определить возрастные взаимоотношения между ними.

Геологический контекст. Область исследования расположена к северу от равнины Chryse между 32–48° с. ш. и 20° з. д. – 4° в. д. (рис. 1) и включает

восточную часть равнины Acidalia (центр примерно на 44° с. ш., 21° з. д.) и часть области Cydonia Mensae (центр примерно на 34° с. ш., 9° з. д.). Общая геология этого района исследовалась в работах [Witbeck and Underwood, 1984; Scott and Tanaka, 1986; Tanaka et al., 2005; McGill, 2005].

Область исследования в основном расположена вблизи дихотомической границы в западной части провинции Arabia Terra, где высота местности понижается примерно от –3,8 км (Arabia Terra) до –4,8 км (Acidalia Planitia). Acidalia Planitia занимает большую часть области исследования и расположена на ее западе и северо-западе. На снимках CTX это район выглядит как морфологически монотонная равнина с умеренным альбедо. За исключением нескольких невысоких выступов длиной в десятки метров, поверхность равнины очень ровная. Альбедо отдельных участков визуально более высокое и из-за этого поверхность равнины имеет выраженный пятнистый вид. Такие пятна наиболее заметны в юго-западном углу исследуемой области. На равнине Acidalia широко проявлены полигональные трог (в северо-западной части изучаемой территории) и небольшие холмы, которые подробно обсуждаются в этой статье. Полигональные трог имеют в длину до нескольких десятков километров и демонстрируют U-образный поперечный профиль, который в некоторых случаях может быть V-образным или коробчатым. Глубина трогов небольшая и составляет первые десятки метров. Иногда трог образуют круговые формы, маркируя валы погребенных ударных кратеров [McGill, 1989]. Равнинная местность с полигональными трогами и холмами отмечена как внутреннее подразделение северной равнины (ABvi, [Tanaka et al., 2005]), или как подразделение однородного равнинного материала (AHph, [McGill, 2005]).

Район Cydonia Mensae занимает переходную зону между равниной Acidalia Planitia и материком Arabia Terra и характеризуется множеством плосковершинных холмов (столовых гор), которые могут представлять собой останцы материковой местности. Размеры холмов меняются от сотен метров до нескольких километров, а высота редко превышает 200 м [McGill, 2005]. Между холмами расположена равнинная местность, на которой, в отличие от равнины Acidalia Planitia, редко видны трещины/троги. Район Cydonia Mensae был закартирован либо как краевое подразделение северных равнин (ABvm, [Tanaka et al., 2005]), либо как подразделение пятнистых равнин (AHpsp, [McGill, 2005]).

По всей исследуемой территории разбросаны ударные кратеры разного диаметра. Самый крупный из них — ударный кратер Bamberg (диаметр 51 км), который находится на границе Arabia terra Cydonia Mensae. У ударных кратеров в области изучения преобладают лопастевидные и лепешковидные выбросы, свидетельствующие о значительном содержании льда-воды в породах мишени.

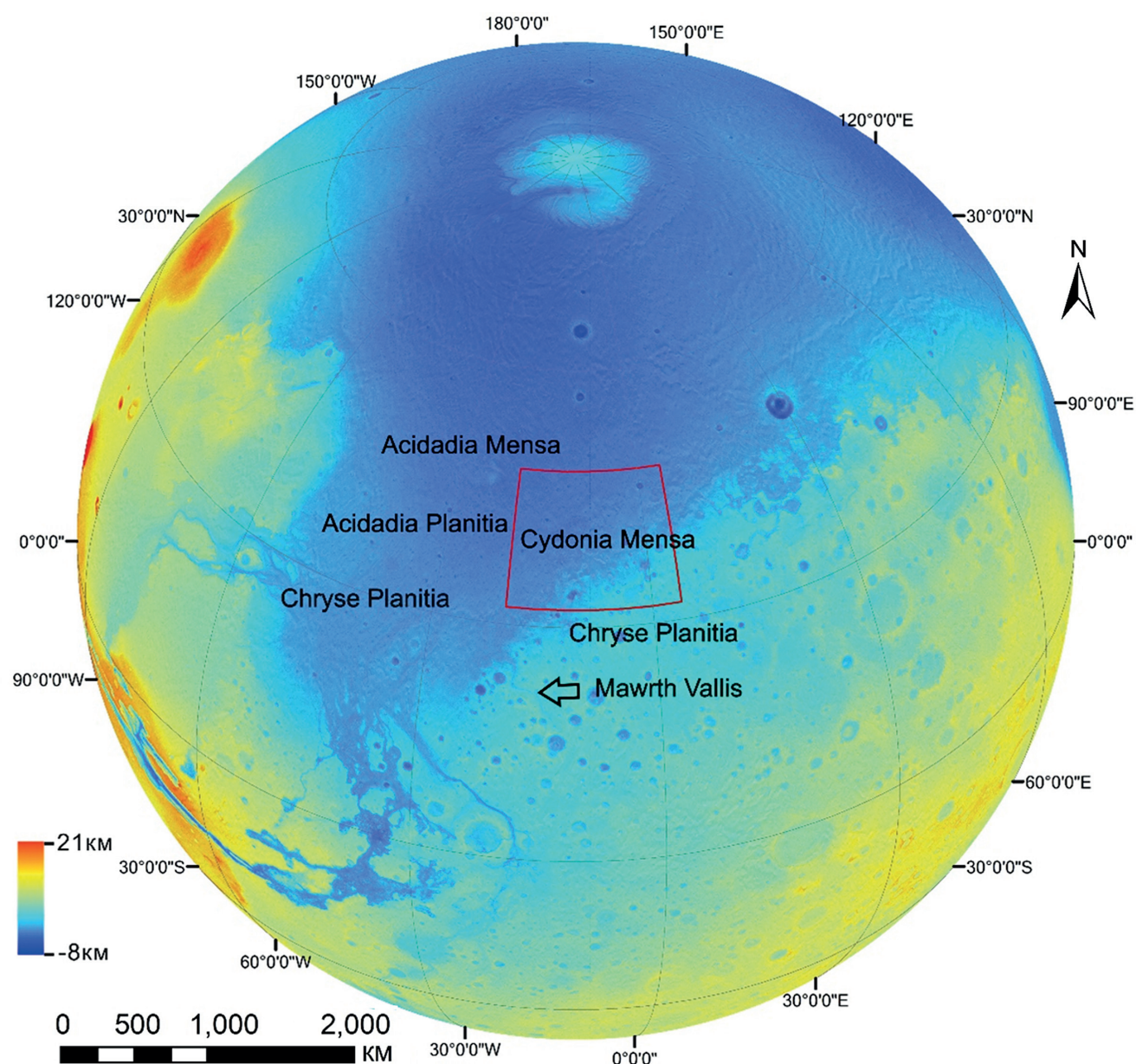


Рис. 1. Исследуемый район, показан красным контуром. Проекция ортогональная с центром (40° с.ш. и 10° в.д.) (топографическая карта Mars Orbital Laser Altimeter наложена на мозаику дневных изображений спектрометра THEMIS)

Возраст поверхности материка Arabia Terra считается ноахийским (более 4 млрд лет), а возраст поверхности Acidalia Planitia был оценен по частотно-размерному распределению ударных кратеров величиной 3,58 млрд лет (Гесперийский, [Ivanov et al., 2020]). Возраст поверхности в Cydonia Mensae представляет собой возраст последнего эрозионного эпизода и оценивается как амазонийский.

Морфологическая классификация холмов в области исследования. По морфологическим особенностям и соотношениям холмов между собой и с окружающей местностью нами было выделено пять их морфологических типов.

Тип 1 (рис. 2). Куполовидные холмы. Образования этого типа расположены в северо-западной

части исследуемого района на удалении от границы северных равнин с материковой местностью. На карте, составленной [McGill, 2005], эта местность классифицируется как подразделения гомогенного материала равнин (Homogeneous ANph), которое характеризуется как почти гладкие однородные равнины с умеренным альбедо и очень слабыми яркими полосами в некоторых местах. Поверхность равнин рассечена многочисленными полигональными трогами. На изображениях камеры СТХ холмы в этой области имеют высокое альбедо в видимом диапазоне, что контрастирует с равнинным материалом, имеющим низкое альбедо. Эти холмы в основном встречаются как одиночные структуры, хотя в некоторых случаях они образуют группы из

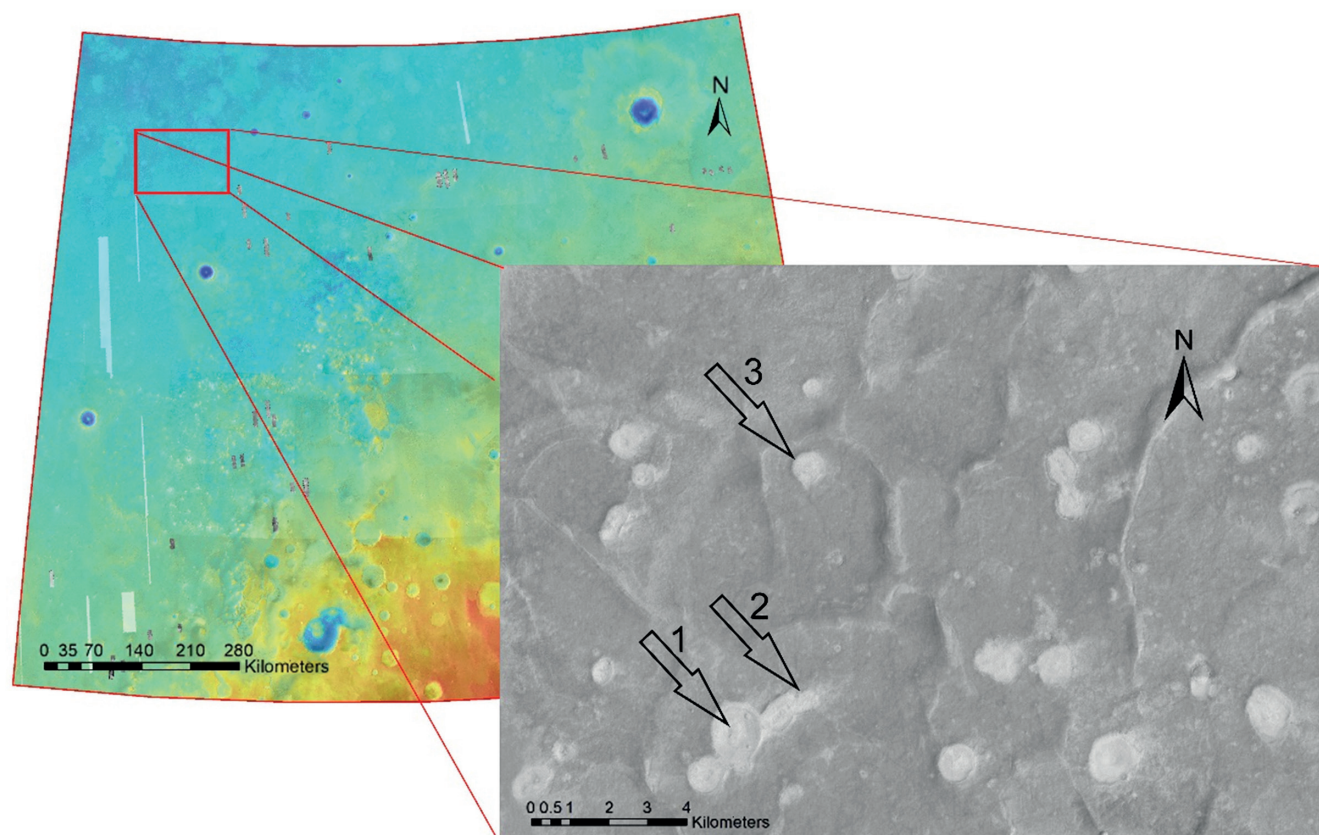


Рис. 2. Изображение холма первого типа. Стрелка 1 указывает на кальдерообразную депрессию на вершине конуса, стрелка 2 указывает на возможный поток от холма. Стрелка 3 указывает на ров вокруг холма. Центр изображения на $46,32^\circ$ с.ш. $16,67^\circ$ в.д. Изображение камеры CTX

двух или трех холмов. Эти структуры встречаются в области развития гигантских полигональных торгов и располагаются внутри целиковых блоков, вне трогов. Высота холмов невелика и составляет 35–65 м по данным альтиметра MOLA [Farrand et al., 2005], а по топографическим данным, полученным по стереопарам изображений HiRISE, высота некоторых холмов может достигать 180 м [Oehler et al., 2010]. Мы закартировали 4009 холмов в этом регионе, и измерили их диаметр, который варьируется от 120 до 4224 м; средняя плотность холмов составляет $36/1000 \text{ км}^2$. В вершинной части холмов часто видна кальдерообразная топографическая депрессия (рис. 2). Подножие холмов обычно окружено рвом. В редких случаях вблизи подножия холмов видны образования, напоминающие очень тонкие потоки (рис. 2).

Тип 2 (рис. 3). Цепочки холмов. Эти образования в основном встречаются в северо-восточной части района исследований. Здесь плотность холмов намного выше, чем в области, где находятся холмы первого типа. Равнины, на которых расположены цепочки холмов, находятся в периферических частях формации Vestitas Borealis вблизи ее границы, где развита папиллярная местность [Ivanov et al., 2017]. Холмы, собранные в цепочки, также демонстрируют более высокое альbedo на дневной съемке и низкое на ночной съемке THEMIS. Это указывает

на низкую тепловую инерцию материала холмов и, следовательно, на его тонкозернистый характер. Главной отличительной особенностью холмов второго типа является то, что они формируют узкие извилистые гряды, которые образуют папиллярный узор, повторяющий извивы близлежащей границы формации Vestitas Borealis [Ivanov et al., 2017]. По своей морфологии, холмы в этой области можно разделить на две группы, куполовидные (тип 2а) и блиновидные (тип 2б) [e.g. Di Pietro et al., 2021]. Куполовидные холмы имеют большее сходство с холмами типа первого по их большей выразительности в рельефе, их диаметры варьируются от 120 до 600 м. Куполовидные холмы более редкие и встречаются только на периферии выбросов ударного кратера Yakima и безымянного кратера к востоку от него. Блиновидные холмы встречаются в исследуемом районе гораздо чаще, они сливаются и образуют гряды папиллярной местности. Только у некоторых блиновидных холмов можно измерить их размер; их диаметр составляет около 500 м. В вершинной части холмов обеих морфологических групп имеются кальдерообразные депрессии. Длина гряд папиллярной местности, образованных слиянием оснований холмов изменяется от 240 м до 16,5 км. Надежные измерения высоты холмов отсутствуют.

Тип 3 (рис. 4). Поликальдерные холмы. Характерной особенностью таких холмов является

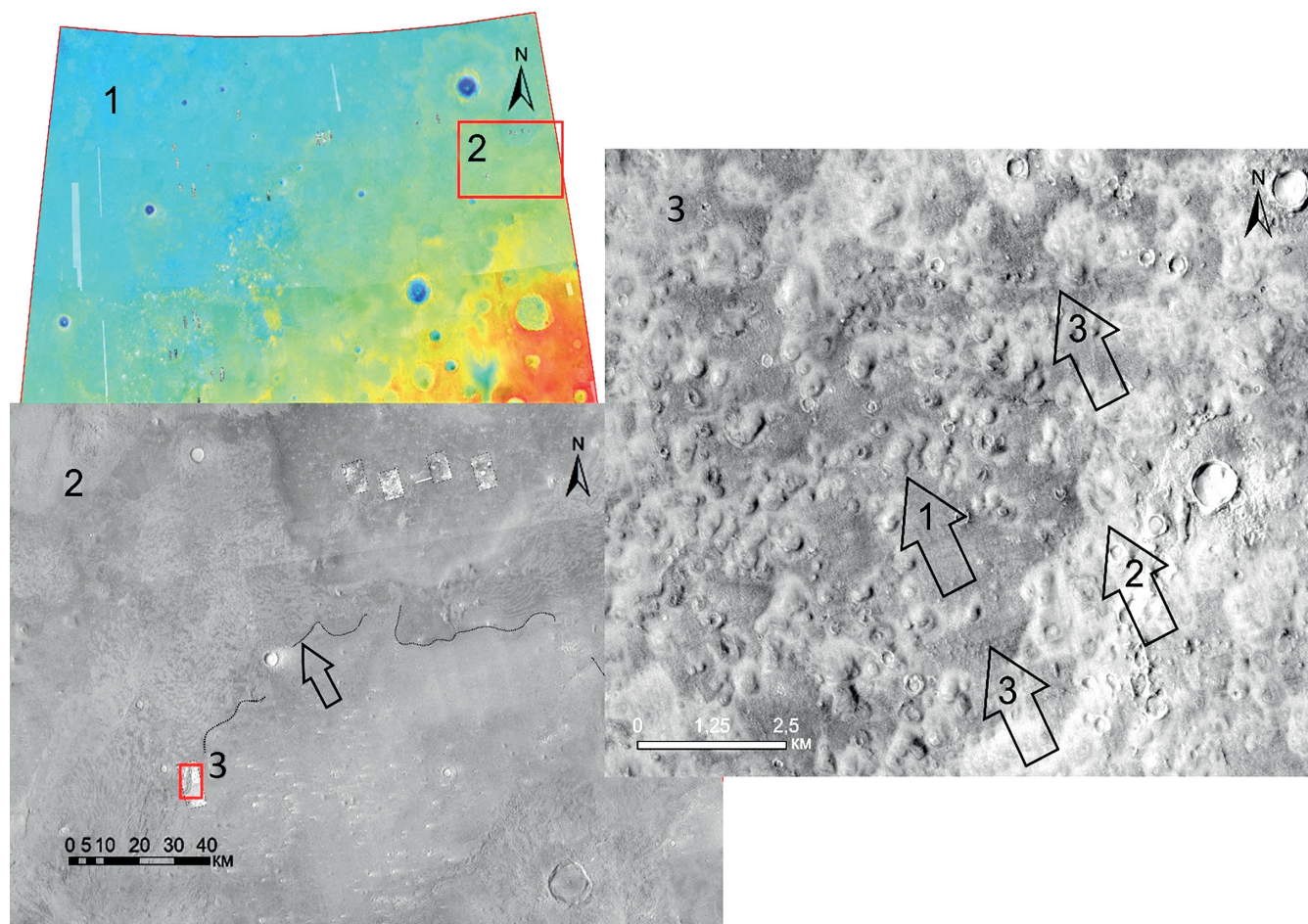


Рис. 3. Изображение конусов второго типа. На изображении 2 показан район концентрации конусов второго типа, черная стрелка указывает границу лопасти, на которой развиты конусы второго типа. Центр изображения на $43,78^\circ$ с.ш. $3,03^\circ$ в.д. (Изображение камеры CTX). На изображении 3 стрелка с номером 1 указывает на куполовидные холмы, стрелка с номером 2 указывает на блиновидные холмы. Стрелка с номером 3 указывает на местность между холмами. Центр изображения на $43,85^\circ$ с.ш. $0,71^\circ$ в.д. (Изображение камеры CTX)

сложное строение вершинной части, где часто присутствуют ямки небольшого диаметра и комплекс более крупных кальдероидных структур. Ров, окружающий холмы, как правило, отсутствует. В некоторых случаях холмы образуют кластеры или линейные группы, состоящие из нескольких структур [McGowan, 2009]. Важной особенностью этих холмов является большое значение отношения диаметра кальдеры к диаметру основания; среднее значение этого отношения составляет 0,51 [McGowan, 2009]. Холмы этого типа встречаются в единственном месте области исследования, где развита так называемая крапчатая местность в пределах подразделения АН-рсп [McGill, 2005]. Эта местность характеризуется скоплением малых (до 3 км в поперечнике) бугров с высоким альбедо.

Тип 4 (рис. 5). Холмы, собранные в кластеры. Холмы этого типа, подобно холмам третьего типа, также имеют большое отношение диаметра кальдеры к диаметру основания, но отличаются от холмов третьего типа тем, что они являются конусовидными, сливаются друг с другом в общие кластеры поперечником до 1,5 км. Холмы этого типа встречаются

очень редко и сосредоточены вокруг одной из столовых гор в пределах подразделения Ada (отложения пролювиальных конусов [McGill, 2005]).

Тип 5 (рис. 6). Южные цепочки холмов. Холмы этого типа в основном встречаются в юго-западной части района исследования. В отличие от других районов, холмы имеют кальдероидные депрессии разного диаметра и встречаются в длинных и коротких цепочках. Даже если цепочка состоит из двух холмов, они соединяются между собой низкой перемычкой. Длина цепочек изменяется от 300 м (два-три холма) до 13 км (цепочки из десятков холмов). Цепочки холмов, как правило, ориентированы ортогонально к простиранию внешней границы формации Vastitas Borealis (рис. 6, (5)). Важной особенностью этих холмов является то, что большинство из них не представляют собой структуры, меняющие яркость на дневных и ночных изображениях спектрометра THEMIS. Это говорит о том, что эти холмы, в отличие от других, сложены из материалов, имеющих сходный гранулометрический состав с окружающими равнинами. В этом отношении холмы данного типа имеют большее сходство с образованиями

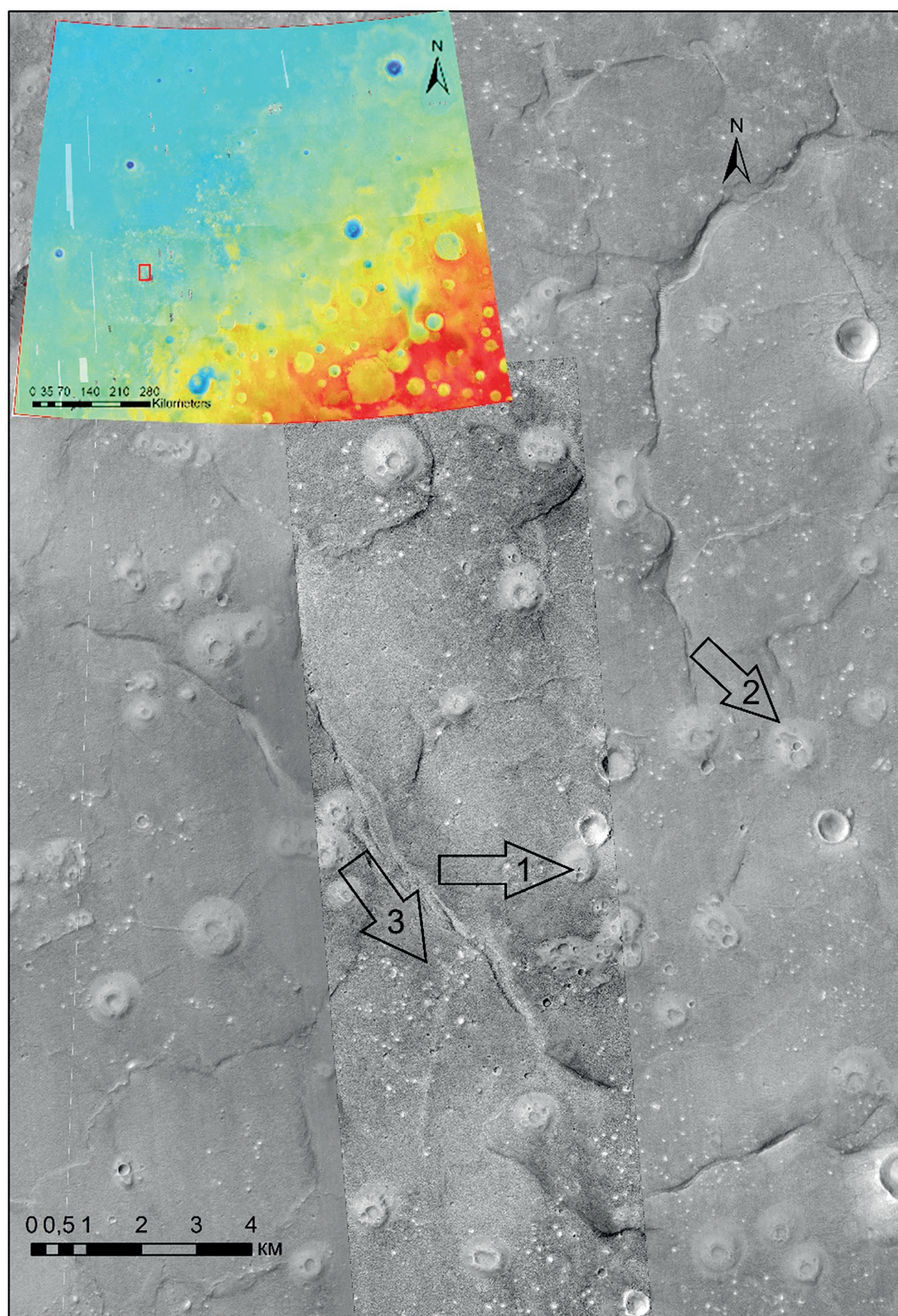


Рис. 4. Изображение холмов третьего типа. Стрелка 1 указывает на маленькие ямки вершине конуса. Стрелка 2 указывает на типичный конус с кальдерообразными депрессиями на вершине. Стрелка 3 указывает на бугры материала с высоким альбедо. Центр находится на $37,88^{\circ}$ с.ш. $13,86^{\circ}$ з.д. (Изображение камеры HiRISE ESP_042450_2180 наложено на изображение камеры CTX)

папиллярной местности, развитой на днище бассейна Isidis и вдоль южной окраины бассейна Утопия [Lockwood et al., 1992; Ivanov et al., 2014].

Обсуждение. Различная морфология холмов указывает, вероятно, на разные способы их формирования. В качестве механизмов формирования

холмов предлагались криогенные, например, пинго [de Pablo and Komatsu, 2009], магматические, обычные малые вулканы [Plescia, 1980; Frey and Jarosewich, 1982; Bridges et al., 2003; Heisinger et al., 2009]. Эти гипотезы, однако, имеют слабые стороны, плохо совместимые с морфологией, теплофизическими

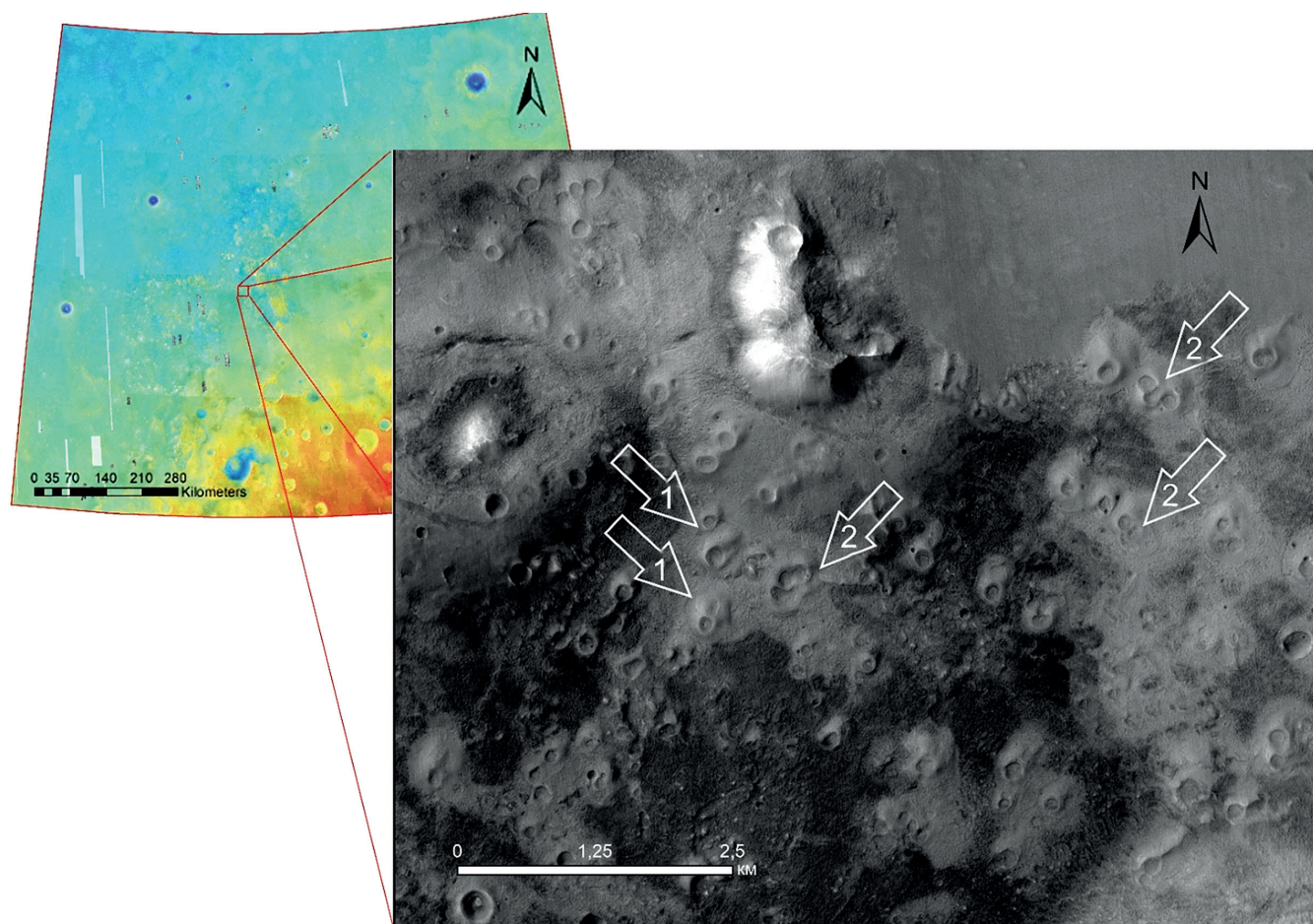


Рис. 5. Изображение холмов четвертого типа. Холмы сливаются в кластеры. Стрелка с номером 1 указывает на холмы с разными размерами в одном кластере. Стрелка с номером 2 указывает на холмы с деформированными кальдерами. Центр изображения находится на 39,37°с.ш. 10,98°з.д. (Изображения камеры СТХ)

характеристиками и пространственными ассоциациями холмов. Например, явное удаление скоплений холмов от известных или предполагаемых вулканических регионов делает маловероятной магматическую гипотезу формирования холмов.

В настоящее время общепринятой моделью формирования холмов является грязевой вулканизм [Farrand et al., 2005; Oehler et al., 2010; Ivanov et al., 2014, 2020; Di Pietro et al., 2021].

Тем не менее, разные морфологические характеристики холмов могут указывать на вариации общего механизма, зависящие от конкретных условий грязевулканической деятельности, характеристик источника материала и последующей модификации холмов.

1) Генетические типы холмов

1.1. Холмы первого типа наиболее распространены и интерпретируются большинством исследователей [Farrand et al., 2005; McGowan, 2009; Oehler and Allen, 2010; Salvatore and Christense 2014; Ivanov et al., 2020] как грязевые вулканы. Они развиты на полигональных равнинах, происхождение которых некоторые авторы [Pechmann, 1980; Hiesinger and Head, 2000] связывают с вздыманием местности после снятия ледовой нагрузки. Четкие простран-

ственные и временные соотношения между холмами и полигональными трогами отсутствуют, например, холмы могут находиться внутри полигонов или трогов, обрамляющих полигоны, и быть моложе и древнее трогов. Такие соотношения дают основания считать, что образование холмов не связано с образованием трогов или трещин.

Пространственное распределение холмов говорит о том, что источники их вещества были широко распространены под поверхностью равнин, где следовательно должен был находиться обширный резервуар тонкозернистого и, вероятно, водонасыщенного материала. Извержение этого материала на поверхность было связано с образованием локальных областей повышенного давления, которые могли возникать как за счет быстрого и неравномерного накопления материала формации *Vastitas Borealis* [Oehler et al., 2010], так и с неравномерным промерзанием водного резервуара после отложения материала формации *Vastitas Borealis* [Ivanov et al., 2014, 2017]. Относительно равномерное пространственное распределение холмов показывает, что их источники были изолированы друг от друга.

1.2. Холмы второго типа часто собраны в цепочки, образующие узор папиллярной местности.

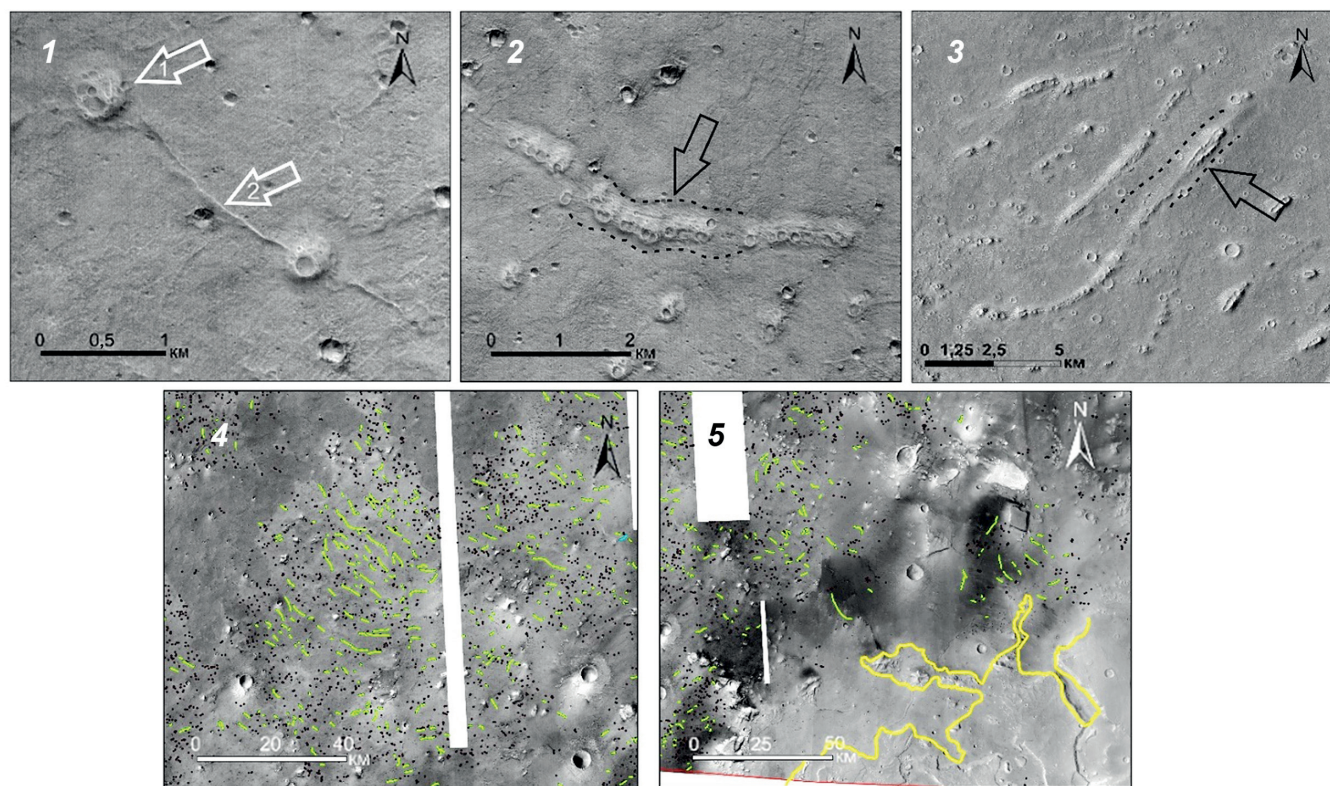


Рис. 6. Изображения холмов пятого типа. (1) одиночные холмы (стрелка 1), имеют кальдеровидные депрессии разного диаметра и неровную поверхность. Стрелка 2 указывает на гряды, соединяющую одиночные холмы. Центр изображения на $32,96^{\circ}$ с.ш. $18,57^{\circ}$ з.д. (2) холмы в цепочке. Стрелка показывает границу депрессии около цепочки, центр изображения на $33,02^{\circ}$ с.ш. $18,48^{\circ}$ з.д. (3) Папиллярная местность на днище бассейна Isidis, центр находится на $7,5^{\circ}$ с.ш., 88° в.д., стрелка показывает границу депрессии около цепочки. (4) Ориентация цепочек холмов (зеленые линии), центр изображения $33,21^{\circ}$ с.ш. $18,13^{\circ}$ з.д. (5) Граница формации Vastitas Borealis, показанная желтой линией. Центр изображения находится на $33,31^{\circ}$ с.ш. $15,33^{\circ}$ з.д. (Во всех случаях изображения камеры CTX)

Куполовидная разновидность холмов второго типа встречается локально в виде кластеров и имеет вершинную депрессию. Хотя часто эти холмы сливаются друг с другом, видно, что они представляют собой индивидуальные структуры, напоминающие холмы первого генетического типа. Вероятно, куполовидные холмы второго типа также представляют собой грязевые вулканы. Холмы блиновидной разновидности в основной своей массе образуют гряды папиллярной местности, расположенные на краевых лопастях формации Vastitas Borealis, которые интерпретируются как останцы донных отложений, выдавленные из-под ледникового покрова [Ivanov et al., 2017]. На ночных изображениях спектрометра THEMIS эти лопасти яркие, что свидетельствует о преобладании грубообломочной фракции в материале лопастей. Блиновидные холмы выглядят как темные пятна и их цепочки на ночных изображениях спектрометра THEMIS и, следовательно, их материал имеет тонкозернистый гранулометрический состав, отличный от материала лопастей. Однако, четкая приуроченность блиновидных холмов к краевой фации формации Vastitas Borealis, выстраивание их в дугообразные гряды папиллярной местности плохо согласуется с гипотезой их происхождения как грязевых вулканов.

Мы интерпретируем блиновидные холмы второго генетического типа как моренные отложения, образованные при перераспределении ледниками накопленного песчано-пылевого материала, который может частично представлять вещество грязевых вулканов первого типа и куполовидных холмов второго генетического типа.

1.3. Холмы третьего типа по сравнению с предыдущими двумя типами имеют более конусовидную форму, более высокое отношение диаметра вершинной депрессии к диаметру основания и дополнительные ямки в вершинной части [Farrand et al., 2005; McGowan, 2009]. Такие особенности холмов дают основание считать их проявлениями эксплозивного грязевого вулканизма [Ivanov et al., 2020], связанного с повышенным содержанием летучих компонентов (вероятно, CO_2) в источнике [McGowan, 2009] (рис. 7), что способствует диспергированию извергающегося материала и формированию более крутосклонных построек, форма которых переходит от куполовидных к конусовидным. Кроме того, для вулканических построек, сформированных за счет эксплозивных извержений, характерно более высокое отношение диаметра кальдеры к диаметру основания. Маленькие ямки в вершинной части холмов также могут

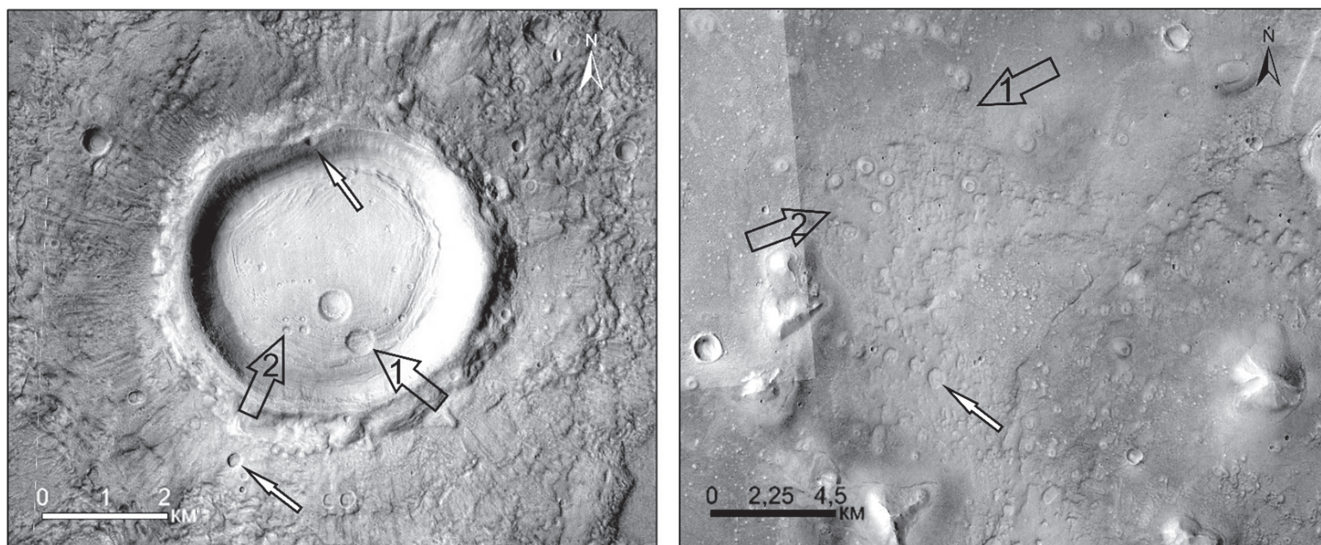


Рис. 7. Признаки высокого содержания летучих веществ в материале подразделения АНрсп. Левый рисунок: ударный кратер. На его ровном дне, стрелка 1 показывает концентрические слои светлого и темного материала, образованные при заполнении кратера материалом, стекающим по внутренним склонам. Стрелка 2 указывает на депрессии, образованные, возможно, при таянии или сублимации льдов. Белые стрелки указывают на такие же депрессии на валу и выбросах кратера. Центр изображения на 38,8° с.ш. 13,9° з.д. Правый рисунок: поток с изъеденной поверхностью (стрелки 1 и 2). Белая стрелка указывает на провалы, вероятно, связанные с таянием/сублимацией льдов. Центр изображения на 38,3° с.ш. 15,0° з.д. В обоих случаях изображения камеры СТХ

быть связаны с вентиляцией летучих компонентов из источника.

1.4. Холмы четвертого типа тоже имеют конусообразную форму и крупную вершинную депрессию, но, в отличие от холмов третьего типа, сливаются друг с другом и образуют кластер, что свидетельствует о формировании холмов этого типа из единого источника.

1.5. Холмы пятого типа образуют гряды, представляют собой морфологические аналоги папиллярной местности в бассейнах Isidis и Utopia (рис. 6). Особенностью этих холмов, однако, является наличие вершинной депрессии у многих холмов. Дугообразные гряды, в которые собраны холмы, и их приуроченность к краевой фации формации Vastitas Borealis свидетельствуют против их формирования за счет грязевого вулканизма и в большей степени указывают на моренное формирование холмов и их гряд. Если такая интерпретация верна, то вершинная депрессия может представлять собой провал, образованный из-за таяния (сублимации) ледяного ядра холма. Следовательно, в этом случае ледник перемещал значительное количество силикатного материала, служившего как тепловая защита ледяной компоненты.

Выводы. В результате изучения малых холмов в районе Acidalia и Cydonia на Марсе нами было выделено пять морфологических групп холмов. Эти холмы имеют разное происхождение и связаны с грязевым вулканизмом (холмы типов 1, 2а, 3 и 4) и с ледниковыми явлениями (холмы типов 2б и 5). Холмы типов 1 и 2а, вероятно, образуются при спокойных (эффузивных) грязевых извержениях, а форма холмов типов 3 и 4 свидетельствует об извержениях эксплозивного характера, обусловленного более высоким содержанием газообразных летучих (CO_2) в источнике.

Холмы типов 2б и 5, вероятнее всего, представляют собой моренные комплексы, образованные при росте и отступлении ледников. Различие между этими типами холмов связано с количеством и размерной фракцией силикатного материала, переносимого ледниками. В первом случае (тип 2б) количество такого материала было небольшим и он в подавляющем большинстве был представлен тонкозернистым материалом песчано-пылевой фракции. Во втором случае (тип 5) количество силикатной компоненты было более существенным, что позволяло на какое-то время сохранить ледяное ядро моренных холмов.

Финансирование. Исследование выполнено при поддержке China Scholarship Council.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Allen C.C., Oehler D.Z., Baker D.M., Mud volcanoes — A new class of sites for geological and astrobiological exploration of Mars // *Lunar Planet. Sci.* XXXX. 2009. Abstract 1749.
- Barlow N.G., Boyce J.M., Costard F.M. et al. Standardizing the nomenclature of martian impact crater ejecta morphologies // *J. Geophys. Res.* 2000. Vol. 105. P. 26733–26738.

- Bridges J.C., Seabrook A.M., Rothery D.A. et al. Selection of the landing site in Isidis Planitia of Mars probe Beagle 2 // *J. Geophys. Res.* 2003. Vol. 108, 5001. doi: 10.1029/2001JE001820
- Carr M.H., Head J.W. Oceans on Mars: an assessment of the observational evidence and possible fate // *J. Geophys. Res. Planets.* 2003. Vol. 108.

- Citron R., Manga M., Hemingway D. Timing of oceans on Mars from shoreline deformation // *Nature*. 2018. Vol. 555. P. 643–646. URL: <https://doi.org/10.1038/nature26144>.
- Clifford S.M., Parker T.J. The evolution of the martian hydrosphere: Implications for the fate of a primordial ocean and the current state of the northern plains // *Icarus*. 2001. Vol. 154. P. 40–79.
- Davis P.A., Tanaka K.L. Curvilinear ridges in Isidis Planitia, Mars — The result of mud volcanism? // *Lunar Planet. Sci.* 1995. Vol. XXIV. P. 321–322.
- de Pablo M., Komatsu G. Possible pingo fields in the Utopia basin, Mars: Geological and climatic implication // *Icarus*. 2009. Vol. 199. P. 49–74. doi: 10.1016/j.icarus.2008.09.007.
- Di Pietro I. et al. Evidence of mud volcanism due to the rapid compaction of Martian tsunami deposits in southeastern Acidalia Planitia, Mars // *Icarus*. 2021. Vol. 354. URL: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2020.114096>
- Farrand, W.H., Gaddis, L.R., Keszthlyi, L., Pitted cones and domes on Mars: Observations in Acidalia Planitia and Cydonia Mensae using MOC, THEMIS, and TES data // *J. Geophys. Res.* 2005. Vol. 110. doi:10.1029/2004JE002297
- Frey H.M., Lowry B.L., Chase S.A. Pseudocraters on Mars // *J. Geophys. Res.* 1979. Vol. 84. P. 8075–8086.
- Frey H.M., Jarosewich M. Subkilometer Martian volcanoes: Properties and possible terrestrial analogs // *J. Geophys. Res.* 1982. Vol. 87. P. 9867–9879.
- Head III J.W., Kreslavsky M., Hiesinger H. et al. Oceans in the past history of Mars: Tests for their presence using Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA) data // *Geophys. Res. Lett.* 1998. Vol. 25. P. 4401–4404.
- Head J.W., Hiesinger H., Ivanov M.A. et al. Possible ancient oceans on Mars: Evidence from Mars orbiter laser altimeter data // *Science*. 1999. Vol. 286. P. 2134–2137.
- Hiesinger H., Head III J.W. Characteristics and origin of polygonal terrain in southern Utopia Planitia, Mars: Results from Mars Orbiter Laser Altimeter and Mars Orbiter Camera data // *J. Geophys. Res.* 2000. Vol. 105. P. 11999–12022.
- Hiesinger H., Rohkamp D., Sturm S. et al. Geology, ages, morphology, and morphometry of thumbprint terrain in Isidis Planitia, Mars // *Lunar and Planetary Science Conference*. 2009. Vol. 40. P. 1953.
- Kreslavsky M.A., Head J.W. Fate of outflow channel effluents in the northern lowlands of Mars: The Vastitas Borealis Formation as a sublimation residue from frozen ponded bodies of water // *J. Geophys. Res. Planets*. 2002. Vol. 107.
- Ivanov M.A., Hiesinger H., Erkeling G. et al. Mud volcanism and morphology of impact craters in Utopia Planitia on Mars: Evidence for the ancient ocean // *Icarus*. 2014. Vol. 228. P. 121–140.
- Ivanov M.A., Erkeling G., Hiesinger H. et al. Topography of the Deuteronilus contact on Mars: Evidence for an ancient water/mud ocean and long-wavelength topographic readjustments // *Planetary and Space Science*. 2017. P. 1–22.
- Ivanov M.A., Hiesinger H. The Acidalia Mensa region on Mars: A key element to test the Mars ocean hypothesis // *Icarus*. 2020. Vol. 349.
- Kite E.S., Hovius N., Hillier J.K., Besserer J. Candidate mud volcanoes in the Northern Plains of Mars // *American Geophysical Union. Fall Meeting*. 2007 (abstract #V13B-1346).
- Lockwood J.F., Kargel J.S., Strom R.B. Thumbprint terrain on the Northern Plains: a glacial hypothesis // *Abstracts of the Lunar and Planetary Science Conference*. 1992. Vol. 23. P. 795.
- Lucchitta B.K. Mars and Earth: comparison of cold-climate features // *Icarus* 1981. Vol. 45. P. 264–303.
- McGill G.E. Buried topography of Utopia, Mars: Persistence of a giant impact depression // *J. Geophys. Res.* 1989. Vol. 94, N B3, P. 2753–2759.
- McGill G.E., Hills L.S. Origin of Giant Martian polygons // *J. Geophys. Res. Planets*. 1992. Vol. 97. P. 2633–2647.
- McGill G.E. Geologic Map of Cydonia Mensae-Southern Acidalia Planitia, Mars: Quadrangles MTM 40007, 40012, 40017, 45007, 45012, and 45017. 2005. USGS
- McGowan E. Spatial distribution of putative water related features in southern Acidalia/Cydonia Mensae, Mars // *Icarus*. 2009. Vol. 202. P. 78–89.
- McGowan E.M., McGill G.E. The Utopia/Isidis overlap; Possible conduit for mud volcanism // *Lunar Planet. Sci.* 2010. Vol. 41. Abstract 1070.
- Oehler D.Z., Allen C.C. Mud volcanoes in the martian lowlands: Potential windows to fluid-rich samples from depth // *Lunar Planet. Sci.* Vol. XXXX. 2009. Abstract 1034.
- Oehler D.Z., Allen C.C. Evidence for pervasive mud volcanism in Acidalia Planitia, Mars // *Icarus*. 2010. Vol. 208. P. 636–657.
- Okubo C.H. Morphologic evidence of subsurface sediment mobilization and mud volcanism in Candor and Coprates Chasmata, Valles Marineris, Mars // *Icarus*. 2016. Vol. 269. P. 23–37.
- Parker T.J., Saunders R.S., Schneeberger D.M. Transitional morphology in West Deuteronilus Mensae, Mars: Implications for modification of the lowland upland boundary // *Icarus*. 1989. Vol. 82. P. 111–145.
- Parker T.J., Gorsline D.S., Saunders R.S. et al. Coastal geomorphology of the martian northern plains // *J. Geophys. Res.* 1993. Vol. 98. P. 11061–11078.
- Perron J.T., Mitrovica J.X., Manga M. et al. Evidence for an ancient martian ocean in the topography of deformed shorelines // *Nature*. 2007. Vol. 447. P. 840–843.
- Pechmann J.C. The origin of polygonal troughs on the northern plains of Mars // *Icarus*. 1980. Vol. 42. P. 185–210.
- Plescia J.B. Cinder cones of Isidis and Elysium. Rep. // *Planet. Geol. Geophys.* 1980. Program 1, 263–265.
- Rodríguez J.A.P., Tanaka K.L., Kargel J.S. et al. Formation and disruption of aquifers in southwestern Chryse Planitia, Mars // *Icarus*. 2007. Vol. 191 (2). P. 545–567.
- Salvatore M.R., Christense P.R. On the origin of the Vastitas Borealis Formation in Chryse and Acidalia Planitiae, Mars // *J. Geophys. Res.: Planets*. 2014. P. 2437–2456.
- Scott D.H., Tanaka K.L. Geologic map of the western equatorial region of Mars // *U.S. Geol. Surv. Geol. Invest. Ser., Map I-1802A*. 1986.
- Skinner Jr.J.A., Mazzini A. Martian mud volcanism: Terrestrial analogs and implications for formational scenarios // *Marine Petrol.* 2009. Geol. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2009.02.006.
- Skinner Jr.J.A., Tanaka K.L. Evidence for and implications of sedimentary diapirism and mud volcanism in the southern Utopia highland–lowland boundary plain, Mars // *Icarus*. 2007. Vol. 186 (1). P. 41–59.
- Tanaka K.L., Banerdt W.B. The interior lowland plains unit of Mars: Evidence for a possible mud ocean and induced tectonic deformation // *Lunar Planet. Sci.* 2000. Vol. XXXI. Abstract 2041.
- Tanaka K.L., Joyal T., Wenker A. The Isidis Plains Unit, Mars: Possible catastrophic origin, tectonic tilting, and sediment loading // *Lunar Planet. Sci.* 2000. Vol. XXXI. Abstract 2023.

Tanaka K.L. Sedimentary history and mass flow structures of Chryse and Acidalia Planitiae, Mars // *J. Geophys. Res.* 1997. Vol. 102. P. 4131–4150.

Tanaka K.L., Skinner Jr.J.A., Hare T.M. et al. Resurfacing history of the Northern Plains of Mars based on geologic mapping of Mars Global Surveyor data // *J. Geophys. Res.* 2003. Vol. 108 (E4). GDS 24-1-GDS 24-32. doi: 10.1029/2002JE001908.

Tanaka K.L. Geology and insolation-driven climatic history of Amazonian north polar materials on Mars // *Nature*. 2005. Vol. 437. P. 991–994.

Tanaka K.L., Skinner J.A., Hare T.M. Geologic map of the Northern Plains of Mars // *US Geological Survey Sci. Inv. Map*. 2005. P. 2888.

Tanaka K.L., Rodríguez J.A.P., Skinner Jr.J.A et al. North polar region of Mars: Advances in stratigraphy, structure, and erosional modification // *Icarus*. 2008. Vol. 196 (2). P. 318–358.

Witbeck N.E., Underwood J.R.Jr. Geologic map of the Mare Acidaliu quadrangle, Mars (revised): U.S. Geological Survey Miscellaneous Investigations Series I-1614, scale 1:5,000,000. 1984.

Статья поступила в редакцию 16.02.2023,
одобрена после рецензирования 22.03.2023,
принята к публикации 22.05.2023