

УДК 551.439/551.432.7→551.435.4

ГИГАНТСКАЯ ВУЛКАНО-ГЛЯЦИАЛЬНАЯ ПОСТРОЙКА (ТЮЙЯ) ГОРА ОЛИМП КАК ИНДИКАТОР ДРЕВНЕГО КРУПНОГО ОЛЕДЕНЕНИЯ МАРСА

© 2021 г. И. В. Мелекесцев^{1,*}¹ Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия

*E-mail: dirksen@kscnet.ru

Поступила в редакцию 08.11.2019 г.

После доработки 16.07.2020 г.

Принята к публикации 22.12.2020 г.

Гора Олимп (размер основания морфологически выраженной части 550×600 км, абсолютная высота вершины — 21.1 км, максимальная относительная высота — 21.9 км, объем — 2.4×10^6 млн км³) — крупнейшее вулканическое сооружение не только на Марсе, но и на Земле. Дешифрирование закономерных сочетаний особенностей вулканических и ледниковых форм на Горе Олимп показало их кардинальное внешнее сходство с комплексом аналогичных форм на крупных туюя молодых вулканических областей Земли. Это может свидетельствовать и об их одинаковом генезисе. Высота Олимпийского уступа (3–6 км), ограничивающего туюя Гора Олимп, расположенную в низких широтах (центр 18°N, 113°W), позволяет предполагать, что во время ее формирования мощные ледниковые покровы располагались не только в околополярных областях Марса, но и за их пределами. Судя по распространению аккумулятивных образований, оледенение Горы Олимп было обширным (порядка 1.5–2 млн км²), а мощность ледяной толщи (до 3–6 км) в центральной части ледника соответствовала высоте Олимпийского уступа. Хорошо дешифрирующиеся фрагменты ледникового рельефа указывают на многофазность оледенения, а их конфигурация — на четко выраженную асимметрию. В ЮЗ, З, СЗ, С и СВ секторах подножия вулкана Гора Олимп край ледника находился в 700–750 км от кратера вулкана, на других участках — в 500–600 км. На максимальное (1100 км, борозды Ахерон) расстояние от центра вулкана удалены колоссальными грязекаменными потоками типа лахаров ледниковые и водно-ледниковые образования, обогащенные вулканическими обломками. Эти потоки формировались в результате катастрофических разрушений стенок ледниковой котловины, в которой рос вулкан-туюя Гора Олимп. Земной аналог подобного процесса — катастрофические исландские йокульхлаупы, приуроченные к заполненным льдом кальдерам с растущими внутри них вулканами.

Ключевые слова: Марс, вулкан Гора Олимп, древний ледниковый покров, грязекаменные потоки, кальдера

DOI: 10.31857/S0435428121020073

ВВЕДЕНИЕ И ПРЕДЫСТОРИЯ ПРОБЛЕМЫ

Одна из характерных особенностей геоморфологии поверхности удаленных от Солнца планет земного типа (Земля — в 149.6 млн км, Марс — в 227.9 млн км) — наличие там современных обширных ледниковых покровов, расположенных в их околополярных областях: на Земле — в Антарктиде и Гренландии, на Марсе — полярные шапки на Северном и Южном полюсах (рис. 1). Прекрасно выраженная спиралевидная структура поверхности Северной и Южной шапок последнего обусловлена ротационным эффектом (один оборот вокруг своей оси с запада на восток, как и Земля, Марс совершает за 24.63 ч, один оборот вокруг Солнца (марсианский год) — за 669 сут) и общей пластичностью ледниковых масс. На обеих пла-

нетах мощность ледниковых щитов измеряется, как минимум, многими сотнями метров, однако их строение существенно различается. На Земле они полностью образованы льдом из замерзшей воды, а на Марсе — комбинацией инея углекислого газа и водяного льда. Толщина слоя инея в верхней части более крупной Северной полярной шапки Марса — несколько десятков сантиметров, а видимая вскрытая мощность пачки льда внизу — сотни метров. Предполагалось [2], что полная его мощность может достигать 2–4 км, как в Антарктиде. Однако после проведения в последнее десятилетие американскими исследователями радарной съемки [3, 4] выяснилось, что относительно чистый лед имеется только в верхней части разреза Северной полярной шапки, а ниже он сильно

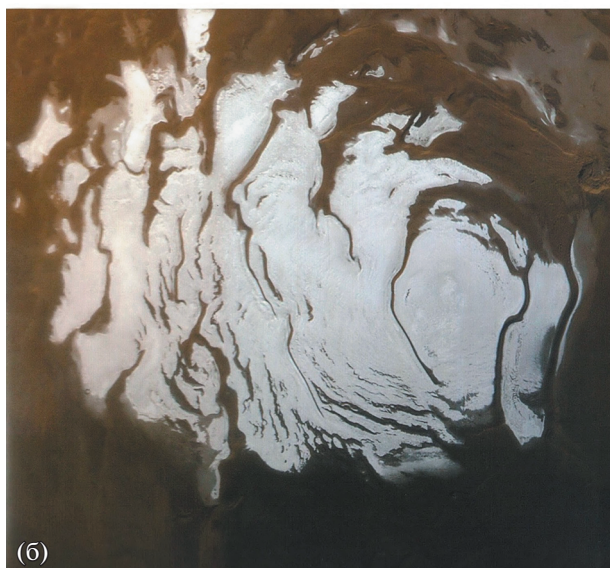
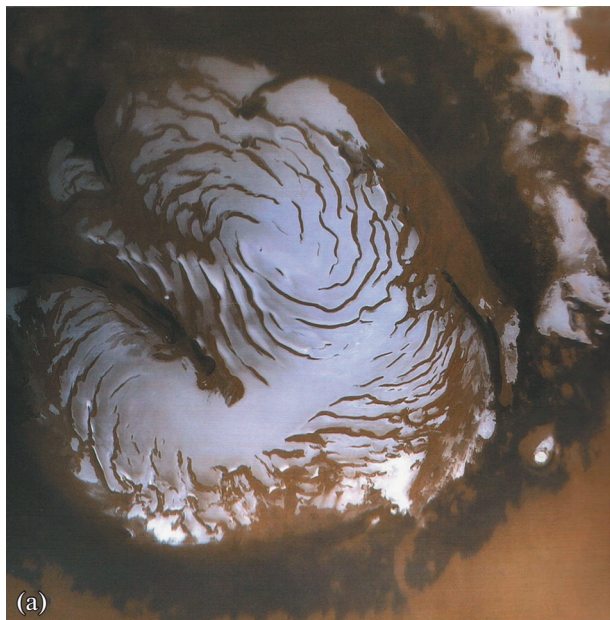


Рис. 1. Полярные шапки Марса: (а) — Северная и (б) — Южная [1].

обогащен многочисленными слоями, линзами и пачками песка и представлен в виде сложно построенной толщи — North Polar Layered Deposits (NPLD) — максимальной мощностью не менее 1.5–2 км. Сходное строение оказалось и у Южной полярной шапки. Там тоже доминирует аналогичная толща — Southern Polar Layered Deposits (SPLD), подошва которой находится на глубине около 1.5 км ниже ее кровли [5]; есть и “сухой лед” из твердой углекислоты. Обе полярные шапки Марса — современные, “живые”, постоянно трансформирующиеся ледниковые образования, хотя и неизвестно, когда возникшие. Они пре-

красно выражены в рельефе планеты, а их сезонная динамика четко прослеживается. Что касается однозначно достоверных следов более древних марсианских оледенений — аналогов пермского, карбонового, докембрийского оледенений Земли [6–8], морены которых в земных условиях погребены или уничтожены, то они, по данным автора настоящей статьи, пока не обнаружены, хотя рассуждений на эту тему и даже гипотез имеется много [2, 6–9]. Причем главной причиной служит не отсутствие на Марсе следов и форм самих древних оледенений, а только недостаточное развитие, во-первых, соответствующих целенаправленных исследований, обеспеченных необходимым объемом доступных крупномасштабных космических снимков поверхности Марса с высоким разрешением. Во-вторых, еще слабо разработана методика выявления и диагностирования на космических изображениях древних ледниковых образований, аналогичных по генезису такому его современных полярных шапок.

Серьезным препятствием, по сравнению с Землей, служит и неполнота комплекса выраженных в рельефе марсианских ледниковых форм. Так, на Марсе вообще нет (и, вероятно, не было) характерных для альпийского рельефа настоящих скульптурных форм типа земных трогов и каров, несмотря на то, что крупные горные массивы с относительной высотой от 2 до 21.9 км и размером оснований 60–600 км распространены достаточно широко (см. табл. 1 в [10]). “Виноваты” в этом сухость и разреженность атмосферы Марса, которые имели место на большей части истории геологического развития планеты, бывшей раньше, как и сейчас, чаще всего, холодной безводной пустыней, несмотря на то, что похожих на кары обвальных и обвально-осыпных цирков на крутых склонах молодых ударных кратеров там имеется много. Хотя следы “влажного периода” [12] тоже, вроде бы, удалось установить при облете Марса “Маринером-9”. Однако даже на самых высоких и крупных горных массивах, перечисленных в работах [2, 10, 12 и др.], таких скульптурных ледниковых форм по-прежнему не обнаружено. Дело в том, что абразивная деятельность марсианской пыли при любых скоростях марсианских ветров, включая максимальные (до 100 м/с и более [9]), не способна, в принципе, привести к возникновению каров и трогов. Правда, в какой-то степени роль каров могут выполнять достаточно крутые (20–25° по [2]) стенки верхних частей внутренних обрывов метеоритных кратеров с приуроченными к ним еще более крутосклонными вторичными обвальными цирками. Но появившиеся таким способом древние ледники остаются на дне кратеров, быстро погребаяются ветровой пылью и, если и существуют, то дешифрированию по космическим изображениям не поддаются.

Что касается древних аккумулятивных образований ледникового генезиса, то при современном уровне исследований (преимущественно из космоса) выявить и диагностировать их чаще всего достаточно сложно. Во-первых, они, как и на Земле, должны быть очень похожи по геоморфологии и относительным высотам поверхности на намного большие по площади и распространенные на Марсе лавовые равнины. Это хорошо, в частности, отображено на геологической карте, опубликованной в работе А. Олби [13], где, предположительно, показано только распространение базальтов и андезитов. Во-вторых, мешает постоянно находящийся в состоянии динамики мощный покров ветровой пыли, который погребает подстилающий рельеф, включая и аккумулятивные образования древних ледников. Наконец, типичный аккумулятивный ледниковый рельеф, даже на Земле, характеризуется небольшими относительными высотами (порядка десятков метров, редко до 100–200 м) вершин положительных форм (холмов, гряд) над отрицательными (днищами котловин, рвов и др.). Не исключено и то, что на Марсе из-за недостатка грубообломочного материала поля развития древнего аккумулятивного ледникового рельефа могли иметь и намного меньшие относительные высоты, чем на Земле. Вполне возможно также допустить, что в современных марсианских условиях часть древней пылево-ледовой толщи вообще не оттаяла.

С учетом приведенных рассуждений и опыта собственных исследований вулканических областей (Камчатка, Курильские и Командорские острова, Исландия, Аляска), подвергавшихся оледенениям, к надежным и относительно легко дешифрируемым маркерам наличия древних ледниковых форм на Марсе следует относить лишь вулcano-гляциальные постройки (glaciovolcanic edifices) типа туюя (tua). Это обусловлено тем, что независимо от размера, типа вулканов (одноактные, многоактные, стратовулканы, щитовые вулканы и т.д.), все они обладают очень сходной морфологией, так как формировались в одинаковых условиях в проплавленной толще льда, в полостях с крутыми (до вертикальных) ледяными стенками. Причем размеры полостей определялись объемом выполнявших их изверженных магматических продуктов, которые слагают возникшие внутриледниковые постройки, а высота склонов последних — мощностью толщи проплавленных ледников. Физический облик (лавы, пирокластика) и химический состав (базальты, андезиты, дациты) извергаемых вулканических продуктов имеют второстепенное значение. Главное, чтобы они были сильно нагреты. Одной из характерных особенностей крупных земных туюя, формировавшихся в ледниковые эпохи, являются большие относительные высоты мореного рельефа, оставленного их ледниками подно-

жий. То же наблюдается и на подобных по размеру марсианских туюя. Главная причина этого — повышенная обогащенность ледяной толщи извергнутым обломочным вулканическим материалом.

На Земле разные по морфологии и строению вулcano-гляциальные постройки типа туюя присутствуют везде, где вулканизм и оледенения происходили одновременно: от Антарктиды до Исландии и Британской Колумбии Канады [15, 16 и др.]. Сходная ситуация была, вероятно, типична и для Марса в эпохи, когда вулканическая активность и масштабные оледенения сочетались там во времени [17]. По данным исследований автора статьи, наиболее яркий пример туюя на Марсе — знаменитая Гора Олимп (вершина 18° ю.ш., 133° з.д. [1, 18]). На Земле выявлено и закартировано уже несколько сотен туюя [19]. Наиболее “свежая” работа по классификации туюя [20] опубликована в 2014 г. Земным минианалогом туюя Гора Олимп с Олимпийским уступом, по нашим данным, является (см. ниже) самый высокий (5643 м) действующий вулкан Евразии — Эльбрус — с почти вертикальным 1000-метровым уступом — знаменитой “стеной Кюкюртлю”.

ГИГАНТСКАЯ ВУЛКАНО-ГЛЯЦИАЛЬНАЯ ПОСТРОЙКА — ТЮЙЯ ГОРА ОЛИМП НА МАРСЕ — И ЕЕ ЗЕМНЫЕ ГЕНЕТИЧЕСКИЕ АНАЛОГИ: ГЕОМОРФОЛОГИЯ И УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ

До начала 70-х годов XX века проблема взаимодействия вулканических и ледниковых процессов применительно к Марсу практически не рассматривалась. Это было связано с тем, что на Марсе давно были известны только Северная и Южная полярные шапки, наблюдавшиеся в телескоп, а вулканы еще не были открыты. На месте Горы Олимп астрономы видели только белое пятно, хотя и предполагали там возвышенность, покрытую снегом — Никс Олимпа (Снега Олимпа). Не обнаружены вулканы и на космических снимках отдельных участков сильно кратерированной поверхности Южного полушария Марса, сделанных с пролетных аппаратов “Маринер-4, 6, 7” [2]. Поскольку кратеры имели вид сильно разрушенных, то был сделан вывод, что Марс, с позиции динамической геологии и вулканологии, — “мертвая” планета.

Однако вскоре ситуация кардинально изменилась, когда с марсианских спутников “Маринер-9” в 1972 г. после окончания глобальной пылевой бури и “Марс-4 и 5” в 1976 г. была заснята почти вся поверхность планеты, причем многие участки с очень высоким разрешением. По этим и полученным позднее данным были составлены карты поверхности Марса: американская с масштабом

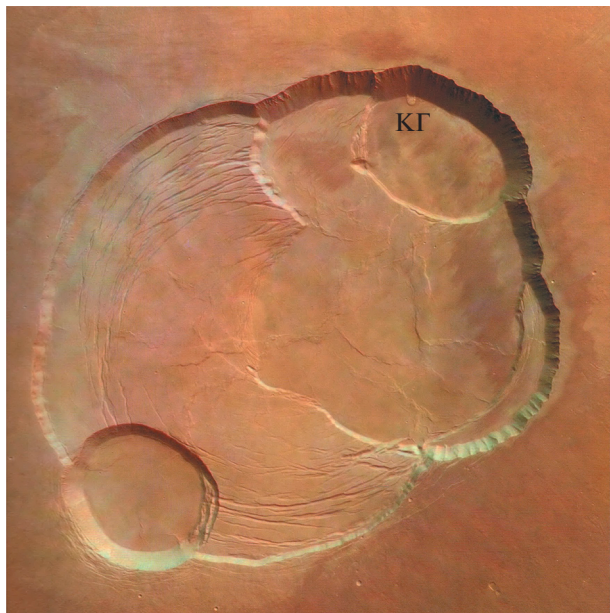


Рис. 2. Кальдерный 70-километровый комплекс на вершине вулкана Гора Олимп.

КГ — предполагаемый каменный глетчер (из [1], с дополнением автора).

по экватору 1:25000000 и российская — масштаб 1:26000000 [22]; обе с сечением горизонталей 1 км. Именно на них была показана и вулканическая возвышенность Фарсида с крупнейшими вулканами Арсия, Аскрийский, Павонис, Олимп. Размеры оснований перечисленных вулканов достигают 500–600 км, а площади — 200–300 тыс. км². Эти вулканы поднимаются над уровнем ареоида на 14–21 км. Максимальная же относительная высота постройки Гора Олимп над полукольцевой равниной у ее подножия в СЗ и С секторах — около 21.9 км. Намного большие абсолютные и относительные высоты марсианских вулканических построек, по сравнению с земными, объясняются меньшей (0.308 земной) там силой тяжести. Белое же пятно над предполагавшейся возвышенностью Никс Олимпики оказалось 1000-километровым в диаметре кольцевым облаком-вихрем, часто возникающим вокруг вершинной части вулкана Гора Олимп, как во время сильных ветров и над земными вулканами, выделяющими много газов — извергающимися или с активной фумарольной деятельностью.

Факт, что на Земле выделяющиеся над активными вулканами газы (преимущественно водяной пар и CO₂) служат причиной повышенной облачности и большего количества осадков по сравнению с прилежащими территориями [23], позволяет предполагать, что на гигантском (объем морфологически выраженной части постройки 2.4×10^6 км³) вулкане Гора Олимп еще продолжа-

ется дегазация. В пользу гипотетически продолжающейся газовой активности вулканического аппарата Гора Олимп свидетельствует и его прекрасная сохранность, особенно вершинного кальдерного комплекса размером 72 × 81 км. Последний образован четырьмя (или пятью?) разноразмерными кальдерами гавайского типа (рис. 2). Диаметр самой старой, практически круглой, — около 70 км, а размер самой молодой, овальной — 30 × 19 км; на северном внутреннем уступе последней очень хорошо видна каплевидная форма типа земного каменного глетчера длиной ~4 км. Но это может быть и быстро замерзший оползень с концевой частью шириной ~1.5 км. Находящаяся в противоположном секторе почти круглая (19 × 18 км) впадина может быть и кальдерой (с большей вероятностью), и ударным кратером. Из-за своей великолепной сохранности вулканическая постройка Гора Олимп, по земным меркам, должна была бы завершить активный рост всего 10–20 тыс. л. н., а длительность ее формирования составила бы максимум 2–3 млн лет [21–23 и др.]. Марсианский же ее возраст точно не определен. Судя по очень небольшому количеству метеоритных кратеров на его склонах, можно утверждать только, что вулкан Гора Олимп — один из самых молодых на этой планете. Предполагается [1] даже, что он возник всего около 30 млн л. н.

Приблизительный объем морфологически выраженных частей перечисленных вулканов [10] равен 0.5–2.4 млн км³. Это в 5–25 раз больше, чем у самого крупного на Земле острова-вулкана Гавайи [24]. Не случайна, вероятно, и приуроченность вулканов Арсия, Аскрийский и Павонис к сводообразному поднятию Фарсида, которое можно рассматривать в качестве гигантского магматического “пузыря” с замерзшей коркой, прорванного под этими вулканами на заключительном этапе его формирования. По разработанной для земных вулканов классификации, названные вулканы должны быть отнесены к щитовым и щитообразным, увенчанным огромными (размером до 120 × 100 км) кальдерами и кальдерными комплексами гавайского типа. На Земле их аналоги — вулканы Мауна-Лоа (о-в Гавайи), Плоские сопки (Камчатка) и многие другие. Но их объем не превышает обычно 1000 км³, а размер кальдер — 10–15 км. Многочисленные вулканические проявления были обнаружены на Марсе и в других местах, преимущественно, в Северном полушарии и в приэкваториальной зоне (знаменитая долина Маринер протяженностью более 4000 км). Их список и некоторые параметры приведены в табл. 1 в [11]. Диагностированы только крупнейшие положительные вулканические формы и кальдеры гавайского типа на вершинах вулканов. Вулканические кальдеры других типов, провальные кратеры над лавоводами и магмоводами, как правило, от ударных метеоритных

кратеров исследователями не отделялись. Действующие вулканы не обнаружены.

Относительно “повезло” современным ледниковым образованиям — Северной и Южной полярным шапкам, описанным, по сути дела, заново. На прекрасно выполненных космических изображениях (см. рис. 1) видна четкая спиралевидная структура их поверхности. Исследовано строение вещества самих покровов, а также динамика их изменения в летний и зимний марсианские периоды. Европейским спутником “Марс-экспресс” был даже обнаружен в 2005 г. [1] заполненный льдом кратер, расположенный за пределами ледяных шапок. Лед сохранился там, поскольку был укрыт от воздействия прямых солнечных лучей тенью, отбрасываемой крутыми склонами кратера. Предполагается, что подобные современные небольшие ледники, изолированные от полярных шапок Марса, существуют и в других местах. Но аккумулятивные и скульптурные формы, оставленные ледниками Северной и Южной полярных шапок, описаны не были; то же относится и к следам обработки современными ледниками подстилающих их пород.

Ситуация с объективно достоверной идентификацией реальных следов древних марсианских оледенений обстоит еще хуже: она пока не увенчалась успехом. Выдаваемые за следы якобы древних ледников формы рельефа и отложения могут иметь и другое происхождение, так как убедительных доказательств в работах астрономов, астрофизиков, физиков [2, 12, 26 и др.] не приводится. А полученные однозначные результаты изучения подобных образований на Марсе, в том числе и на вулканах, на современном этапе вообще единичны [17].

Поэтому, основываясь на изложенных выше соображениях, пришлось целенаправленно искать на Марсе именно гляциально-вулканические формы, которые обладали бы одинаковыми (или близкими) геоморфологическими диагностическими признаками и соответствующими изображениями на аэро- и космических снимках обеих планет. Что и удалось, в первом приближении, выполнить. Установлено, что на Земле одно из самых первых детальных описаний субгляциальных исторических и голоценовых вулканических извержений было в работе А. Nøe-Nygaard [27], опубликованной в 1940 г. А термин “тюйя” появился и стал использоваться в 40-х годах XX века [17] при описании таких форм в Британской Колумбии Канады. В СССР этот термин был “узаконен” в 1984 г. в работе В.И. Влодавца “Справочник по вулканологии” [28], где было дано его определение со ссылкой на W.H. Mathews. Это плосковершинное, относительно изолированное вулканическое сооружение, генезис которого связывается с вулканической деятельностью



Рис. 3. Камчатские одноактные тюйя на северном подножии вулкана Авачинский: со слабовыпуклой (а) и с плоской (б) вершинной поверхностью. Фото Л.И. Базановой.

в пределах мощных ледников. Относительная высота тюйя — от 100–200 до 450 м, размер основания — 800–3200 м. По результатам проведенных автором настоящей статьи дешифрования аэрофотоснимков и полевых исследований, подвергшихся оледенению молодых вулканических районов Камчатки [23, 29], к главным диагностическим геоморфологическим признакам вытягивающих тюйя необходимо отнести еще и ограничивающие их крутосклонные ($30\text{--}60^\circ$) внешние уступы (рис. 3, 4).

На рис. 3 показаны бронированные лавой плосковершинные столовые горы типа тюйя (вверху — с слабовыпуклой вершиной, внизу — с плоской) на северном склоне вулкана Авачинский (Камчатка). Они были связаны с активностью одноактных вулканических центров под полупокровным ледником и возникли в конце позднего плейстоцена, проплавив в разных местах этот ледниковый покров общей площадью около



Рис. 4. Многоактный вулкан-тюдя Вилучинский (Камчатка). Черной линией показана бровка уступа тудя. Фото В. Лазарева.

1500 км², который образовался в результате слияния ледников, начинавшихся на пяти вулканах Авачинской группы [30]. Толщина льда в местах появления проплавленных полостей была около 300–400 м, что близко высоте уступов тудя. В настоящее время крутизна верхних частей этих уступов составляет 40–45°, а размеры оснований возникших тудя примерно 1 × 2 км. Аналогичная картина была на вулкане Бакенинг [29].

На рис. 4 — вулcano-гляциальная постройка длительно (30–40 тыс. лет) формировавшегося многоактного вулкана Вилучинский (2731 м) в 45 км к ЮЗ от г. Петропавловск-Камчатский. Распространение его изверженных пород было ограничено почти со всех сторон мощными долинными ледниками. На представленной фотографии высота бровки 450–500-метрового уступа тудя соответствует высоте вершинной поверхности (кровле) бывшего плейстоценового транзитного ледника, проходившего по троговой долине р. Паратунка. Деятельность вулкана Вилучинский прекратилась в первой половине голоцена, и он относится к потухшим [22]. Размер основания этой вулcano-гляциальной постройки — 7 × 8 км.

На Кавказе активным современным минианалогом тудя Гора Олимп с субкруговым Олимпийским уступом высотой 3–6 км является Эльбрус. В настоящее время на Земле в молодых вулканических областях, подвергшихся плейстоценовому и голоценовому оледенениям (Исландия, Камчатка, Алеутские острова, Аляска, Британская Колумбия Канады, юг Чили, Антарктида), выявлены, диагностированы и описаны сотни тудя разного размера и облика. В Антарктиде вытаяли и более старые тудя [14].

Что касается предполагаемых тудя на Марсе, то их удалось выявить гораздо позднее, в конце XX — начале XXI веков после публикации [1, 8 и др.] высококачественных, с высоким разрешением снимков марсианской поверхности, сделан-

ных с американских и российских космических аппаратов. Наиболее ярким примером такого рода являются многочисленные изображения (рис. 5) разных лет самого высокого вулкана Гора Олимп [1, 8], имеющего типичные признаки грандиозной тудя — вулcano-гляциальной постройки, крупнейшей из обнаруженных пока на обеих планетах. Площадь ее основания по подошве 3–6-километрового Олимпийского уступа [8, 18] ~300 тыс. км², размер — 500 × 600 км. Приблизительный объем вулканических пород морфологически выраженной части тудя — порядка 2.4 млн км³. Оставленные окружавшими со всех сторон Гору Олимп ледниками подножий аккумулятивные ледниковые образования разных типов великолепно видны на космических изображениях поверхности этого региона Марса. Поэтому они сравнительно легко картируются при проведении геоморфологического дешифрирования и позволяют достаточно точно определить конфигурацию и размеры бывших ледников. Сразу следует отметить, что оледенение Горы Олимп было весьма обширным — порядка 1.5–2 млн км². Фронтальные части ледников в юго-западном, западном, северо-западном и северо-восточном секторах располагались в 700–750 км от кратера вулкана, в других секторах — в 500–600 км. При этом хорошо выделяющиеся участки ледникового рельефа указывают на многофазность и длительность оледенения.

На максимальном (1100 км, борозды Ахерон) расстоянии от центра вулкана дешифрируются следы колоссальных грязекаменных потоков типа лахаров, сложенные, по-видимому, обломками изверженных пород вулкана Гора Олимп, переотложенными ледниковыми и водно-ледниковыми образованиями. Потоки образовались в результате катастрофических разрушений ледяной стенки котловины, в которой формировался вулкан-тудя Гора Олимп. Земной аналог подобного процесса — сильнейшие исландские йокулдхлаупы, приуроченные к заполненным льдом кальдерам с растущими внутри них вулканами.

Судя по высоте Олимпийского уступа (3–6 км), теоретически примерно равной мощности ледникового покрова в данном месте, подобная вулcano-гляциальная форма рельефа могла бы возникнуть в современную эпоху на Земле лишь в Антарктиде или Гренландии, если бы там был столь мощный вулканизм. А в плейстоцене при тех же условиях — еще и в пределах Фенноскандинавского и Северо-Американского ледниковых щитов.

На современных изображениях Олимпийского уступа (см. рис. 5) хорошо видно, что после возникновения его целостность была нарушена несколькими разновременными очень крупными сеймотектоническими обвалами, вероятнее все-

го, связанными с пульсирующим характером эруптивной деятельности этого вулканического центра. Начало пульсаций, как и на земных вулканах, предварялось и сопровождалось марсотрясениями. Только на вулкане Гора Олимп марсотрясения были, очевидно, сильнее земных вулканических сотрясений, а грубообломочный материал обвалов распространялся минимум на многие десятки километров от уступа туюя. Через образовавшиеся бреши в уступе изливались и лавы центрального щитообразного вулкана. Не исключено, что через эти же “прогалы” выходили и ледники, начинавшиеся на склонах последнего. Их появлению и существованию там, как и на земных активных вулканах, благоприятствовало повышенное количество выпадающих осадков [23].

В очень кратком варианте предполагаемая история формирования вулкано-гляциальной постройки Гора Олимп может быть представлена в следующем виде. На начальном этапе под существовавшим тогда мощным покровным ледником (или ледниковым щитом) стали происходить интенсивные большеобъемные трещинные лавовые излияния. Их породы проплавили в этом ледниковом покрове огромную (размером 500×600 км) полость с крутыми ледяными стенами высотой в несколько километров и начали с большой скоростью ее заполнять. Именно тогда, вероятно, и случались эпизоды катастрофических разрушений стенок этой котловины, сопровождаемые возникновением описанных выше лахароподобных потоков. На следующем этапе в связи с уменьшением продуктивности магматической активности произошла концентрация выноса магмы из ее очага с формированием единого подводящего канала и огромной постройки центрального типа — щитообразного вулкана Гора Олимп. На финальном этапе эруптивной активности на вершине вулкана возник комплекс из четырех — пяти (?) кальдер гавайского типа (см. рис. 2). Доминирующими центрами извержений лав стали радиальные трещины на склонах вулкана. Однако, вероятно, происходили и очень мощные эксплозивные извержения с выбросом и обвалом километровых блоков пород, слагавших вершинную часть вулкана, которые видны даже на космических снимках (см. рис. 2).

После прекращения извержений и исчезновения древнего ледникового покрова вулкан Гора Олимп стал не только самым высоким (по разным оценкам, до 27,4 км [11]), самым массивным (размер основания 500×600 км, площадь ~ 300 тыс. км²) и объемным (> 1 млн. км³) единственным вулканическим сооружением из известных в Солнечной системе, но и самой крупной в ней вулкано-гляциальной постройкой типа туюя.

Из диагностированных автором настоящей статьи предполагаемых относительно более мел-

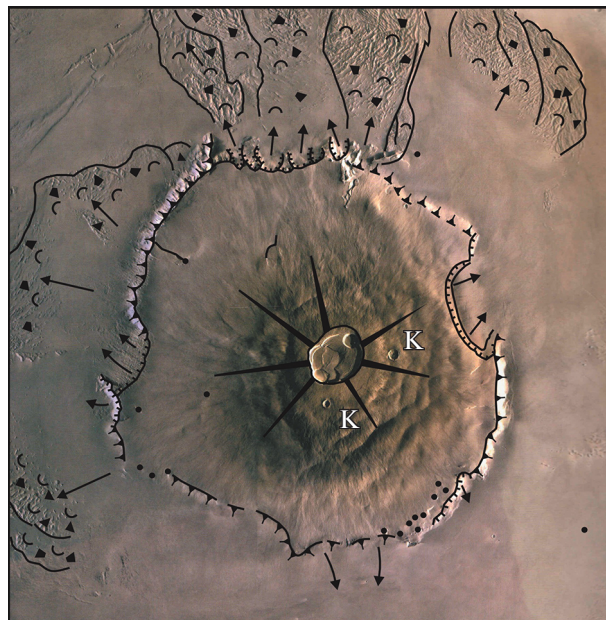


Рис. 5. Гигантская туюя — вулкан Гора Олимп.

1 — внешний уступ туюя (а — выраженный в рельефе, б — перекрытый, предположительно, лавой); 2 — обвальные цирки, стрелки показывают направление перемещенных масс; 3 — холмистый рельеф, сложенный лавой и мореной, перекрытый эоловым материалом; 4 — отдельно стоящие крутосклонные холмы (блоки перемещенных пород с размерами оснований 1–3 км); 5 — комплекс кальдер гавайского типа и вершинная часть вулканической постройки Гора Олимп (по [1], дешифрирование автора).

ких туюя самой известной формой является знаменитый Марсианский сфинкс (рис. 6), изображенный в работе Ж.Ф. Родионовой [28]. Он стал “сфинксом” после съемки в 1978 г. с орбитального блока “Викинг” участка с расположенными вокруг него “пирамидами”. В результате последующей съемки с высоким разрешением со спутника “Марс Глобал Сервейор” выяснилось, что это — своеобразная марсианская возвышенность, расчлененная трещинами [28]. Однако при проведении геоморфологического дешифрирования “сфинкс” оказался похожим на типичную земную форму туюя (см. рис. 6). Там присутствовали и характерный для туюя внешний уступ, и даже подобие небольшого вулканического аппарата.

Еще один район с предполагаемыми туюя — 120-километровый кратер Гусева (центр 15° с.ш., 185° з.д.). Туюя (рис. 7) располагаются в южной части кратера — это Южные столовые горы в 30 км к югу от места посадки 3 января 2004 г. марсохода Spirit. Размер основания самой крупной туюя 6×5 км. Ориентировочная высота ее уступа равна 500–600 м.

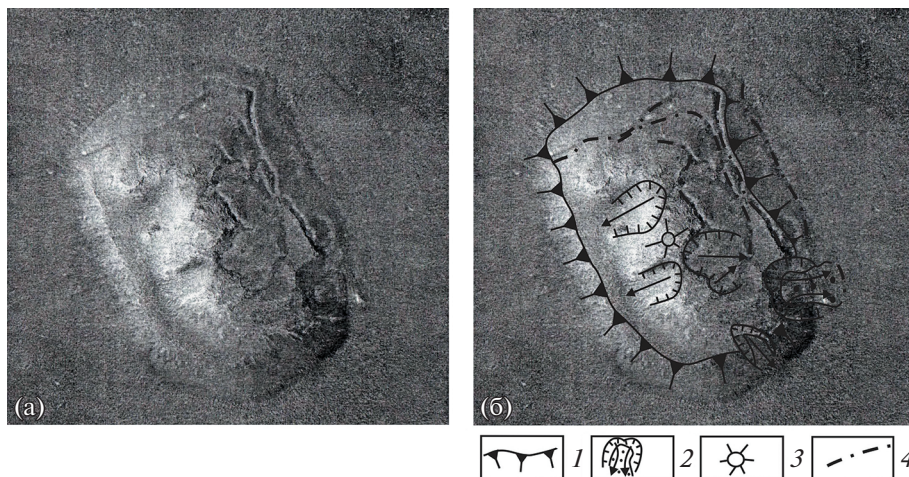


Рис. 6. Знаменитый Марсианский сфинкс – тюя – на детальном снимке “Марс Глобал Сервейор”.

1 – внешний уступ тюя; 2 – обвально-оползневые цирки и их отложения, стрелки показывают направление движения перемещенных масс; 3 – предполагаемый вулканический центр; 4 – гравитационные и вулкано-тектонические линейные нарушения (по [29], дешифрирование автора).

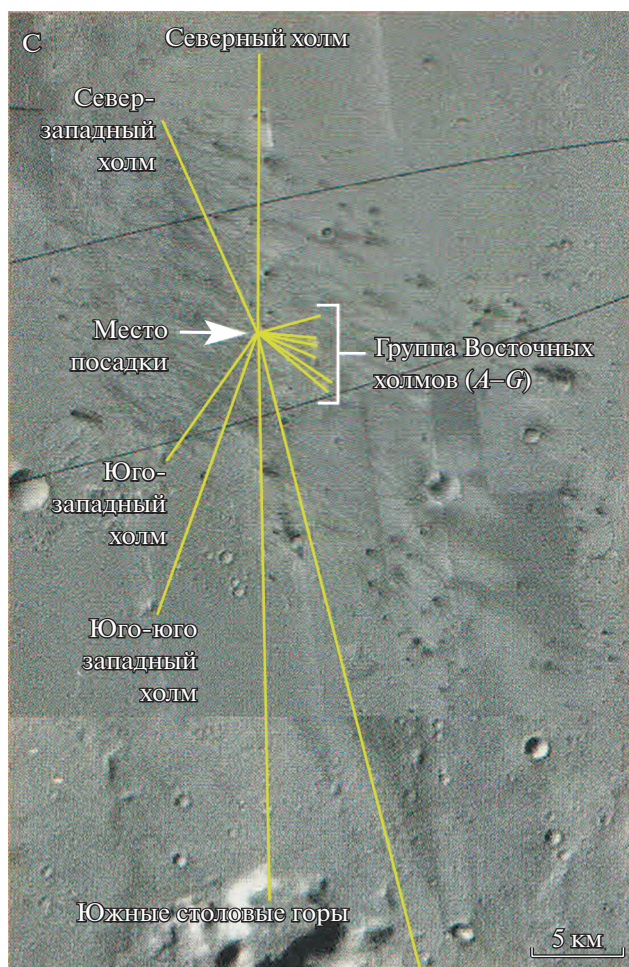


Рис. 7. Предполагаемые тюя – Южные столовые горы – на дне 120-километрового кратера Гусева [13], около 30 км к Ю от места посадки американского космического аппарата Spirit 3 января 2004 г. [30, с. 26].

Необходимо отметить, что тюя Гора Олимп и тюя в южной части кратера Гусева находятся в низких приэкваториальных широтах, но этого все же слишком мало, чтобы судить о масштабе и типе древнего оледенения, его возрасте. Не исключено, что рассматриваемое древнее оледенение, пока условно названное автором статьи олимпийским, могло быть, в отличие от современного оледенения Марса, и планетарным. На это, в частности, указывает и предполагаемая очень большая (3–6 км), судя по высоте уступа тюя, мощность льда вокруг вулкано-гляциальной формы Гора Олимп. Предварительный ответ на такой вопрос, возможно, будет получен после проведения детального дешифрирования имеющихся изображений с высоким разрешением 100–200-километровой полосы марсианской поверхности вдоль меридиана, проходящего через тюя Гора Олимп, Северную и Южную полярные шапки.

КРАТКОЕ ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная статья – еще один призыв к детальному изучению следов древних оледенений на Марсе, вероятно, более близком по истории геологического развития к Земле, чем другие планеты земного типа – Меркурий и Венера. Дело в том, что это необходимо для сравнения на обеих планетах масштабов и характера оледенений древних эпох (от раннего протерозоя до конца палеозоя), так как на Земле следы столь древних оледенений были уничтожены или оказались малодоступными для исследования в результате размыва и погребения под более молодыми геологическими образованиями. На Марсе же они еще часто хорошо выражены в рельефе.

Результаты проведенного дешифрирования показали, что единственными постройками, близкими по своей морфологии и механизму возникновения на Земле и на Марсе, являются вулcano-гляциальные формы рельефа типа туюя. Однако приведенные выше примеры — несомненно, лишь очень небольшая часть реально существующих на Марсе выраженных в рельефе подобных древних вулcano-гляциальных форм. Но их масштабное выявление, диагностирование и картирование — дело будущего и объект изучения для большого, специально созданного, высокопрофессионального международного коллектива. Необходимым условием должна быть и максимальная доступность полученных изображений съемок поверхности планеты на всех широтах.

Предполагается, что главными потенциальными объектами для будущего изучения гляциально-вулканических форм, помимо окрестностей вулканов, могут стать районы распространения столовых гор и куполов. Особое внимание должно быть обращено на поиск и тщательное исследование современных аналогов следов бывших оледенений — результата взаимодействия вулканических процессов и ледников в областях, регулярно оставляемых после отступления Северной и Южной полярных шапок Марса при сокращении их площадей или исчезновении. Лишь только тогда, возможно, удастся реконструировать реальные масштабы, тип и другие характеристики оледенений этой планеты.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарен своим коллегам О.В. Дирксену и Л.И. Базановой за обсуждение проблемы и помощь в подборе материалов для статьи, Р.Р. Курмашовой — за подготовку статьи к печати.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Спарроу Дж.* Планеты. Путешествие по Солнечной системе. СПб.: Амфора, ТИД Амфора, 2008. 224 с.
2. *Маров М.Я.* Планеты Солнечной системы. М.: Наука, 1986. 320 с.
3. *Nerozzi S. and Holt J.W.* Earliest accumulation history of the north polar layered deposits, Mars from SHARAD Icarus 308. 2018. P. 128–137.
4. *Nerozzi S. and Holt J.W.* Buried Ice and Sand Caps at the North Pole of Mars: Revealing a Record of Climate Change in the Cavi Unit With SHARAD // *Geophysical Research Letters*. 2019. Vol. 46. P. 7278–7286.
5. *Orosei I R., Lauro S.E., Pettinelli E., Cicchetti A., Coradini M., Cosciotti B., Di Paolo I F., Flamini E., Mattei E., Pajola M., Soldovieri F., Cartacci M., Cassenti F., Frigeri A., Giuppi S., Martufi R., Masdea A., Mitri G., Nenna C., Noschese R., Restano M., and Seu R.* Radar evidence of subglacial liquid water on Mars // *Science*. 2018. Vol. 361. P. 490–493.
6. *Чумаков Н.М.* Докембрийские тиллиты и тиллоиды. М.: Наука. 1978. 202 с.
7. *Чумаков Н.М.* Следы позднепермского оледенения на Колыме: отзвук гондванских оледенений на Северо-Востоке Азии? // *Стратиграфия. Геологическая корреляция*. 1994. Т. 2. № 5. С. 70–82.
8. *Галимов Э.М.* Оледенения в истории Земли, биосфера и низкая светимость Солнца // *Природа*. 2019. № 6. С. 44–52.
9. *Ксанофомалити Л.В.* Парад планет. М.: Наука, 1997. 256 с.
10. *Zimbelman J.R.* Volcanism on Mars // *Encyclopedia of Volcanoes* (Editor-in-Chief H. Sigurdsson). Academic press. London. 2000. P. 771–783.
11. *Ксанофомалити Л.В.* Горные потоки и бассейны на Марсе // *Марс: великое противостояние* / ред. В.Г. Сурдин. М.: Наука, 2004. С. 199–207.
12. *Олби А.* Загадочные ландшафты Марса. Космос // *Альманах*. 2006. С. 154–161.
13. *Мелекесцев И.В.* Гора Ранняя и обрыв Шеридана в Антарктиде — самые старые на Земле и высокоширотные туюя на Земле // *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*. 2011. № 1. С. 142–146.
14. *Schopka H., Gudmundsson M.T., and Tuffen H.* The formation of Helgafell, Southwest Iceland, a monogenetic subglacial // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2006. Vol. 152. P. 359–377.
15. *Mathews W.H.* “Tuyas”, flat-topped volcanoes in Northern British Columbia // *Am. J. Sci.* 1947. Vol. 245. P. 560–570.
16. *Бурба Г.А.* Номенклатура деталей рельефа Марса. М.: Наука, 1981. 86 с.
17. *Smellie J.I.* Subglacial eruption / Sigurdsson H., Houghton B., McNutt S.R., Stix (Eds.). *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press. London. 2000. P. 403–418.
18. *Russel J.K., Edwards B.R., Porrit L., and Ruane C.* Tuyas: a descriptive genetic classification // *Quaternary Science Reviews*. 2014. Vol. 87. P. 70–81.
19. *Марс: великое противостояние.* М.: Наука, 2004. 224 с.
20. *Гипсометрическая карта Марса* / Ю.А. Илюхина. М.: Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ, 2004.
21. *Мелекесцев И.В.* Вулканизм и рельефообразование. М.: Наука, 1980. 212 с.
22. *Volcanism in Hawaii* / Decker R.W., Wright T.L., and Stauffer P.H. (Eds.). Vol. 1. U.S. Geological Survey Professional Paper 1350. U.S. Government Printing office, Washington. 1987. 840 p.
23. *Новейший и современный вулканизм на территории России* / Отв. ред. Л.И. Лавров. М.: Наука, 604 с.
24. *Allen C.C.* Volcano-ice interactions on Mars // *J. Geophys. Res.* 1979. Vol. 84. P. 8048–8059.
25. *Noe-Nygaard A.* Sub-glacial volcanic activity and recent times (Studies in the palagonite-system of Iceland № 1) // *Folia Geogr. Danica*. 1940. Vol. 1. No. 2. 67 p.
26. *Влодавец В.И.* Справочник по вулканологии. М.: Наука, 1984. 340 с.
27. *Мелекесцев И.В., Дирксен О.В., Гирина О.А.* Гигантский эксплозивно-обвальный цирк и обломочная

- лавины на вулкане Бакенинг (Камчатка, Россия) // Вулканология и сейсмология. 1998. С. 12–24.
28. Мелекесцев И.В., Краевая Т.С., Брайцева О.А. Рельеф и отложения молодых вулканических районов Камчатки. М.: Наука, 1970. 103 с.
29. Родионова Ж.Ф. Краткая история карты Марса // Марс: Великое противостояние. М.: Наука, 2004. С. 183–198.
30. Массер Дж. Красная планета не жалует незваных гостей. Космос // Альманах. 2006. С. 162–167.

Gigantic volcano-glacial edifice (tuya) Olympus Mountain as an indicator of extensive ancient glaciation in Mars

I. V. Melekestsev^{a, #}

^a*Institute of Volcanology and Seismology far Eastern Branch of RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*

[#]*E-mail: dirksen@ksnet.ru*

Olympus Mons (basement dimension – 550×600 km, absolute height – 21.1 km, relative elevation – 21.9 km, volume – 2.4×10^9 km³) is the largest volcanic edifice on Mars as well as on Earth. Comparative analysis, aimed to find the regular combinations between volcanic and glacial forms at Olympus Mons revealed their similarity to terrestrial volcanic landform, tuya. This, probably, testifies to their similar origin. Olympus Scarp, 3–6 km in height, bounding Olympus Mons, suggests that, during the formation of Olympus Mons vast glaciers existed beyond the polar regions. The distribution of extensive glacial moraines allowed to estimate the area of glaciation to be equal to $1.5\text{--}2 \times 10^6$ km², as well as ice sheet thickness of 3–6 km, comparable to the recent height of Olympus Scarp. Several moraine lobes point to multiple phases of glaciations. The directions of the lobe propagation record the asymmetry in glaciers distribution. Edge of the glacier was located 700–750 km away from the crater in the South-western, Western, North-western, Northern, and North-eastern section of the volcano, and 500–600 km away elsewhere. Some of the glacial and fluvio-glacial deposits disperse to the maximum extent of 1100 km, probably by giant mud flows, similar to terrestrial Jökulhlaup in Iceland ice-covered volcanoes. Such floods form when the heated during the eruption water melts the ice wall around the erupting vent and outbursts from the volcanic edifice.

Keywords: Mars, volcano Olympus Mountain, ancient ice sheet, volcanic mudflows, caldera

ACKNOWLEDGEMENTS

The author thanks his colleagues O.V. Dirksen and L.I. Bazanova for the discussion of the problem and help in the finding and selection of materials for the article; R.R. Kurmashova – for the manuscript preparation.

REFERENCES

1. Sparrow G. The Planets. *Planety. Puteshestvie po Solnechnoi sisteme* (Planets. A journey through the Solar System). SPb.: Amfora (Publ.), 2008. 224 p.
2. Marov M.Ya. *Planety Solnechnoi sistemy* (Planets of the Solar System). M.: Nauka (Publ.), 1986. 320 p. (in Russ.)
3. Nerozzi S. and Holt J.W. Earliest accumulation history of the north polar layered deposits, Mars from SHARAD Icarus 308. 2018. P. 128–137.
4. Nerozzi S. and Holt J.W. Buried Ice and Sand Caps at the North Pole of Mars: Revealing a Record of Climate Change in the Cavi Unit With SHARAD. *Geophysical Research Letters*. 2019. Vol. 46. P. 7278–7286.
5. Orosei R., Lauro S.E., Pettinelli E., Cicchetti A., Coradini M., Cosciotti B., Di Paolo F., Flamini E., Mattei E., Pajola M., Soldovieri F., Cartacci M., Cassenti F., Frigeri A., Giuppi S., Martufi R., Masdea A., Mitri G., Nenna C., Noschese R., Restano M., and Seu R. Radar evidence of subglacial liquid water on Mars. *Science*. 2018. Vol. 361. P. 490–493.
6. Chumakov N.M. *Dokembriskie tillity i tilloidy* (Precambrian tillites and tilloids). M.: Nauka (Publ.), 1978. 202 p. (in Russ.)
7. Chumakov N.M. *Sledy pozdnepermского oledeneniya na Kolyme: otzvuk gondvanskikh oledeneni na severo-vostoke Azii?* (Traces of Late Permian glaciation on the River Kolyma: the echo of Gondwana glaciations in North-East Asia). *Stratigrafiya. Geologicheskaya korrelyatsiya*. 1994. Vol. 2. No. 5. P. 70–82. (in Russ.)
8. Galimov E.M. *Oledeneniya v istorii Zemli, biosfera i nizkaya svetimost' Solntsa* (Glaciations in the History of the Earth. Biosphere. Low Luminosity of the Sun). *Priroda*. 2019. No. 6. P. 44–52. (in Russ.)
9. Ksanofomaliti L.V. *Parad Planet* (Parade of planets). M.: Nauka (Publ.), 1997. 256 p. (in Russ.)
10. Zimbelman J.R. Volcanism on Mars // *Encyclopedia of Volcanoes*. H. Sugardsson (Ed.). Academic press. London. 2000. P. 771–783.
11. Ksanofomaliti L.V. *Gornye potoki i basseiny na Marse* (Mountain streams and pools on Mars). *Mars: Velikoe protivostoyanie*. Surdin V.G. Ed. M.: Nauka (Publ.), 2004. P. 199–207. (in Russ.)
12. Albee A. *Zagadochnye landshafty Marsa. Kosmos* (The Unearthly Landscapes of Mars. Space). *Almanakh*. 2006. S. 154–161.
13. Melekestsev I.V. *Gora Rannyaya i obryv Sheridana v Antarktide – samye starые i vysokoshirotnые tuya na Zemle* (Mount Early and Sheridan Cliff in Antarctica are the oldest and highest latitude tuyas on Earth). *Vestnik*

- KRAUNTS. Nauki o Zemle*. 2011. No. 1. P. 142–146. (in Russ.)
14. Schopka H., Gudmundsson M.T., and Tuffen H. The formation of Helgafell, Southwest Iceland, a monogenetic subglacial. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2006. Vol. 152. P. 359–377.
 15. Mathews W.H. “Tuyas”, flat-topped volcanoes in Northern British Columbia. *Am. J. Sci.* Vol. 245. P. 560–570.
 16. Burba G.A. *Nomenklatura detalei rel'efa Marsa* (Nomenclature of Mars relief details). M.: Nauka (Publ.), 1981. 86 p. (In Russ.)
 17. Smellie J.I. Subglacial eruption. Sigurdsson H., Houghton B., McNutt S.R., Stix (Eds.). *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press. London. 2000. P. 403–418.
 18. Russel J.K., Edwards B.R., Porrit L., and Ruane C. Tuyas: a descriptive genetic classification. *Quaternary Science Reviews*. 2014. Vol. 87. P. 70–81.
 19. *Mars: Velikoe protivostoyanie* (The Greatest Opposition of Mars). Surdin V.G. (Ed.). M.: Nauka (Publ.), 2004. 224 p. (in Russ.)
 20. *Gipsometricheskaya karta Marsa* (Hypsometric map of Mars). Yu.A. Ilyuhina (Ed.). M.: Gosudarstvennyi Astronomicheskii Institut im. P.K. Shternberga MGU (Publ.), 2004.
 21. Melekestsev I.V. *Vulkanizm i rel'efoobrazovanie* (Volcanism and relief formation). M.: Nauka (Publ.), 1980. 212 p.
 22. Volcanism in Hawaii. Decker R.W., Wright T.L., Stauffer P.H. (Eds.). Vol. 1. U.S. Geological Survey Professional Paper 1350. U.S. Government Printing office, Washington. 1987. 840 p.
 23. *Noveishii i sovremennyyi vulkanizm na territorii Rossii* (Modern and Holocene volcanism in Russia). L.I. Lavrov (Ed.). M.: Nauka (Publ.), 2005. 604 p. (in Russ.)
 24. Allen C.C. Volcano-ice interactions on Mars. *J. Geophys. Res.* 1979. Vol. 84. P. 8048–8059.
 25. Noe-Nygaard A. Sub-glacial volcanic activity and recent times (Studies in the palagonite-system of Iceland No. 1). *Folia Geogr. Danica*. 1940. Vol. 1. No. 2. 67 p.
 26. Vlodavets V.I. *Spravochnik po vulkanologii* (Handbook on Volcanology). M.: Nauka (Publ.), 304 p. (in Russ.)
 27. Melekestsev I.V., Dirksen O.V., and Girina O.A. *Gigantskii eksplozivno-obval'nyi tsirk i oblomoch'naya lavina na vulkane Bakening (Kamchatka, Rossiya)* (A Giant Explosive-Landslide Cirque and a debris avalanche on Bakening Volcano (Kamchatka, Russia)). *Vulkanologiya i Seismologiya*. 1998. No. 3. P. 265–279. (in Russ.)
 28. Melekestsev I.V., Kraevaya T.S., and Braitseva O.A. *Rel'ef i otlozheniya molodykh vulkanicheskikh raionov Kamchatki* (Relief and Deposits of Young Volcanic regions of Kamchatka). M.: Nauka (Publ.), 103 p.
 29. Rodionova Zh. F. *Kratkaya istoriya karty Marsa* (A brief history of the map of Mars). *Mars: Velikoe protivostoyanie* Surdin V.G. (Ed.). M.: Nauka (Publ.), 2004. P. 183–198. (in Russ.)
 30. Musser J. *Krasnaya planeta ne zhaluet nezvanykh gostei. Kosmos* (The Red Planet does not favor uninvited guests. Space). *Almanakh*. 2006. P. 162–167.