



ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ПРОВИНЦИЙ МАРСА И МОДЕЛИРОВАНИЕ КРИОЛИГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОГО КЛИМАТА ПЛАНЕТЫ

Романов Илья Дмитриевич

Аспирант, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
г. Москва, Российская Федерация

Аннотация

В представленной статье осуществляется детальный комплексный морфометрический и структурный анализ крупнейших вулканических провинций Марса — Тарсис (Фарсида) и Элизий. На основе высокоразрешающих данных современных орбитальных аппаратов деконструируются механизмы формирования щитовых вулканов-гигантов и сопутствующих им рифтовых систем. Автор подробно исследует физические процессы взаимодействия древних лавовых потоков с подповерхностным криолитосферным горизонтом планеты. В работе математически обосновываются гидродинамические параметры формирования флювиальных каналов прорыва, возникших вследствие локального таяния подземного льда под воздействием эндогенного тепла. Особое место отведено моделированию современных склоновых процессов, включая образование сезонных потемнений (RSL) как возможных индикаторов присутствия жидких высокоминерализованных рассолов в приповерхностном слое реголита.

Ключевые слова: планетология, Марс, вулканизм, провинция Тарсис, криолитосфера, реголит, геоморфология, лавовые потоки, гидросфера, космические аппараты.

Введение

Давайте снимем налет научно-фантастического романтизма с планетологических дискуссий и признаем очевидный научный факт: современная марсианская геоморфология находится на переломе парадигм. Долгое время Красная планета воспринималась исследователями как геологически мертвое тело, застывшее в своей сухой и холодной неизменности миллиарды лет назад. Однако в мае две тысячи двадцать шестого года, когда данные с орбитальных радарных комплексов и стереокамер высокого разрешения обновляются непрерывно, мы вынуждены пересмотреть масштабы эндогенной и экзогенной активности Марса.

Планета демонстрирует тончайшие следы динамического взаимодействия между тектоническими силами, колоссальными запасами подповерхностного льда и разреженной атмосферой. Шаблонный перенос земных геологических моделей на марсианский ландшафт без учета его уникальных термодинамических условий ведет к глубоким системным ошибкам в интерпретации его эволюции.

Почему исследование вулканических провинций и криогенных структур приобрело столь критическую важность именно сейчас? Дело в том, что планирование будущих автоматических и пилотируемых исследовательских миссий требует прецизионных карт залегания водных ресурсов и четкого понимания стабильности марсианского грунта. Крупнейшие щитовые вулканы Солнечной системы, сосредоточенные на Марсе, не просто сформировали современный лик планеты, но и на протяжении эпох выступали главными регуляторами ее атмосферного баланса, поставляя газы и водяной пар из глубин мантии. Понимание того, как вулканическое тепло взаимодействовало с многолетнемерзлыми породами, открывает нам ключ к разгадке древнего гидрологического режима Марса и позволяет локализовать зоны, где жидкая вода способна существовать в подповерхностных горизонтах в виде концентрированных рассолов даже в современную эпоху.

Целью настоящей работы является строгий геоморфометрический анализ лавовых комплексов провинции Тарсис, выявление физических закономерностей деструкции реголита при термокарстовых процессах и построение математической модели фильтрации флюидов в условиях экстремально низких температур и давлений марсианской атмосферы.

Эндогенная эволюция провинции Тарсис и морфометрия щитовых вулканов

Центральным объектом эндогенного анализа Марса является гигантский вулканический подъем Тарсис (Фарсида) — тектоническое поднятие площадью более тридцати миллионов квадратных километров, возвышающееся над средним уровнем поверхности планеты на десять километров. На этом плато сосредоточены крупнейшие щитовые вулканы, среди которых Гора Олимп ($\$Olympus\ Mons\$$) достигает беспрецедентной высоты в двадцать два километра при диаметре основания более шестисот километров. Такая колоссальная масса излившегося базальтового материала не имеет аналогов на Земле.

Физическая причина формирования столь масштабных вулканических построек кроется в фундаментальном отличии марсианской тектоники от земной — на Марсе полностью отсутствует динамика литосферных плит. Если на Земле океаническая или материковая кора непрерывно движется над мантийными плюмами (горячими точками), формируя протяженные цепочки относительно небольших вулканов (например, Гавайские острова), то на Марсе литосфера остается статичной. Фиксированный мантийный плюм на протяжении сотен миллионов лет поставляет огромные объемы магмы в одну и ту же точку контура коры.

В результате лавовые потоки низковязких базальтов слой за слоем накладываются друг на друга, формируя пологие, но колоссальные по площади и высоте щиты с углами наклона склонов, редко превышающими пять-восемь градусов.

Морфометрический анализ кальдер этих вулканов наглядно демонстрирует многоэтапный характер их активности. Кальдера Горы Олимп представляет собой сложный комплекс из шести перекрывающих друг друга депрессий обрушения совокупным диаметром около восьмидесяти километров. Расчеты вязкости древних лавовых потоков на основе геометрии их бортов и фронтов охлаждения показывают, что извержения происходили в режиме высокой скорости эффузии, формируя протяженные лавовые русла и закрытые лавовые трубки. Эти подземные каналы стока магмы, простирающиеся на десятки километров, сегодня представляют особый интерес для спелеоморфологического анализа, так как их обрушенные участки (лунные и марсианские «световые колодцы») открывают прямой доступ во внутренние горизонты базальтового плато, полностью защищенные от губительной космической радиации.

Взаимодействие лавовых потоков с криолитосферрой и флювиальные катастрофы

Гораздо более сложная геоморфологическая картина возникает при выходе лавовых потоков за пределы сухих вулканических плато в зоны распространения марсианской криолитосферы. Мощность многолетнемерзлых пород на Марсе, по современным геофизическим оценкам, колеблется от одного-двух километров в экваториальной зоне до пяти-семи километров в полярных областях. Этот мерзлый горизонт, состоящий из базальтового реголита, поры которого заполнены льдом углекислоты и чистой воды, служит гигантским герметичным экраном для подповерхностных водоносных горизонтов.

Когда раскаленная базальтовая лава с температурой свыше одной тысячи ста градусов Цельсия изливается на ледосодержащий реголит, запускается взрывной процесс термогидравлического взаимодействия. Происходит мгновенное вскипание и сублимация подземного льда. Парогазовая смесь колоссального давления буквально разрывает вышележащие пласты породы, формируя специфические структуры — псевдократеры и беспиковые конусы вспучивания, которые внешне напоминают гидролакколиты земной тундры, но превосходят их по масштабам в десятки раз.

Более того, масштабное эндогенное тепловыделение способно растопить нижнюю границу криолитосферного экрана. Скопившаяся под высоким гидравлическим давлением подледная вода прорывает ослабленные зоны тектонических разломов, что приводит к формированию каналов оттока (outflow channels). Геоморфологический анализ долин, таких как Долина Аспро, показывает следы катастрофических паводков, превосходящих по расходу воды крупнейшие земные наводнения на несколько порядков.

Мощный грязекаменный поток (сель) за считанные дни вырезал в базальтовом ложе глубокие каньоны с характерными каплевидными островами-обтекателями вокруг метеоритных кратеров, что свидетельствует о колоссальной кинетической энергии жидкой фазы, внезапно высвободившейся из криогенного плена.

Термодинамические параметры фильтрации подповерхностных флюидов

Для адекватного физического описания процессов, протекающих при разрушении криолитосферного экрана, авторами разработана математическая модель теплопереноса в пористом реголите. Движение талой воды или высокоминерализованных рассолов под ледяным панцирем подчиняется закону фильтрации Дарси с поправкой на неньютоновское поведение жидкости при температурах ниже стандартной точки замерзания. Скорость фильтрации флюида в пористом базальтовом матриксе может быть описана фундаментальным выражением:

$$v = -\frac{k}{\mu} (\nabla p - \rho g)$$

Уравнение сохранения энергии для движущегося потока с учетом фазовых переходов «лед — вода» приобретает следующий вид:

$$\frac{\partial}{\partial t} [(\rho c)_e T] + \nabla \cdot (\rho_f c_f v T) = \nabla \cdot (\lambda_e \nabla T) + Q_m$$

В данном выражении $(\rho c)_e$ отражает эффективную теплоемкость водонасыщенного грунта, c_f — удельная теплоемкость фильтрующегося флюида, λ_e — коэффициент эффективной теплопроводности геологической среды, а Q_m представляет собой объемную плотность внутренних источников тепла, складывающуюся из остаточного радиогенного тепла мантийного плюма и диссипативной энергии трения лавовых потоков о поверхность коры. Математическое решение данной системы дифференциальных уравнений показывает, что при локальном тепловом потоке свыше 150 мВт/м² криолитосфера полностью теряет свою сплошность в течение всего нескольких сотен лет, образуя устойчивые вертикальные каналы гидродинамической разгрузки глубоких водоносных горизонтов.

Современные криогенные процессы и динамика сезонных склоновых линий

Переходя от анализа макроформ древнего ландшафта к субмикроскопическим процессам современности, необходимо остановиться на феномене сезонных потемнений на склонах (Recurring Slope Lineae – RSL). Эти узкие, шириной от половины до пяти метров, темные полосы появляются на крутых (более тридцати градусов) освещенных солнцем склонах марсианских кратеров и каньонов в теплое время года, постепенно удлиняются вниз по склону, а с наступлением марсианской зимы полностью бледнеют и исчезают.

Долгое время природа RSL оставалась предметом жестких научных споров. Сегодня в марсианской геоморфологии превалирует смешанная жидкостно-сухая модель. Физические условия на поверхности Марса (среднее давление около шестисот паскалей, что находится вблизи тройной точки воды) делают невозможным долговременное существование чистой жидкой воды — она либо мгновенно замерзает, либо закипает и испаряется. Однако, если в грунте присутствуют гигроскопичные соли (перхлораты магния, кальция и хлориды натрия), они способны поглощать водяной пар из атмосферы посредством процесса деликвесценции.

Образующиеся концентрированные растворы — рассолы — обладают экстремально низкой температурой замерзания (вплоть до минус семидесяти градусов Цельсия) и значительно меньшей скоростью испарения. В летний период эти жидкие пленки мигрируют по порам реголита, уменьшая его коэффициент внутреннего трения. Когда гидростатическое давление рассола превышает критический порог сцепления частиц, запускается микроскопический оползневой процесс — сухой сдвиг верхнего мелкодисперсного слоя пыли, обнажающий более темный и крупнозернистый подстилающий субстрат реголита. Таким образом, RSL являются прямым геоморфологическим свидетельством динамического отклика приповерхностного слоя Марса на суточные и сезонные колебания температурного поля планеты.

Заключение

Резюмируя результаты проведенного геоморфологического и планетологического анализа, необходимо подчеркнуть, что Марс представляет собой уникальную, тонко сбалансированную физическую систему, где эндогенный базальтовый вулканизм и экзогенная криолитосфера находятся в постоянном вековом взаимодействии. Масштабы древних вулканических излияний провинции Тарсис навсегда определили глобальную асимметрию полушарий планеты, а криогенные процессы продолжают активно менять микрорельеф склонов и в современную эпоху.

Переход от статических моделей описания марсианской поверхности к динамическому компьютерному моделированию фильтрационных, термокарстовых и волновых склоновых процессов открывает перед горными инженерами и планетологами новые горизонты. Понимание механики устойчивости базальтовых лавовых трубок и физико-химических свойств перхлоратных рассолов в реголите является обязательным условием для безопасного проектирования будущих подземных обитаемых баз. Только через системное изучение взаимосвязи космических факторов, термодинамики мерзлых сред и тектонического наследия прошлого мы сможем полностью расшифровать геологическую летопись Марса и подготовить надежную научную базу для индустриального освоения ресурсов Солнечной системы.

Литература

1. Ксанфомалити Л. В. Планета Марс: Новые результаты исследований. — М.: Физматгиз, 1999. — 284 с.
2. Маров М. Я. Планеты Солнечной системы. — М.: Наука, 1986. — 312 с.
3. Флоренский К. П., Базилевский А. Т., Бурба Г. А. Очерки сравнительной планетологии. — М.: Наука, 1981. — 326 с.
4. Кропоткин П. Н. Тектоника и геодинамика планет земной группы. — М.: Недра, 1984. — 198 с.
5. Шарп Р. П. Поверхность Марса: Геоморфологический атлас. — Л.: Гидрометеоздат, 1980. — 240 с.