

Глава 6

Вулканогенные образования Камчатки как аналоги грунтов других планет Земной группы

Еще на заре космической эры ученые поняли необходимость поисков и применения земных грунтов, которые служили бы аналогами грунтов других планет для испытания и отработки на них посадочных устройств космических аппаратов, опробования снаряжения космонавтов и т.д. [112]. Чем больше появлялось информации о планетах Солнечной системы - доставка и всестороннее изучение лунного грунта, подробные фотографии поверхностей Марса, Венеры и других планет и их спутников и т.д. - тем более похожие по физическим и химическим характеристикам отложения Земли подбирались в качестве инопланетных аналогов. В целом, благодаря близкому внутреннему и, с некоторыми оговорками, внешнему строению, сходным процессам и явлениям, происходящим на планетах и небесных телах земной группы, наиболее подходящими грунтами-аналогами этих планет на Земле являются вулканогенные породы, не подвергшиеся глубоким экзогенным преобразованиям [110-112].

Лунные породы и их земные аналоги. Луна - ближайшее к Земле космическое тело, в изучении которого сделаны немалые успехи. На Луну были осуществлены посадки космических автоматических и пилотируемых людьми аппаратов, карты ее по точности не уступают земным; лунные грунты, доставленные на Землю, изучены в лабораториях СССР и США.

Главными геологическими структурами на Луне являются материки и моря. Материки - относительно светлые гористые области, испещренные кратерами диаметром до десятков и сотен километров; моря - темные равнинные области. Над морями материки возвышаются обычно на 1-2 км. Средняя высота поверхности Луны, вычисленная по гипсографической кривой, составляет 0.0 км [99]. Материки с поверхности и до глубин в несколько километров сложены, в основном, брекчиями - литифицированными выбросами из крупных кратеров. Моря приурочены к понижениям в рельефе материков, к днищам крупнейших кратерных структур, например, моря Дождей, Ясности, Кризисов. Равнинообразующим материалом лунных морей являются богатые железом базальтовые лавы, которые в момент излияния обладали низкой вязкостью. На поверхности морей наблюдаются протяженные уступы фронтальных частей крупных лавовых потоков, куполовидные возвышения, напоминающие уменьшенные аналоги земных щитовых вулканов, и шлаковые конусы. Породы материков представлены существенно полевошпатовыми разностями (анортозитами и неморскими базальтами), морей - железистыми базальтами.

Лунные магматические породы имеют структуры, свойственные земным изверженным породам, образовавшимся из расплава. Среди них обнаруживаются аналоги земных пород вулканических и плутонических

разностей. Химический состав лунных образований более мафический, чем у соответствующих земных аналогов, что связано, возможно, с формированием их в обстановке вакуума. В целом, на Земле наиболее близкими к лунным анортозитам являются анортозиты ранних этапов развития Земли - все продукты высокоглиноземистых магм раннего архея [3], морским базальтам - земные толеитовые базальты [63].

Широкое распространение на Луне получил реголит - чехол рыхлого обломочного материала, покрывающего морские и материковые образования. Сформирован он, в основном, под действием метеоритной бомбардировки поверхности спутника широким спектром частиц - от субмикронных до метеоритов поперечником в десятки метров. Первые оставляют микрократеры на обломках пород, вторые - образуют кратеры, проникающие через уже имеющийся реголит, в результате чего на поверхность выбрасывается раздробленный материал подстилающих скальных пород, представленный материковыми брекчиями и морскими базальтами. Чем древнее поверхность Луны, тем больше мощность реголита и тем сильнее он переработан.

Реголит имеет локальнослоистое строение. Слои распределены случайно и существуют различное время. Разнообразные данные косвенного определения мощности реголита на поверхности Луны показывают, что ее средняя величина в морях близка к 4-5 м, на материках - к 10-20 м.

Реголит представлен разнозернистым темно-серым и черным порошком, который легко слипается в отдельные рыхлые комки. В нем выделялись две основные разности частиц: а/ угловатые частицы магматических пород типа базальтов; б/ частицы с явными следами оплавления и спекшиеся частицы сложной формы, похожие на стеклянные и металлические капли, капельки-шарики [66].

В целом, реголит состоит из обломков монолитных пород, брекчий, зерен различных минералов, продуктов оплавления частиц поверхностного слоя реголита при микрометеоритных ударах, частиц стекла - продуктов полного плавления реголитового материала.

Медианный размер частиц реголита фракции менее 1 мм варьирует от более 100 мкм для свежего и до 60-70 мкм для зрелого реголита [66].

Обширный материал по данным изучения физико-механических свойств реголита Луны опубликован в статьях, монографиях, фундаментальных трудах в СССР и США. Остановимся лишь на некоторых характеристиках свойств реголита.

По классификации крупнообломочных и песчаных грунтов (СНиП 11-15-74) реголит, в основном, относится к пылеватым и мелким пескам, хотя встречаются и их крупнозернистые разности. Некоторые физико-механические свойства реголита приведены в табл. 13,14.

Несмотря на большие расстояния между районами работ разных станций, верхний слой реголита везде обладает сравнительно одинаковыми свойствами. Рыхлый пылеватый песок с примесью обломков и комков,

отличается малым сцеплением и довольно высоким внутренним трением, малой несущей способностью и высокой сжимаемостью.

Таблица 13

**ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛУННОГО ГРУНТА В ЕСТЕСТВЕННОМ
ЗАЛЕГАНИИ, ПОЛУЧЕННЫЕ ПРИ РАБОТАХ
“ЛУНОХОДОВ -1, -2” В 1978 Г. [110]**

Состояние грунта	Коэффициент пористости, единица	Сцепление, МПа	Угол внутреннего трения, градус
Особо рыхлое	1,3	0,013	10
Рыхлое	1,3-1,0	0,013-0,025	10-15
Средней плотности	1,0-0,9	0,025-0,032	15-18
Плотное	0,9-0,8	0,032-0,04	18-22
Сильно уплотненное	0,8	0,04	22

Таблица 14

**ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛУННОГО ГРУНТА
ПО ДАННЫМ ЭКСПЕДИЦИИ “АПОЛЛОН-16”, 1972 г. [110]**

Номер опыта	Плотность, г/см ³	Сцепление, МПа	Угол внутреннего трения, градус
1	1,89	0,006	46,6
2	1,96	0,0037	49,5
3	1,93	0,006-0,0025	47-50

Анализ результатов исследований показывает, что реголиту по свойствам наиболее близки земные вулканические пеплы базальтового и андезито-базальтового состава [110], например, пирокластические образования Толбачинского Дола, породы которого относятся к типичным базальтам.

Шлаковые и шлако-лавовые конусы Дола достигают высоты 300 м, диаметра оснований около 1000 м. В зависимости от возраста конусов, состава и окисленности их отложений, плотность сложения материала их построек различна. Например, собственные отложения одного из конусов Песчаных

горок, возраст которых оценивается в 1000-1500 лет [17], значительно окислены, по гранулометрическому составу относятся к гравийным. Плотность пород на его склоне варьирует от 0.80 до 1.09 г/см³, составляя в среднем 0.94 г/см³ (5 определений); пористость, соответственно, от 62 до 72 %, в среднем - 67 % (5). Фрагменты древних конусов, залитых лавами и засыпанных пирокластикой последующих извержений, представляют собой своеобразные "панцири", корки, сформированные зрелыми агглютинатами.

Обширные шлако-пепловые равнины с участками древних и современных лавовых потоков преобладают на площади Дола. В настоящее время поверхность большей части равнин покрыта пирокластическими отложениями Большого трещинного Толбачинского извержения 1975-1976 гг. (БТТИ). Физические и физико-механические свойства шлаков этого извержения описаны в работе [27]. Здесь мы остановимся на свойствах пеплов этого покрова, так как они обладают большим сходством с реголитом Луны. Напомним, что на Северном прорыве (БТТИ) на поверхность поступали, в основном, магнезиальные базальты, на Южном - глиноземистые [25]

Вулканические пеплы состоят из изометричных остроугольных, высокопористых, но без крупной открытой пористости частиц, углы которых нередко оплавлены. По гранулометрическому составу пеплы Северного прорыва БТТИ в радиусе 6 км от конусов относятся к пескам крупным, Южного - к пескам средней крупности. Влажность пеплов Северного и Южного прорывов почти одинакова - 11-17 и 8-14 %, соответственно. Плотность твердой фазы частиц для первых равна 2.96- 3.01 г/см³, для вторых - 2.54-2,58 г/см³. В связи с изометричной формой частиц и преобладающим их размером менее 0,5 мм, пеплы имеют довольно высокую плотность грунта в естественном сложении - 0.91-1.28 г/см³ для Северного и 1.31-1.72 г/см³ для Южного прорыва. Увеличение содержания в пеплах Южного прорыва тонких частиц ведет к увеличению плотности грунта почти в три раза по сравнению со шлаками, для которых эта плотность равна 0.55-0.58 г/см³ [27].

Пористость пеплов ниже, чем шлаков: 63-72 % на Северном и 41-53 % на Южном прорывах, что связано с более плотным сложением пеплов и меньшей открытой пористостью их частиц. Плотность сложения, структура частиц пеплов также оказывают главное влияние на их деформационные и прочностные свойства. Модуль общей деформации пеплов Северного прорыва 6.8-7.2 МПа и 10.0 МПа на Южном. Прочностные характеристики пеплов зависят, в основном, от их плотности сложения, сцепление-зацепления играет для них второстепенную роль - $C = 0-0.03$ МПа и $\varphi = 19-38$ град. для пеплов Северного прорыва и $C = 0-0.04$ МПа и $\varphi = 20-38$ град. для Южного.

При обработке панорам, снятых "Луной-9" и "Луной-13", было рассчитано распределение обломков, попавших в поле зрения телекамер, по крупности (табл. из работы [110]). Для сравнения с вышеприведенными данными на поверхности Толбачинского дола было обработано несколько участков древних лавовых потоков, засыпанных пирокластикой (кеккурников). Хотя на этих участках фрагменты лав в виде обломков, обелисков, борозд и т.д.

встречаются высотой до 2 м и шириной более 50 см, автор ограничился размером обломков 0-20см, как и на лунных участках (табл. 15). И пусть, в целом, распределение обломков на изученных площадках различное, есть среди них и похожие на лунные.

Таблица 15

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЛОМКОВ РАЗНОЙ КРУПНОСТИ
НА УЧАСТКАХ ЛУНЫ И ТОЛБАЧИНСКОГО ДОЛА [110]**

Участки	Размер обломков, см								Количество обломков на 1 м
	2-5	6-10	11-15	16-20					
	Количество		обломков		(единица, %)				
“Луна-9”	32	45	31	42	4	5	6	8	1,5
Участок 3	51	29	61	34	40	22	26	15	0,44
Участок 4	58	28	59	28	51	24	41	20	0,52
“Луна-13”	164	91	14	8	2	1	1	-	13
Участок 1 а	243	86	30	10	13	4	1	-	4,5
Участок 1 б	422	84	66	13	8	2	6	1	7,6

* Для участков Луны указывается аппарат, производивший съемку панорам.

Некоторые свойства пирокластических отложений Толбачинского дола приведены в табл. 12. Как видно из сравнения их с лунными, сходство довольно значительное по всем параметрам, исключая сцепление. Различия свойств пород Луны и Земли связаны, в основном вероятно, с планетарными особенностями - небольшой силой тяжести, отсутствием атмосферы, гидросферы на Луне и т.д.

Таким образом, фактически подтверждается правомерность использования вулканогенных отложений базальтового состава в качестве аналогов лунных.

Венера и земные аналоги ее пород. Венера по массе, объему и плотности очень похожа на Землю, но почти на этом сходство планет заканчивается. Отличия же многообразны - "обратное" вращение планеты по сравнению с другими, почти перпендикулярная ось вращения к орбитальной плоскости, отсутствие магнитного поля, атмосфера, состоящая на 96-97 % из углекислого газа; ее облака, представляющие собой аэрозоль серной кислоты; температура на поверхности планеты 480⁰ С и т.д.[66,67,80 и др.]

В целом, на поверхности планеты выделяются три основные геоморфологические провинции; горные области (+11- +2 км), занимающие 7

% поверхности планеты; холмистые равнины (+2- +0,4 км), 60 % поверхности; низменности (+0.4- -2.5 км) - 33 % поверхности [67,99]. Средний уровень поверхности Венеры: вычисленный по гипсографической кривой, составляет +430 м [99]. Горные области на Венере относятся к континентам, наибольшие из них - Земли Иштар, Афродиты, Область Беты и др. На поверхности планеты распространены кратеры глубиной до 400 м и диаметром до 150 км; гигантские овальные впадины - депрессии диаметром до 1 тыс. км, много тектонических структур - рифтовые зоны, каньоны, гряды, а также вулканические формы рельефа. На наличие активного вулканизма на планете указывают также гравитационные аномалии в районах Бета и Альфа. Многие возвышенности имеют в плане овальную форму и являются, возможно, щитовыми вулканами. Вся область Беты, предполагают, является огромным вулканом щитового типа, сложенным базальтами [67]. В области Альфа отмечаются семь правильных круговых куполовидных поднятий диаметром 25 км и высотой до 750 м, которые интерпретируются как "выжимки очень вязкой лавы на относительно ровную поверхность" [128] и весьма напоминают экструзивные куполы андезитовых вулканов Земли. Два из семи куполов выглядят наиболее молодыми - на них четко видна ячеистая трещинноватость в центральной части купола и радиальная - по его периферии. На других куполах трещинноватость заметна значительно слабее или не выражена совсем, что связано, вероятно, с возрастом куполов и различной интенсивностью процессов выветривания. В целом, основная часть равнин относится, по-видимому, к вулканическим.

В районах посадки аппаратов "Венера" наблюдался грунт двух типов; а) реголит, вероятно гравелистого типа со значительным количеством каменных гряд, консолидированных пород, отдельных камней размером до 20-70 см и их скоплений; б) каменные образования с выраженной слоистостью, пересеченные трещинами, слагающие горизонтальные равнины, с незначительным количеством реголита и мелких обломков [67, 90].

По данным В.С.Авдеевского и др. [67] плотность реголита и каменных образований равна 1.4-1.5 г/см³ и 1.15-1.20 г/см³, соответственно. По данным А.Л.Кемурджиана и др. несущая способность реголита лежит в пределах 0.26-1.0 МПа, а твердых пород - 6.5-25 МПа [90]. Хотя все эти данные вызывают сомнения, Л.В.Ксанфомалити отмечает, что данные А.Л.Кемурджиана и др. для реголита более надежны, чем для твердых пород [67]. При отсутствии других, эти данные, в целом, могут служить ориентиром в свойствах грунтов Венеры.

При изучении отложений Венеры было обнаружено аномально низкое их электрическое сопротивление - около 100 Ом м [90] по сравнению с земными базальтами при температурах, близких к таковым Венеры. Петтенджил и др. сообщили также о высокой электропроводности грунтов в горных районах Венеры (аппарат "Пионер-Венера") и предположили наличие в их составе до 20 % пирита [67].

Непосредственный анализ состава пород поверхности Венеры (равнина Навки Области Феба) указал на базальты [67]. На участках обилия обломков пород грунты близки калиевым щелочным базальтам земной коры, плотные

породы тяготеют к толеитовым базальтам, породы приэкваториальных областей - к оливиновым габброноритам [67]. Базальты, как и на Земле, на Венере преобладают.

Основным процессом, преобразующим грунты планеты, является, вероятно, химическое выветривание в результате термохимических реакций между поверхностью и атмосферой. Это, в какой-то мере, подтверждается тем, что на Венере обнаружена богатая калием, ураном и торием порода, которая на Земле соответствует составу не первичных вулканических пород, а претерпевших экзогенную переработку [66].

Исходя из вышесказанного, предполагается использовать в качестве аналогов грунтов Венеры породы площадок постмагматического преобразования пирокластики вулкана Толбачик.

На фумарольных полях шлаковых конусов Северного прорыва и на лавовых потоках Южного прорыва БГТИ 1975-1976 гг. до сих пор достаточно интенсивно идут процессы пневматолитового метасоматоза пород при температурах 20-200 С⁰ у поверхности и более 500 С⁰ на глубине, в результате которых идет активное изменение шлаков и пеплов базальтового состава и превращения их, в конечном итоге, в кремнистую пористую массу [86, 105]. В процессе преобразования пород происходят следующие явления; образование агглютинатов, широкое развитие процессов заполнения пор частиц шлаков и пеплов новообразованиями - возгонами и рудными минералами; в результате постепенного разрушения острых краев шлаков под влиянием вулканических газов, частицы их, оставаясь практически на месте, приобретают вид окатанных; между частицами шлаков и пеплов появляются новые виды связей физико-химической природы и т.д. [27]

По степени преобразования шлаков на фумарольных полях выделяются; 1/ агглютинаты - плотные корки спеченных шлаков мощностью до 0.2-0.3 м; рыхлые шлаки: 2/ сильноизмененные - полностью перерожденные шлаки красных, оранжевых, зеленоватых, желтых, голубоватых, белесых окрасок частиц; 3/ слабоизмененные - окисленные, имеющие лишь корочки новообразований с поверхности; 4/ среднеизмененные - промежуточные между второй и третьей группами [27].

Агглютинаты, возможно, могут послужить аналогами плотных пород, слагающих горизонтальные участки Венеры; измененные рыхлые шлаки - аналогами ее реголита.

Рыхлые измененные шлаки Северного прорыва вулкана Толбачик по гранулометрическому составу относятся к дресвяным грунтам с преобладанием частиц размером крупнее 3 мм.

В связи с перерождением шлаков, заполнением их пор новообразованиями, все измененные шлаки по сравнению с неизмененными имеют большую плотность отложений и меньшую пористость. Чем более изменены шлаки, чем больше их плотность сложения и меньше пористость (табл. 16, рис. 37). Структурно-текстурные особенности шлаков влияют на их деформационные и прочностные характеристики. Менее преобразованные

шлаки имеют более рыхлое сложение, незначительную псевдоокатанность частиц, поэтому и меньший модуль общей деформации по сравнению с сильноизмененными. Чем сильнее изменены шлаки, тем выше их сцепление, которое в данном случае складывается из сцеплений механической и физической природы. Прочность на разрыв агглютинатов варьирует от 0.08 до 12.0 МПа, составляя в среднем 3.0 МПа.

Таблица 16

**ФИЗИЧЕСКИЕ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
ИЗМЕНЕННЫХ ШЛАКОВ СЕВЕРНОГО ПРОРЫВА БТТИ 1975-1976 ГГ.**

Названия характеристик	Агглютинаты	Сильно-измененные шлаки	Средне-измененные шлаки	Слабо-измененные шлаки
Плотность скелета грунта, г/см ³	1,32(3) 1,28-1,37	1,24(3) 1,20-1,27	0,94(2) 0,91-0,98	0,78
Коэффициент пористости, единица	1,25(3) 0,91-1,18	1,46(3) 1,36-1,59	1,92(2) 1,70-2,15	2,54
Пористость, %	51(3) 48-54	59(3) 58-61	65(2) 63-68	72
Сцепление, Мпа	----	0,12(3) 0,05-0,19	0,10	0,06
Угол внутреннего трения, градус	-----	32(3) 32-33	42	37
Модуль общей деформации, МПа	-----	6,3(3) 5,6-7,0	6,0	4,5

Примечание. В числителе - среднее значение, в знаменателе - минимальное и максимальное. В скобках - количество образцов.

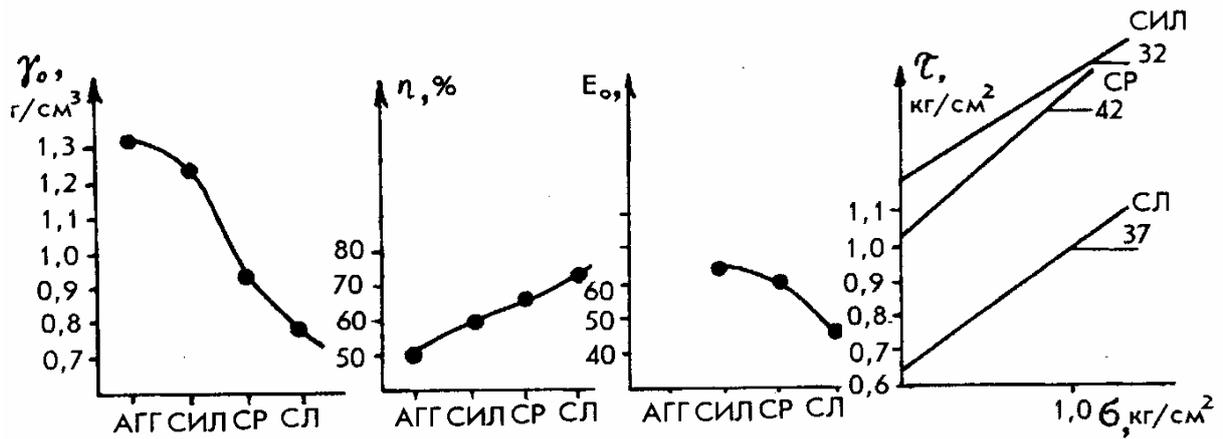


Рис. 37. Физические и физико-механические свойства измененных шлаков Северного прорыва БТТИ 1975-1976 гг.: АГГ- агглютинаты, СИЛ, СР, СЛ – соответственно, сильно-, средне- и слабоизмененные шлаки.

Если на конусах Северного прорыва вулкана Толбачик процессы постмагматического преобразования пород продолжают, на конусах Песчаных горок этого вулкана такие процессы уже закончились (извержение их происходило 1000-1500 лет назад [17]). Характерно, что шлаки здесь имеют такие же степени преобразования: агглютинаты, сильно-, средне-, слабоизмененные рыхлые породы. Автор ограничится кратким изложением некоторых их свойств в целом. Плотность однородноизмененных желтых шлаков и пеплов на глубине 30 см равна 1.32 г/см^3 , неоднородноизмененных - до красных, синих, желтых окрасок частиц - на глубине 40 см - 1.11 г/см^3 . Пористость измененных шлаков в среднем равна 52 %, модуль общей деформации - 9.0 МПа, сцепление - 0.03-0.13 МПа и угол внутреннего трения - 28-40 град. Плотность агглютинатов Песчаных горок составляет $1.31-1.42 \text{ г/см}^3$, пористость - 50-54 %. Прочность агглютинатов невысокая, так как сотни лет они подвергались процессам физического и физико-химического выветривания, и составляет на разрыв 1.0-2.0 МПа.

Как видно из сравнения, свойства современных и древних шлаков, преобразованных в результате постмагматических процессов, довольно одинаковы. Меньшая пористость шлаков Песчаных горок связана с длительными процессами преобразования их частиц; уменьшение прочностных свойств пород (сцепления для рыхлых шлаков и прочности на разрыв для агглютинатов) связано с древностью их образования и воздействием на них процессов выветривания многие сотни лет. Плотность рыхлых шлаков и твердых пород (агглютинатов) конусов Толбачинского дола и измеренных грунтов Венеры также сопоставимы. Исходя из вышесказанного, представляется возможным использование пород Земли, преобразованных в результате постмагматических процессов, в качестве грунтов-аналогов Венеры.

Породы Марса и их земные аналоги. Планета, несколько меньшая по размеру чем Земля, издавна привлекала ученых. Многие поколения людей возлагали надежды на то, что именно на Марсе существует жизнь, находятся

разумные существа. Космическая эра позволила ответить на многие вопросы изучения Марса. И хотя человек пока еще не ступил на эту планету, сегодня существуют подробные ее карты, множество фотографий поверхности, известен состав атмосферы и некоторые характеристики поверхностных отложений и т.д. В ближайшее время планируется доставить на планету марсоход, а на Землю - марсианский грунт.

Средний уровень поверхности Марса, вычисленный на основе гипсографической кривой, составляет 2100 м [99]. Западное полушарие несколько выше, чем восточное: средняя высота западного полушария 2,2 км, восточного - 1,8 км относительно среднего уровня планеты. Для Марса характерно полимодальное распределение высотных уровней. Наибольшую площадь планеты - 22.34 %- занимают уровни высот в +3- +4 км относительно ее среднего уровня, наименьшую - 0.02 % - уровни высот в +14 - +13 км.

По генетическим признакам на планете выделены поверхностные образования: ударные, связанные с падением метеоритов; мерзлотные - хаотические местности, оползни в бортах каньонов Долин Маринер, слоистые полярные толщи и т.д.; флювиальные - долинные отложения, сходные с земными, возникающими в результате катастрофического стока больших масс воды; тектонические; вулканические и эоловые [80].

На Марсе отсутствуют кратеры менее нескольких десятков метров, что объясняется большой активностью эрозионных процессов на поверхности и торможением мелких метеоритов атмосферой. Плоские днища крупных кратеров часто являются ловушками для эоловых отложений.

Элементы ударной тектоники образуют систему трещиноватости, которая проявляется на поверхности в виде полигональных контуров валов кратеров диаметром более 20 км и наследуется системами пересекающихся гряд, образованных в результате последующего интрузивного вулканизма по разломам ударной природы [66,80].

На Марсе наблюдаются крупномасштабные проявления эндогенной тектоники, что значительно сближает его с Землей. Это выражается в асимметрии между северным и южным полушариями, в формировании обширных сводовых поднятий типа Фарсида и Элизий. В этих областях отмечаются гигантские грабены и разломы общей протяженностью до 1000 км, гряды и линеаменты, каньоны долин Маринер длиной 5000 км, шириной 100 км и глубиной 5 км; провальные депрессии и связанные с ними крупнейшие долины.

Для Марса характерны крупные вулканические сооружения типа щитовых вулканов, вулканических куполов и провальных кальдер, развит площадной вулканизм. Марсианские вулканические сооружения в основном приурочены к районам Фарсида, Элизий, Эллада. В области Фарсида находятся четыре грандиозных щитовых вулкана - Олимп, Арсия, Павлина и Аскрийская гора. В целом, вулканы имеют следующее строение: собственно вулканический щит, провальная депрессия на вершине, дугообразные грабены, кратерные цепочки вокруг кальдеры. Морфология лавовых потоков вулканов указывает

на низкие значения вязкости лав, что характерно для лав основного состава. Широко распространены на Марсе вулканические куполы - крутосклонные сооружения высотой до 8 км, осложненные на вершине многоярусными депрессиями.

Результатом площадного распространения вулканизма Марса явилось образование вулканических равнин, многие из которых находятся в районах, поднимающихся на 4-6 км над окружающей местностью. Их возраст оценивается в 0.3- 4 млрд. лет [80].

Эоловая деятельность на планете выразилась в формировании многочисленных дюн размером от сотен метров до 10 км, эоловых покровов, приуроченных к днищам крупных кратеров и каньонов, к равнинам; и эолово-гляциальных образований вокруг северной полярной шапки. На Марсе обнаружены также обширные области покровных отложений эоловой природы, чехлом покрывающие более древние кратерированные и вулканические местности и нивелирующие их расчлененный рельеф. Мощность эоловых отложений колеблется от нескольких метров в экваториальных районах до сотен метров в средних и полярных широтах.

Подробно о морфологических типах образований Марса можно познакомиться в работах [66, 80, 90 и др.].

В целом, считается, что выходы скальных пород занимают не более 10 % поверхности планеты. Мощность реголита, чехлом покрывающего большую ее часть, колеблется от нескольких метров до сотен метров и первых километров. В масштабе нескольких десятков километров по площади марсианский реголит с поверхности довольно однороден, средний размер его частиц оценивается в интервале 0.1 -5.0 мм, но есть и более тонкий материал. Формально реголит относится к гравелистым пескам (по СНиП 11- 15- 74), так как частиц крупнее 2 мм содержится в нем более 25 % [42].

Материал темных областей Марса в петрологическом и физическом аспектах по составу находится ближе к основным породам, вероятно к базальтам. Спектры светлого материала Марса аналогичны спектрам смесей, состоящих из гетита, гематита и глин монтмориллонитового состава. Возможно, что светлый материал является типичным продуктом выветривания коренных пород Марса. Наилучшее приближение к марсианскому грунту дает смесь богатых железом глин, характерных для процессов земного выветривания основных изверженных пород. Химический состав реголита равнин Хриса и Утопии ("Викинг-1,-2") сходен, он относится к породам основного состава или продуктам их изменения. Присутствие больших количеств кислого и щелочного материала исключается [80].

Предполагают, что основная масса тонкозернистого материала на поверхности Марса - продукты химического выветривания коренных пород, которое связано, возможно, с несколькими причинами: химическим выветриванием грунта в результате взаимодействия его с современной атмосферой, выветриванием отложений при гидротермальной деятельности.

Значения плотности сложения и диэлектрической проницаемости в целом для грунта планеты получены инфракрасными, радиолокационными и поляриметрическими методами, которые хорошо согласуются между собой. Плотность реголита планеты, оцененная по тепловой инерции, составляет $1,2 - 0,2 \text{ г/см}^3$, по данным радиолокации - $1,7 \text{ г/см}^3$. Существуют вариации плотности реголита по долготе в диапазоне $0,2 - 2,5 \text{ г/см}^3$ при среднем значении $1,4 - 1,5 \text{ г/см}^3$ [80].

Достаточно беглого взгляда на фотографии поверхности Марса, сделанные "Викингами" (США), и современных образований вулкана Безымянный, чтобы отметить удивительное сходство отснятых поверхностей. Хотя вулкан Безымянный - типичный представитель андезитового вулканизма, внешнее сходство его отложений с марсианскими дает возможность использовать их в качестве аналогов образований Марса. В Долине потоков вулкана Безымянный можно наблюдать поверхности, сложенные собственно пирокластическими потоками - хаотически расположенными разноразмерными обломками лав андезита (от нескольких сантиметров до 2-3, редко 6-7 м) и песчано-пепловым заполнителем; золовыми отложениями в руслах сухих ручьев и мульдах между валами пирокластических потоков; алевропелитовым материалом мощностью 3-5 см на плоских участках русел временных водотоков Долины и т.д. Временные водотоки у бортов Долины, ручьи, протекающие через пирокластические образования современных и древних извержений вулкана, своим строением очень похожи на каньоны Марса, конечно, в значительно уменьшенном масштабе. Благодаря большому содержанию пылеватых по размерности фракций в отложениях потоков, ручьи, промывающие эти отложения, имеют преимущественно крутые, вертикальные, порой с отрицательным уклоном стенки. Глубина русел Долины - от первых десятков сантиметров до 10-15 м, их борта порой террасированы, порой имеют осыпи и вывалы глыб. Осыпи Маринер связывают с развитием на Марсе мерзлотных процессов [80]. Хотя мерзлота в районе Долины потоков также наблюдается, например, в обнажении южного борта Долины, основной причиной осыпей в ручьях является сила тяжести, которая неумолимо действует на обломки и глыбы бортов, активно подвергающихся водной и ветровой эрозии.

В целом, поверхность Долины потоков вулкана Безымянный сложена хаотически распределенными обломками лав андезита размером до 5-7 м, погруженными в пылевато-песчаный заполнитель потоков, состоящий из мелких обломков андезита и породообразующих минералов. В пределах Долины количество крупных обломков на поверхности составляет 45-55 %, а на 1 м - 1,5 обломка; размером 0,5 - 5,0 м - 8-10 %; 0,05 - 0,49 м -- 35-45 %, остальное приходится на долю пылевато-песчаной массы пирокластики (заполнителей пирокластических потоков и волн, пеплов). Несколько далее выхода из Долины доля пылевато-песчаной массы увеличивается до 60-70 % (0,5 обломка на 1 м), а содержание глыб разного размера распределяется примерно так: размером 0,5-5,0 м - 5-7 %; 0,05-0,49 м -- 25-30 %, при общем

преобладании обломков размером 0.3-0.5 м. Гранулометрический состав песчано-пылеватой пирокластики варьирует от песков тонких до песков средней крупности и гравелистых с медианными диаметрами от 0.01 мм (пеплы) до 0.37 мм (заполнители пирокластических потоков).

Плотность пирокластики Долины в ее естественном залегании варьирует в пределах от 1.43 до 1.88 г/см³ (40 определений). Плотность твердой фазы меняется от 2.46 до 2.72 г/см³ (32), пористость - от 33 до 67 % (12).

Прочностные характеристики пирокластики близки стандартным их значениям для обыкновенных песков, но иногда значительно от них отличаются. Так, например, сцепления двух образцов заполнителя потока имеют значения 0.005 и 0.064 МПа и угол внутреннего трения 30 и 22 град., соответственно. В данном случае повышение сцепления заполнителя потока связано с увеличением в нем в 2.5 раза по сравнению с другим доли частиц диаметром менее 0.056 мм.

По облику пород и подобию поверхностей Долина потоков Безымянного является прекрасным аналогом марсианских поверхностей. По химическому составу отложения Марса не похожи на современные изверженные образования Земли, хотя, с другой стороны - две точки опробования не могут отразить все многообразие пород Марса, которое, вероятно, существует.

Известные породы Марса менее кислые, чем продукты вулкана Безымянный - содержание кремнезема в них 44 + 5.3 и 56,3 + 0.2 соответственно [80]. По свойствам отложения Марса довольно близки породам вулкана Безымянный. По гранулометрическому составу реголит Марса в среднем относится к пескам гравелистым [80], но содержание тонкого материала в нем меняется в широких пределах - вероятно, от песков пылеватых до гравелистых; то есть грунты двух планет, вероятно, аналогичны. Плотность реголита Марса варьирует от 1.0 до 1.6 г/см³, вулкана Безымянный - 1.38 - 1.88 г/см³. Прочностные характеристики заполнителей двух планет также похожи; сцепление их мало, угол внутреннего трения - 25-45 град. - лежит в обычных пределах для песчано-гравелистых грунтов. Повышение сцепления пород связано с обилием пылеватого материала, возможно, с некоторой цементацией пород в связи с их минерализацией и т.д., повышение угла внутреннего трения - с высокой окатанностью частиц реголита благодаря интенсивным эоловым процессам.

Таким образом, автор полагает, что использование пирокластических отложений вулкана Безымянный в качестве грунтов-аналогов планеты Марс вполне допустимо.