ВСЕРОССИЙСКИЙ КОНКУРС НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ТВОРЧЕСКИХ РАБОТ МОЛОДЁЖИ

«МЕНЯ ОЦЕНЯТ В XXI ВЕКЕ»

Направление: Космонавтика

Тема: Концептуальные основы первичной терраформации Марса с учетом развития современных технологий

Соискатель: студент 3 курса Архипов Данило Евгеньевич

Научный руководитель: преподаватель, к.т.н. Лукина Анаит Арутюновна

Место выполнения работы: Московская область, г. Люберцы, ГБПОУ МО «Люберецкий техникум имени Героя Советского Союза, летчика-космонавта Ю.А. Гагарина»

2026

Оглавление

Введение ... 3
1. Вводные характеристики Марса в рамках терраформинга ... 5
1.1. Геология лавовых труб ... 5
1.2. Атмосфера ... 5
2. Основные условия для поддержания закрытой экосистемы ... 7
2.1. Метод создания первичной экосистемы ... 8
3. Существующие технологии и испытанные концепты в контексте терраформации ... 9
3.1. Генерация кислорода ... 9
3.2. Влажность ... 10
3.3. Доступность солнечного света ... 11
4. Флора и фауна в экосистеме ... 12
4.1. Фауна ... 12
4.2. Флора и симбиотические организмы ... 12
Заключение ... 20
Список литературы и использованных источников ... 21

Введение

В рамках космической деятельности, вопрос терраформинга долгое время оставался предметом научно-фантастических произведений мировой литературы. Однако ныне с ростом уровня технологического развития и совместной реализации частного и государственного капитала в расширении научных исследований и разработок новых технологий, человечеству гораздо более, чем когда либо, открылась возможность непосредственного исследования и возведения различных сооружений на поверхности других тел солнечной системы, в частности Марса. Это же в свою очередь открыло дорогу различным концептуальным исследованиям, по теме терраформинга в том числе.

Также важно упомянуть о значительном прогрессе в области колонизации и проектировании станций, поселений. Например, развитие концепции использования лавовых туннелей, что по оценочным представлениям исследователей, достаточно вероятно имеют комфортные и стабильные условия для пребывания человека в рамках долгосрочных миссий.

В рамках же данной статьи рассмотрен предел возможной терраформации в закрытой контролируемой среде с учётом текущих технологий или отработанных тестовых образцов. Где в роли данных систем будут выступать ранее упомянутые лавовые трубы.

Актуальность исследования обеспечивается преимущественно тем, что мы рассматриваем весьма сложную концептуально и технологически отрасль - терраформинг, через призму постановления первичных контролируемых экспериментов с использованием уже существующих технических средств или отработанных проектов.

Объект исследования: лавовые трубки Марса.

Предмет исследования: экспериментальный терраформинг лавовых труб с установлением основных факторов для реализации возможности пребывания в них человека.

Цель исследования: проанализировать современный технологический потенциал, устойчивую флору, выяснить, возможно ли осуществление терраформации в полной или частичной форме внутри замкнутой системы. Установить набор подходящих методов терраформации внутри закрытой системы.

Задачи исследования:

1. Изучить современные научные исследования, публикации и литературу. А также пресс релизы и технические отчёты исследовательских отделов космических агентств, на предмет Марсианской геологии, климат и In-situ технологий.
2. Изучить ареалогическую литературу и публикации для конкретизации в рамках данного исследования условий на Марсе.
3. Описать концептуальные основы терраформинга внутри закрытой системы.
4. Рассмотреть существующих технологий и успешно испытанных тестовых образцов в контексте использования их в рамках ограниченного терраформинга.
5. Проанализировать возможности и релевантности транспортировки животной жизни в закрытую экосистему
6. Изучить ботанических и микологических справочников, интерактивных карт ареалов обитания, для выявления потенциально пригодных для участия в экосистеме растений и симбиотических форм жизни.

7. Сделать заключение о перспективах и возможностях построения ограниченного терраформинга в закрытой системе с учётом технологического развития на текущий момент времени.

1. Вводные характеристики Марса в рамках терраформинга

Существует ряд факторов наиболее важных для построения стабильной закрытой терраформации. Один из ключевых - это геологический состав пород лавовых туннелей и строение последних. Данные критерии в рамках исследования являются фундаментальными, так как из них вытекают остальные, такие как, радиоустойчивость, способность удерживать тепло и газовый состав внутри туннелей, а также прочностные характеристики необходимые при проектировании различных структур и сооружений. Так-же не менее важными являются атмосферные и геологические условия, так как они определяют степень необходимого технического вмешательства, при создании и поддержании закрытой экосистемы.

1.1. Геология лавовых труб

Лавовые трубы (лавовые туннели, пиропродукт) — вулканические структуры, образованные потоком магмы под остывшей поверхностной коркой, который в конечном итоге стекает и оставляет после себя полое пространство. [1]. Научное сообщество, а также национальные космические агенства различных стран, в частности Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства (НАСА) издавна проявляли особый интерес к этой области ввиду наличия широкого спектра вулканических структур, происхождение которых могло бы дать важные сведения о неземной геологии и вулканических процессах, а так-же послужить плацдармом для развёртывания долговременных сооружений для пребывания человека.

Помимо определения, Кемпе, охарактеризовал различные типы пируктных систем, описал множество генетических механизмов и выделил связанные с ними вулканические особенности, такие как «небесные окна». Эти отверстия образуются при обрушении потолка первичной лавовой трубы, создавая соединение между внутренней частью пещеры и поверхностью. Если лавовый поток на момент обрушения все еще активен и обломки уносятся расплавленной лавой. Многие из этих отверстий действуют как эффективные вторичные места формирования свода, позволяя газу выходить наружу и втягивая холодный воздух в систему.[1]

Марсианские базальты — это аналогичные земным остывшие вулканические породы, составляющие основную часть марсианской коры. Основное содержание марсианских базальтов приходиться на оливин и пироксен. По химическому составу они характеризуются высокими концентрациями железа и магния, содержанием кремнезема (SiO_2) от ~45 до 51 масс. %, низким общим содержанием щелочей ($Na_2O + K_2O \leq 3$ масс. %) и заметным снижением содержания оксида кальция (CaO) и оксида алюминия (Al_2O_3) по сравнению с земными породами.[2] Марсианские базальты пускай и имеют большую концентрацию железа и силикатов вроде железистого оливина, так же как и Земные базальты — имеют в своём составе приблизительно от 45-53% кремнезема. Это позволяет монолитным базальтам защищать колонистов или частичную экосистему как от проникновения внешней атмосферы планеты внутрь системы, так и от утечки сформированного воздушного слоя из неё.

1.2. Атмосфера

Состав атмосферы Марса является одним из наиболее отягощающих факторов препятсвующих свободному пребыванию человека, без защитных средств и в осуществлении

ограниченного терраформинга внутри закрытых систем на базе лавовых туннелей. Марсианская атмосфера состоит преимущественно из углекислого газа, составляющего ~95,35% от всей плотности.

Таблица 1.1

Состав атмосферы Марса

Углекислый газ	~95%
Азот	~2.8%
Аргон	~2%
Кислород	~0.174%
Монооксид углерода	~0.0747%
Водяной пар	~0.1-0.3% (вариативно)

Атмосфера разряжена и имеет крайне малую плотность. Давление создаваемое Марсианской атмосферой составляет всего 61 Паскаль, что в сотню раз ниже земного значения. [3]

От влажности как характеристики, зависит возможность длительного поддержания флоры, а в дальнейшем и фауны. Атмосфера Марса не позволяет удерживать большое количество влаги, по данным установленным спектрометром SPICAM, в рамкам миссии ESA “Mars-Express” в атмосфере водяной пар лежит в диапазонах не более 0.1-0.3% от общего её состава. [4]

Это порождает необходимость механического создания и регуляции влаги в закрытых системах.

2. Основные условия для поддержания закрытой экосистемы

Герметичность. Описывая частичный терраформинг внутри закрытой системы, в особенности в условиях во многом агрессивной среды Марса, герметичность является, если не фундаментальным, то в действительности ключевым фактором. Как ранее описывалось, состав и структура марсианских базальтов, позволяет защищать колонистов или частичную экосистему как от проникновения внешней атмосферы планеты внутрь системы, так и от утечки сформированного воздушного слоя из неё. Однако есть проблемы, которые важно учитывать, при осуществлении частичного терраформинга внутри лавовых труб: Сами трубы, как ранее описывалось, обладают, как единичными, так и множественными провалами — служащими выходами на поверхность. Их необходимо изолировать, создавая гермошлюзы в местах где требуется выход и возводя перегородки по протяжённости лавового туннеля, где использования огромного пространства не требуется. Другой проблемой являются естественные дефекты породы, пористость, микротрещины и прочие характеристики, сказываются на герметичности системы, требуя нанесения специализированных герметичных покрытий или спекания внутренней поверхности туннеля или его секции. Однако даже это не избавляет от третьей проблемы — Так как марсианские породы перенасыщены железом, длительное поддержание воздушной среды, может вызвать неминуемое окисление железа в породах, что в свою очередь повлечёт разрушения и нарушение герметичности.

Радиационная защита. Пускай поверхностный слой марса подвержен наведённой радиоактивности в результате ионизирующего влияния космического излучения и солнечной радиации, ввиду отсутствия глобального магнитного поля и плотной атмосферы, однако исходя из исследований, сами лавовые туннели имеют достаточную глубину и толщину стенок, чтобы противостоять данным негативным факторам.[5]

Это во многом и стало ключевым фактором, почему лавовые трубки рассматриваются как наиболее релевантный вариант локации для размещения станций в длительных космических миссиях с участием человека.

Стабильность температуры. Как ранее описывалось, лавовые трубы состоят в основном из базальтов, в подавляющей массе обладающих высокой плотностью и теплоёмкостью. Объёмные массивы пород крайне медленно нагреваются, но также медленно и остывают. Условия замкнутости и сильного ограничения движений газа, в виде составляющих марсианской атмосферы так-же способствует сохранению температуры. К тому же, так же как и на Земле, увеличение глубины аналогичным образом влияет на стабильность температурных колебаний, сводя их к удовлетворительному минимуму. Средняя температура внутри лавовой трубы находится в диапазоне от -20º С до -35° С.

Освещённость. Характеристика непосредственно влияющая, как на физическое и душевное состояние экипажа, так и на потенциал выживаемости любой сложной жизни. Существенно удаление от Солнца, уменьшает уровень доступного света на планете до диапазона от 20000 до 40000 люкс днём в ясную погоду.[6]

Для сравнения при таких же условиях на Земле, максимальный уровень освещённости составляет в районе 100000 люкс.[7]

В свою очередь любые погодные явления Марса, вроде пылевых бурь, а также естественные суточные циклы, будут уменьшать суммарную доступность солнечного света. Это побуждает избирать растительность и представителей фауны, если таковые будут рассматриваться, наиболее

устойчивых к низкой освещённости. Или добывать дополнительный свет техническими средствами.

2.1. Метод создания первичной экосистемы

Как можно выяснить из ранее описанного материала, условия Марса являются довольно суровыми, как для осуществления полноценного терраформинга, так и для создания закрытой или же секционной экосистемы внутри лавовых туннелей, без активного применения технических средств. О последних, далее и пойдёт речь. Вопрос о создании удовлетворительных условий, для колонистов является базовым, при проектировании миссий и планов по созданию различных сооружений для длительного пребывания человека и соответственно порождает необходимость в создании новых устройств и технологий, для оных целей. Наиболее практичным методом создания закрытой экосистемы, с точки зрения безопасности и ресурсозатрат, является разделение лавовых труб на секции, по их протяжённости. Это позволяет контролируемо распределять ресурсы и технические средства, а также наблюдать за поведением системы, без угрозы вмешательства оной в работу станций. В рамках главы будут рассмотрены данные технологии в контексте частичного терраформинга внутри закрытой системы.

3. Существующие технологии и испытанные концепты в контексте терраформации

Терраформация как таковая налагает на себя использование различных технических средств, методик и концептов для своей реализации. Ключевым преимуществом в рамках данной статьи является куда меньший, по сравнению со всей планетой, масштаб. Однако в то же время достаточно большой, чтобы считать технические средства, испытанные в лавовых трубах, эффективными при полноценной терраформации.

В данной главе будут рассмотрены именно такие средства в контексте уже существующих технологий, что непосредственно предназначены для воссоздания подходящего микроклимата в марсианских условиях или легко адаптируемы под данные условия.

3.1. Генерация кислорода

Одним из успешных и самых показательных технологий по генерации кислорода, является эксперимент NASA по линии использования местных ресурсов (ISRU) – MOXIE (Mars Oxygen In-Situ Resourse Utilization Experiment). Данный эксперимент, на текущий момент уже завершён и показал положительные результаты. Установленная на марсоход Perseverance установка являлась технологическим демонстратором для проверки возможности выработки кислорода из атмосферы Марса методом твердооксидного электролиза. [8]

Технические характеристики аппарата при этом следующие: общая масса прибора составляет 17,1 кг, при размерах 23,9×23,9×30,9 см. Энергопотребление — 300 Вт. Немало важной характеристикой прибора является работоспособностью при низком давлении от 2 до 12 мм ртутного столба, как раз таки характерного для марсианской атмосферы. [9]

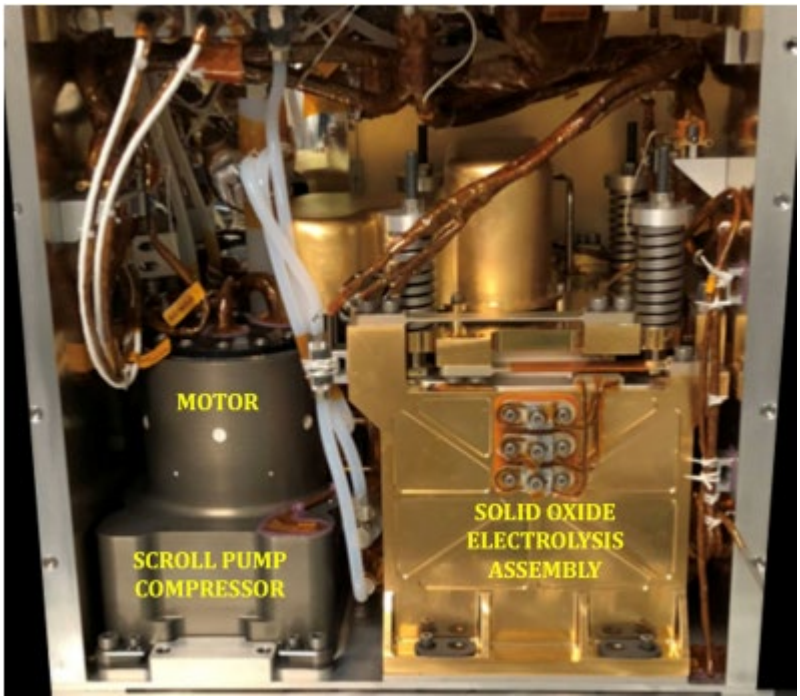


Рис.3.1 – MOXIE со снятой передней крышкой [9]

Производственный цикл установки начинается с работы воздушного компрессора спирального типа и противопылевых фильтров. Ключевая задача компрессора — многократно увеличивать давление всасываемого воздуха до земных значений и направлять его в блок

теплообменников. В них марсианский воздух нагревается до температуры порядка 800 °C, что необходимо для электролиза твёрдых оксидов. Затем электролизные ячейки с твёрдым оксидом циркония расщепляют углекислый газ, забирая из него один атом кислорода. Побочный продукт реакции в виде угарного газа выделяется обратно в атмосферу планеты. [9]

Такой производственный цикл, в купе с побочными продуктами электролиза, вынуждает располагать установки вне закрытых экосистем, с достаточным доступом к марсианскому воздуху.

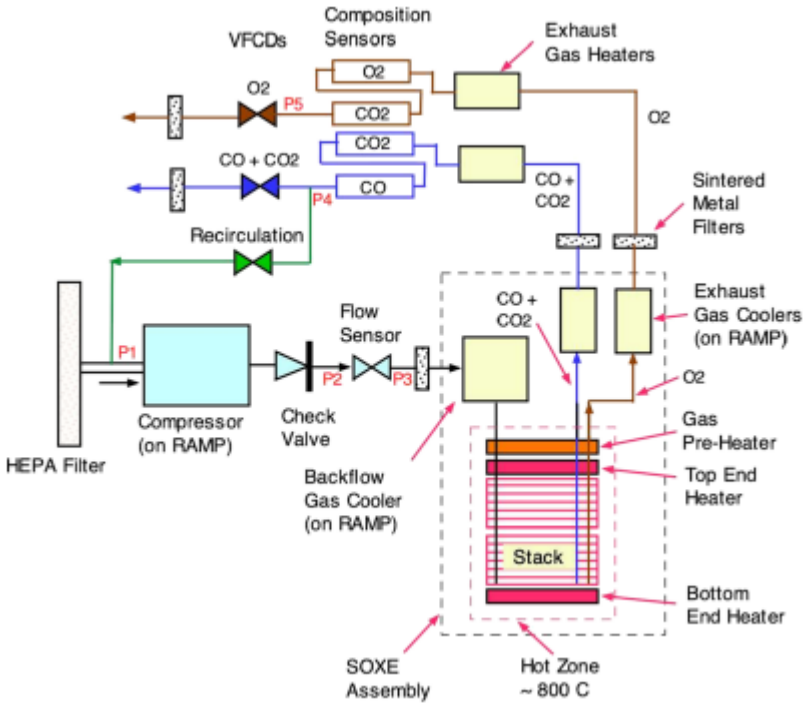


Рис. 3.2 – Схематическое изображение системы газораспределения MOXIE, показывающее сжатие, электролиз и терморегулирование потоков входящего, продуктового и отходящего газов [9]

MOXIE рассчитан на выработку 10 граммов кислорода в час, однако к маю 2023 года пиковые значения были до 12 граммов в час. На протяжении всего периода работы в 1083 минуты, установка показала стабильный рост производительности, без внештатных понижений выработки, что свидетельствует о долговечности MOXIE.

В дальнейшем ожидается создание полномасштабных версий, для обеспечения станции и выработки кислорода для ракетно-топливных окислителей.[9]

3.2. Влажность

Говоря о закрытых системах, вроде потенциальных станций проблема контроля влажности решается благодаря системам климат контроля аналогично подобным уже действующей системе на борту Международной Космической Станции. К тому же проблема контроля влажности на странциях, занимающих меньшее пространство нежели вмещает объём систем лавовых туннелей координально противоположная. Если на станциях ключевой проблемой является избыток влажности поступаемой через дыхание и потоотделение членов экипажа или колонистов, что решаемо осушителями с дальнейшим хранением, очисткой и обратным использованием сконденсированной влаги, то в лавовых трубах имеющих достаточно большие объёмы, даже с возможным распределения на блоки — естественных источников влаги, просто недостаточно для

поддержания сложной флоры, а в дальнейшем быть может и фауны. Появляется необходимость в разработке увлажнителей, на подобии промышленных на Земле. Для их работы, вероятно, будет использоваться лёд. А в обилии содержащийся во льду углекислый газ может быть использован для твердооксидного электролиза через MOXIE. Однако существует проблема, заключающаяся в принципе работы MOXIE через электролиз под воздействием высоких температур. Повышенная влажность может нарушить стабильную работу аппарата. Поэтому, как утверждалось ранее, MOXIE необходимо установить изолированно от негативных условий.

3.3. Доступность солнечного света

Ранее в главе 1.1. мы упоминали, что в ходе естественных процессов и стечения времени могут происходить обвалы лавовых труб. Не считая дорогостоящих в плане транспортировки и установки электрических систем, например ботанических ламп, данные провалы являются единственным источником солнечного света внутри лавовой трубы. В похожих местах на Земле не редко образуются свои экосистемы, порой с эндемическими видами. Однако в случае Марса, такие места пускай и обладают доступностью к солнечному свету, но так-же естественным образом являются большим источником утечки тепла и кислорода. На данную проблему мы предлагаем два варианта решения: первое — установка в месте провала надувного шлюза из прочного и прозрачного материала. Второе — создание на протяжении всего туннеля системы из отражателей, перенаправляющих естественный свет из провала в ранее упомянутые изолированные блоки. Однако стоит указать, что у этих методов, помимо плюсов в дешевизне, по сравнению с электрическими системами, есть и существенные минусы такие как: уменьшение суммарного освещения в виду физической проницаемости материалов. Необходимость регулярной очистки, что может быть осложнена. Также пускай пропал — это источник естественного света, он же в свою очередь может являться единственным ближайшим способом попасть в сам туннель. Увы, в таком случае найти компромисс не выйдет.

4. Флора и фауна в экосистеме

В вопросах, как терраформации, так и создания экосистем, флора и фауна являются центральными. Так как в любой системе, независимо от её масштаба, ключевые климатические и иные условия подстраиваются сугубо под потребности существования флоры и фауны. В данной главе мы несколько изменили данный подход в угоду релевантности и технической реализуемости терраформации. Так как терраформинг в данной статье имеет, скорее экспериментальный, пробный характер, нежели планетарный в исконном значении данного термина, мы подобрали организмы, наиболее устойчивые к негативным факторам, дабы снизить необходимое технологическое вмешательство в микроклимат лавовых туннелей, а, следовательно, уменьшить потенциальную стоимость и технологическую сложность.

4.1. Фауна

Создание полноценной экосистемы подразумевает под собой и наличие некоторой сложной фауны. Чисто с технической стороны, транспортировка живых существ не является в корне невозможной. Однако, она сопряжена с рядом проблем и сложностей, что делают её от части ресурсозатратной и с другой стороны довольно опасной, как для самих существ, так и для экипажа, а так-же систем станций и транспортировочных аппаратов. Связано это с тем, что при кардинальной смене условий и обстановки, довольно сложно предсказывать поведение животного, подверженного сильному стрессу. По аналогии, также сложно контролировать процессы питания и жизнедеятельности, что напрямую влечёт за собой биологическую опасность. Методы контроля, вроде помещения животных в узкие пространства, подключения к аппаратуре с применением седации, помимо того, что являются негуманными, также влекут за собой необратимые последствия для здоровья существ, ввиду длительности перелёта.

При ранее описанных факторах наиболее гуманными способами успешного перемещения, являются те способы, что подразумевают криогенику или искусственное взращивание существ непосредственно по месту назначения. Оба метода в чистом виде доступны лишь некоторым видам существ. В остальных же случаях они находятся в фазе активных исследований. [10]

Таким образом, наиболее релевантным и безопасным образом, будет исключить участие различной фауны в первичных экспериментах по созданию закрытой экосистемы.

4.2. Флора и симбиотические организмы

Если о животной жизни говорить рано из-за сложности доставки и содержания в период подготовки операции, не считая вариантов с криогенной заморозкой эмбрионов находящихся на стадии активных исследований [10], то растительность и симбиотические организмы имеют право на первенство среди сложной многоклеточной жизни земного происхождения, помимо потенциальных колонистов. Как описывалось ранее в текущих условиях марса: особенно крайне низкой влажности и отсутствия ультрафиолетового излучения, вне проломов лавовых туннелей, выращивание растительности на площадях лавовых труб невозможно. На данный момент ещё не известно о сложных многоклеточных растениях способных выживать при влажности менее 10%, даже в самых засушливых регионах нашей планеты влажность около 20%, а растения накапливают влагу ночью. Таким образом, для выращивания и поддержания растительности необходимо искусственное воссоздание воздушной среды, а также источник влаги и ультрафиолета. Однако

сама базальтовая среда не препятствует росту растительности. Сходство марсианских и земных базальтов, достаточно велико, не смотря на высокое содержание железа в марсианских образцах. Земная флора в обилии обладает видами растений произрастающих на беспочвенных скалах и базальтовых отложениях. Это может значительно упростить адаптацию растений к условиям закрытой экосистемы.

Учитывая это, а так-же конкретные физические параметры Марса в целом и лавовых труб в частности, приведённые в данной статье ранее, мы провели парсинг посредством ИИ Агента, научных публикаций и справочников, а также вебресурсов строго научной и классификационной направленности, дабы выявить флору и симбиотические организмы способные выживать при следующих условиях: стабильная температура -35 ºС, устойчивость к пониженной освещённости менее 40000 люкс. И самое главное произрастание на абсолютно каменистых поверхностях. Такими организмами выявились, многочисленные мхи, кустарнички, лишайники и хвощевидные, а так-же некоторые другие классификации, что не попали в данное исследование.

Важно отметить, что в данной главе представители растительного мира рассмотрены отдельно друг от друга, на предмет наибольшей устойчивости и выживаемости, при наименьших ресурсозатратах — то есть минимально возможном техническом вмешательстве, при создании условий внутри замкнутой экосистемы. Вопрос о гарантированной совместимости представленных растений друг с другом в представленной форме, является предметом для отдельного исследования. Однако резонно также отметить, что пускай в действительности вопрос о совместимости растений в ходе исследования не рассматривался, однако большая часть организмов представленных далее имеют пересечение по ареалам обитания. Практически все представленные растения произрастают а Арктике и\или Антарктике, или произрастают повсеместно.

Мхи. Мхи, ввиду своей морфологической простоты и уникальных физиологических механизмов, наиболее адаптированная и устойчивая группа растений на планете, уступающая только имеющим симбиотическую природу лишайникам. В рамках данного исследования эта группа интересна в первую очередь огромной толерантностью к низким температурам, вплоть до -27 ºС. Пускай эти значения и являются большими нежели условия в лавовых трубах, однако учитывая специфику работы колонизационного оборудования и систем, а также методику создания экосистемы, описанных выше, этот недостаток компенсируется теплом, вырабатываемым в ходе работы оборудования. И главное преимущество — активное произрастание многих видов на каменистых средах. В природе мхи растения зависимые от влаги, однако часто встречаются пионерные виды обладающие высокой устойчивостью к негативным факторам, а также способностью к усиленному распространению в виду того, что споры некоторых мхов устойчивы даже к условиям длительной радиоактивности и вакуума. [11]. Одними из примечательных видов мхов являются: Sanionia Uncinata – группа из множества различных мхов, характерных обширным ареалам обитания, но в основном предпочитающие относительно сухие места, луга, камни, кора кустарников и деревьев. [12]. Ceratodon Purpureus – самые обычные мхи произрастающие в нейтральных или кислотных субстратах. Примечательны в рамках данной работы тем, что устойчивы к загрязнениям и вполне произрастают даже в городских условиях, не обладающих сильной питательностью. [13]

Таблица 4.1

Иные виды мхов, наиболее приспособленных к заданным условиям

Научное название	**Разделение**
Andreaea rupestris	Дикорастущий

Atrichum altecristatum	Дикорастущий
Arctoa glacialis	Дикорастущий
Bartramia ithyphylla	Дикорастущий
Brachythecium collinum	Дикорастующий
Bryum algovicum	Дикорастущий
Bryum alpinum	Дикорастущий
Calliergon cordifolium	Дикорастущий
Campylophyllopsis arctica	Дикорастущий
Cratoneuron filicinum	Дикорастущий
Cynodontium alpestre	Дикорастущий
Dicranella schreberiana	Дикорастущий
Dicranum scoparium	Дикорастущий
Didymodon vinealis	Дикорастущий
Drepanocladus arcticus	Дикорастущий
Funaria hygrometrica	Дикорастущий
Grimmia anomala	Дикорастущий
Grimmia elatior	Дикорастущий
Grimmia montana	Дикорастущий
Grimmia ovalis	Дикорастущий
Grimmia pulvinata	Дикорастующий
Hedwigia ciliata	Дикорастущий
Hygrohypnum bestii	Дикорастущий
Hypnum cupressiforme	Дикорастущий
Kiaeria starkei	Дикорастущий
Leptobryum pyriforme	Дикорастущий
Lescuraea incurvata	Дикорастущий
Meesia uliginosa	Дикорастущий
Meesia triquetra	Дикорастущий
Mnium arizonicum	Дикорастущий
Orthotrichum laevigatum	Дикорастущий
Paraleucobryum longifolium	Дикорастущий
Pleurozium schreberi	Дикорастущий / Культивируемый
Polytrichastrum alpinum	Дикорастущий
Polytrichum juniperinum	Дикорастущий

Racomitrium canescens	Дикорастущий
Rhizomnium magnifolium	Дикорастущий
Sanionia uncinata	Дикорастущий
Schistidium frigidum	Дикорастущий
Schistidium rupestre	Дикорастущий
Syntrichia lithophila	Дикорастущий
Syntrichia norvegica	Дикорастущий
Tortella arctica	Дикорастущий
Tortula mucronifolia	Дикорастущий
Warnstorfia exannulata	Дикорастущий

Лишайники. Лишайники в своём многообразии ещё одна культура способная выживать в суровых условиях. Будучи симбиотическим видом, сочетающим в себе гриб и от одного до нескольких видов фотосинтезирующих организмов, лишайники приобрели преимущества обеспечивающие сильную выживаемость. Одним из механизмов их выживаемости выявляется анабиоз — способность высыхать при неблагоприятных условиях замедляя свою биологическую активность до придельного минимума. И расцветать вновь когда условия стабилизируются. Что делает их удобными в транспортировке и надёжными в случае непредвиденных обстоятельств В высушенном виде лишайники могут выживать при температурах до -60 ºС, однако при высокой влажности к таким низким температурам они всё же уязвимы.. Примерами таких лишайников являются: Ягель (Лишайники группы Cladonia) – очень устойчивая и питательная группа лишайников, знаменитая в качестве основного источника питания северных оленей в условиях суровых зим. [14] Наимение сложным в адаптации исходя из среды обитания можно назвать лишайник — Ризакарпон географический (лат. Rhizocarpon geographicum). Является широко распространённым видом, произрастающим преимущественно на силикатных горных породах, однако в хорошо прогреваемых, открытых местах. Но согласно интерактивной карте ареала обитания, также произрастает в условиях крайнего севера и Антарктики. [15]

Таблица 4.2

Иные виды лишайников, наиболее приспособленных к заданным условиям

Научное название	**Разделение**
Acarospora austroshetlandica	Дикорастущий
Amandinea babingtonii	Дикорастущий
Buellia augusta	Дикорастущий
Carbonea assentiens	Дикорастущий
Caloplaca cerina	Дикорастущий
Caloplaca elegans	Дикорастущий
Cetraria aculeata	Дикорастущий
Cladonia borealis	Дикорастущий

Flavoplaca citrina	Дикорастущий
Gondwania sublobulata	Дикорастущий
Haematomma erythromma	Дикорастущий
Lecanora aspidophora	Дикорастущий
Lepra dactylina	Дикорастущий
Massalongia carnosa	Дикорастущий
Megaspora verrucosa	Дикорастущий
Ochrolechia frigida	Дикорастущий
Parmelia saxatilis	Дикорастущий
Physcia adscendens	Дикорастущий
Porpidia austroshetlandica	Дикорастущий
Psoroma tenue	Дикорастущий
Rhizocarpon geographicum	Дикорастущий
Stereocaulon caespitosum	Дикорастущий
Tephromela atra	Дикорастущий
Tephromela antarctica	Дикорастущий
Tetramelas anisomerus	Дикорастущий
Umbilicaria antarctica	Дикорастущий
Verrucaria dispartita	Дикорастущий
Verrucaria durietzii	Дикорастущий
Verrucaria psychrophila	Дикорастущий
Wahlenbergiella striatula	Дикорастущий
Bellemerea alpina	Дикорастущий
Cornicularia divergens	Дикорастущий
Xanthoria candelaria	Дикорастущий
Umbilicaria cylindrica	Дикорастущий
Umbilicaria hyperborea	Дикорастущий
Parmelia pubescens	Дикорастующий
Parmelia alpicola	Дикорастущий
Physcia species	Дикорастущий
Lecidea species	Дикорастущий
Buellia species	Дикорастущий
Rinodina species	Дикорастущий
Caloplaca species	Дикорастущий

Rhizocarpon species	Дикорастущий
Verrucaria species	Дикорастущий
Xanthoria species	Дикорастущий
Alectoria ochroleuca	Дикорастущий
Cladonia alpestris	Дикорастущий
Cetraria nivalis	Дикорастущий
Sphaerophorus globosus	Дикорастущий
Peltigera aphthosa	Дикорастущий

Кустарнички. В рамках данного исследования, достаточно совокупное понятие – низкорослых кустарников, различных семейств, однако обладающих полной или достаточной устойчивостью к раннее описанным условиям, пускай, и уступают по выживаемости мхам и лишайникам. Морозостойкость свойственна всем кустарничкам, обитающим преимущественно на высотах в горной местности и иных холодных регионов. Однако света нет. Касательно произрастания на каменистых поверхностях, кустарнички во многом обязательными литофилами. Иными словами в случае растений представленных далее различные каменистые субстраты и поверхности являются основным местом произрастания. Это обуславливается особенностью их корневой системы — обычно мелкой, но плотной, что позволяется закрепляться на трещинах и неровностях каменистости. Пускай и в меньшей степени, нежели лишайники и мхи, они так-же способные регулировать метаболизм в случае неблагоприятных условий. Также особенности морфологии некоторых образцов способны менять микроклимат вокруг своей небольшой области, удерживая влагу и/или стабилизируя микропочву. [16]

Таблица 4.3

Иные виды кустарничков, наиболее приспособленных к заданным условиям

Научное название	**Разделение**
Dryas octopetala	Дикорастущий
Salix polaris	Дикорастущий
Betula nana	Дикорастущий
Cassiope tetragona	Дикорастущий
Oxyria digyna	Дикорастущий
Draba norvegica	Дикорастущий
Saxifraga oppositifolia	Дикорастущий / Культивируемый
Minuartia verna	Дикорастущий
Sempervivum tectorum	Дикорастущий / Культивируемый
Arenaria norvegica	Дикорастущий
Silene acaulis	Дикорастущий / Культивируемый
Papaver radicatum	Дикорастущий
Polygonum viviparum	Дикорастущий

Alchemilla alpina	Дикорастущий
Potentilla hyparctica	Дикорастущий
Hierochloe alpina	Дикорастущий
Carex rupestris	Дикорастущий
Dasiphora crinita	Дикорастущий
Empetrum nigrum	Дикорастующий
Vaccinium vitis-idaea	Дикорастущий
Loiseleuriea procumbens	Дикорастущий
Artemisia campestris	Дикорастущий
Lychnis alpina	Дикорастущий
Anemone narcissiflora	Дикорастущий
Caltha leptosepala	Дикорастущий
Delosperma ecklonii	Дикорастущий / Культивируемый
Geyeriella sibirica	Дикорастущий
Saxifraga caespitosa	Дикорастущий
Saxifraga cernua	Дикорастущий
Saxifraga oppositifolia	Дикорастущий / Культивируемый
Draba aizoides	Дикорастущий
Draba norvegica	Дикорастущий
Draba ochrocephala	Дикорастущий
Draba reptans	Дикорастущий
Minuartia verna	Дикорастущий
Arenaria norvegica	Дикорастущий
Sagina saginoides	Дикорастущий
Thlaspi rotundifolium	Дикорастущий
Saxifraga oppositifolia	Дикорастущий / Культивируемый
Saxifraga cespitosa	Дикорастущий
Saxifraga aizoides	Дикорастущий
Saxifraga wahlenbergii	Дикорастущий
Draba aizoides	Дикорастущий
Draba norvegica	Дикорастущий

Иная флора. Важно отметить, что представленные ранее классификации и виды далеко не единственные возможные кандидаты для участия в экспериментах по воссозданию частичной экосистемы закрытого типа. Однако они в своих нишах, подходящих или близких по условиям

данного исследования, наиболее приспособлены к неблагоприятным условиям или способны пережить внештатные ситуации, если таковые возникнут. В частном порядке для аналогичных целей можно выявить виды из схожих ареалов. Таковыми растениями преимущественно будут являться низкорослые и простые в своей морфологии представители флоры, а также некоторые виды грибов.

Заключение

Подводя итоги, можно сказать, что цели и задачи, поставленные в рамках данной работы, были выполнены. Важно сказать, что в действительности условия на Марсе являются достаточно суровыми, однако они наиболее приближены к тому уровню, чтобы попытаться воссоздать пускай и закрытую, но живую экосистему. На данный момент человечество обладает технологиями для обеспечения климатических условий для обеспечения выживания сложной жизни в виде растений, но данные технологии во многом являются пускай и проверенными – в первую очередь концептами и тестовыми образцами, требующими доработки или масштабизации. Что требует интеллектуальных и финансовых вложений, но не является невозможным с научной точки зрения. Создание же закрытой экосистемы на данный момент не является опцией, а в свою очередь тоже экспериментом, требующим множественной теоритической перепроверки и практических опытов.

На текущий момент терраформированная среда, без масштабизации тех технологий, что имеются, не будет являться стабильной, и наиболее вероятно будет находиться на грани анабиоза. О живой жизни не приходится говорить. Однако даже при таких негативных данных, это будет первый и серьёзный шаг, что даст опыт в создания условий, пускай и в замкнутых, но достаточно объёмных пространствах и воссоздании Земной жизни на других планетах.

Планируем продолжать изучение и более детальное рассмотрение условий существования живых экосистем, как в лавовых трубках Марса, так и на поверхности других космических тел.

Список литературы и использованных источников

1. Losarcos J. M., Dombard A. J. Lava Tubes on Earth, the Moon, and Mars: Detection, Evolution, and Exploration Potential // Space Science Reviews. – 2025. – Vol. 221, Art. 127. – DOI: 10.1007/s11214-025-01260-9.
2. Collinet M., Plesa A.-C., Ruedas T., Schwinger S., Breuer D. The Temperature and Composition of the Mantle Sources of Martian Basalts // Geophysical Research Letters. – 2023. – DOI: 10.1029/2023GL103537.
3. Franz H. B., Trainer M. G., Malespin C. A., et al. Initial SAM calibration gas experiments on Mars: Quadrupole mass spectrometer results and implications // Planetary and Space Science. – 2017. – Vol. 138. – P. 44–54. – DOI: 10.1016/j.pss.2016.12.006.
4. Bertaux J.-L., Fonteyn D., Korablev O., et al. SPICAM: Studying the Global Structure and Composition of the Martian Atmosphere // Mars Express: the scientific payload (ESA SP-1240). – 2004. – P. 95–120.
5. Sauro F., Pozzobon R., Massironi M., De Berardinis P., Santagata T., De Waele J. Lava tubes on Earth, Moon and Mars: A review on their size and morphology revealed by comparative planetology // Earth-Science Reviews. – 2020. – Vol. 209. – Art. 103288. – DOI: 10.1016/j.earscirev.2020.103288.
6. Özel S., Çamdalı Ü., Tunç M. Calculation of the potential of solar radiation and efficiency of its conversion into exergy // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2026. – Vol. 99, No. 1. – DOI: 10.1007/s10891-026-03303-6.
7. Appelbaum J., Flood D. J. Solar radiation on Mars // Solar Energy. – 1990. – Vol. 45, No. 6. – P. 353–363.
8. Hoffman J. A., Hecht M. H., Rapp D., et al. Mars Oxygen ISRU Experiment (MOXIE)—Preparing for human Mars exploration // Science Advances. – 2022. – Vol. 8, No. 35. – Art. eabp8636. – DOI: 10.1126/sciadv.abp8636.
9. Hecht M., Hoffman J., Rapp D., et al. Mars Oxygen ISRU Experiment (MOXIE) // Space Science Reviews. – 2021. – Vol. 217, Art. 9. – DOI: 10.1007/s11214-020-00782-8.
10. Wang Y., Qu R., Wang X., Hao Y., Deng J., Wang H., Sun Y. Efficient recovery of zebrafish maternal-zygotic mutants from in vivo expanded and cryopreserved germline stem cells // Communications Biology. – 2026. – Vol. 9, Art. 1276. – DOI: 10.1038/s42003-026-10463-x.
11. Maeng C.-H., Hiwatashi Y., Nakamura K., Matsuda O. Extreme environmental tolerance and space survivability of the moss, *Physcomitrium patens* // iScience. – 2025. – DOI: 10.1016/j.isci.2025.113827.
12. *Sanionia uncinata* (Hedw.) Loeske // GBIF Backbone Taxonomy [Электронный ресурс]. – URL: https://www.gbif.org/taxon/6XJ37 (дата обращения: 03.09.2026).
13. *Ceratodon purpureus* (Hedw.) Brid. // GBIF Backbone Taxonomy [Электронный ресурс]. – URL: https://www.gbif.org/taxon/MRY8Q (дата обращения: 06.09.2026).
14. *Cladonia* Hill ex P.Browne // Catalogue of Life [Электронный ресурс]. – URL: https://www.catalogueoflife.org/data/taxon/62LF9 (дата обращения: 03.10.2026).
15. *Rhizocarpon geographicum* (L.) DC. // GBIF Backbone Taxonomy [Электронный ресурс]. – URL: https://www.gbif.org/taxon/4SC54 (дата обращения: 13.09.2026).
16. *Dryas octopetala* L. // GBIF Backbone Taxonomy [Электронный ресурс]. – URL: https://www.gbif.org/taxon/37TXV (дата обращения: 17.09.2026).
17. *Carex* L. // GBIF Backbone Taxonomy [Электронный ресурс]. – URL: https://www.gbif.org/taxon/8VRHY (дата обращения: 20.09.2026).

18. GBIF [Электронный ресурс] : Global Biodiversity Information Facility. – URL: https://www.gbif.org/ (дата обращения: 23.09.2026).