

Урбанистика и городские системы <https://ugsjournal.ru>

Urban Studies and Urban Systems

2024, Том 1, № 1 / 2024, Vol. 1, Iss. 1 <https://ugsjournal.ru/issue-1-2024.html>

URL статьи: <https://ugsjournal.ru/PDF/01SAUG124.pdf>

2.1.13. Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Го, С. Концепции формирования марсианского города: сравнительный анализ стратегий обитаемой среды / С. Го // Урбанистика и городские системы. — 2024. — Т. 1. — № 1. — URL: <https://ugsjournal.ru/PDF/01SAUG124.pdf>. DOI: 10.15862/01SAUG124.

For citation:

Guo X. Blueprint for a Martian City: A Comparative Analysis of Global Concepts. *Urban Studies and Urban Systems*. 2024;1(1): 01SAUG124. Available at: <https://ugsjournal.ru/PDF/01SAUG124.pdf>. DOI: 10.15862/01SAUG124. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 721

Го Сюэ

ФГАОУ ВО "Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы", Москва, Россия

Аспирант

E-mail: 1042248036@pfur.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2945-4769>

Концепции формирования марсианского города: сравнительный анализ стратегий обитаемой среды

Аннотация. Автором представлен сравнительный анализ современных концепций формирования марсианского города, рассматриваемых в контексте поэтапного освоения внеземной среды и создания устойчивых условий для долговременного проживания человека. В статье анализируется эволюция идеи марсианского поселения от экспериментальных жилых объектов к комплексным городским структурам, обусловленная развитием космических технологий и ростом интереса к практическому освоению Марса.

В качестве ключевых объектов исследования рассматриваются две концептуально различные парадигмы: автономный жилой модуль MARSHA, разработанный компанией AI SpaceFactory, и модульная подповерхностная городская модель с реголитным экранированием, представленная проектом Mars Science City бюро Bjarke Ingels Group. Автором проводится системное сопоставление данных подходов по шести основным критериям, включающим морфологию и несущую логику конструкций, стратегии радиационной и тепловой защиты, материальные решения и использование локальных ресурсов, методы строительства и логистическую зависимость, масштабируемость и избыточность, а также особенности организации человеческой и социальной среды.

В статье показано, что автономные жилые модули ориентированы преимущественно на задачи раннего этапа миссии, обеспечивая быстрое развертывание и базовые условия выживания, тогда как подповерхностные модульные структуры формируют основу для долгосрочной городской устойчивости и системной избыточности. Автором обоснована целесообразность интегрированной поэтапной стратегии, при которой автономные модули используются в качестве стартовой среды обитания, а по мере развития возможностей строительства и эксплуатации формируется реголитно-экранированная городская инфраструктура. Полученные выводы могут быть использованы в дальнейших исследованиях архитектуры и градостроительства внеземных поселений.

Ключевые слова: марсианский город; внеземной урбанизм; сравнительный анализ; архитектурные концепции; обитаемая среда; модульные поселения; освоение Марса

Введение

В условиях быстрого развития науки и технологий человечество продолжает поиск новых пространств для долгосрочного обитания за пределами Земли. Идея создания постоянного и самодостаточного человеческого присутствия на Марсе эволюционировала от научной фантастики к серьёзной инженерно-архитектурной повестке, побуждая ведущие международные институты и проектные организации разрабатывать концептуальные модели «первого марсианского города». Марс остаётся одним из наиболее перспективных кандидатов для долгосрочного освоения благодаря ряду характеристик, близких к земным, включая почти 24-часовой суточный цикл, наличие полярных ледяных шапок и геологические свидетельства существования жидкой воды в прошлом. Возрастающий интерес к освоению Марса наглядно отражается в инициативах ведущих космических агентств и частных аэрокосмических компаний. Программа NASA Artemis и миссия Mars 2020, а также устойчивые инвестиции SpaceX и других коммерческих участников указывают на формирование глобального консенсуса в отношении Марса как ключевого направления будущей человеческой экспансии и обитания.

В то же время перспектива жизни на Марсе связана с необходимостью преодоления фундаментальных условий выживания, включая интенсивное радиационное воздействие, низкое атмосферное давление и экстремальные температурные колебания. Эти факторы формируют острую потребность в высокоинтегрированных системах жизнеобеспечения и управления ресурсами, способных обеспечить почти полную независимость от снабжения с Земли. В частности, измерения радиационной обстановки на поверхности Марса показывают, что риски долгосрочного облучения должны быть компенсированы за счёт эффективных стратегий экранирования и тщательно продуманного архитектурного проектирования жилой среды.

В рамках современных глобальных исследований сформировались два влиятельных проектных подхода, по-разному отвечающих на указанные вызовы. Первый из них — концепция MARSHA, разработанная компанией AI SpaceFactory, ориентированная на создание высокопроизводительного автономного жилого модуля, предназначенного для развертывания и тиражирования. Второй подход представлен проектом Mars Science City, предложенным бюро Bjarke Ingels Group (BIG), который реализует городоориентированную модель с акцентом на модульный рост и организацию поселения на уровне городской структуры. В обобщённом виде данные парадигмы различаются по приоритетам: одна акцентирует развитие масштабируемых модульных городских систем с выраженной логикой использования ресурсов *in situ* (ISRU), тогда как другая сосредоточена на проектировании и эксплуатационных характеристиках компактных, автономных жилых единиц.

В связи с этим в настоящем исследовании проводится сравнительный анализ указанных концептуальных моделей с целью выявления ключевых архитектурных, инженерных и социально-пространственных парадигм, формирующих стратегии будущего марсианского заселения. Анализ того, каким образом каждая из моделей отвечает на основные ограничения и потенциальные возможности марсианской среды, позволяет обозначить направления дальнейших исследований в области проектирования марсианских поселений и рассмотреть возможности интеграции их взаимодополняющих преимуществ в рамках целостного и масштабируемого подхода.

Материалы и методы

В рамках настоящего исследования сопоставляются две репрезентативные концепции марсианской обитаемой среды: MARSHA (парадигма автономного жилого модуля) и Mars Science City (парадигма модульного подземного города). Основной целью является оценка их сильных и слабых сторон по шести ключевым критериям: (1) морфология и несущая логика конструкции; (2) радиационная и тепловая защита; (3) материальная стратегия и степень «чистоты» ISRU; (4) методы строительства и логистическая зависимость; (5) масштабируемость и избыточность; (6) человеческие факторы и социальное пространство. Посредством структурированного сравнительного анализа исследование направлено на формирование интегрированного проектного направления, способного объединить преимущества обоих подходов в контексте долгосрочного обитания человека на Марсе.

С методологической точки зрения в работе применяется многокритериальный сравнительный подход, основанный на шестимерной оценочной рамке. Первый критерий — морфология и несущая логика — сопоставляет вертикальную, яйцевидную конфигурацию MARSHA с горизонтально организованной модульной структурой Mars Science City, акцентируя внимание на том, каким образом каждая конструктивная схема отвечает требованиям герметизации и инженерным ограничениям, связанным с внутренним давлением. Второй критерий — радиационная и тепловая защита — анализирует предлагаемые в рамках каждой концепции стратегии управления внешними воздействиями и экстремальными условиями среды, учитывая, что радиация является критическим ограничивающим фактором при длительном пребывании на поверхности Марса [1].

Третий критерий — материальная стратегия и степень использования ISRU — сопоставляет использование в MARSHA композитных материалов на основе базальтового волокна и биополимерно-ориентированную логику аддитивного производства с реголит-ориентированными строительными сценариями, характерными для поселений городского масштаба, с акцентом на различия в зависимости от локальных ресурсов и импортируемых материалов. Четвёртый критерий — методы строительства и логистическая зависимость — противопоставляет ориентацию MARSHA на 3D-печать в условиях раннего этапа и ограниченного масштаба развертывания модульной строительной логике Mars Science City, рассчитанной на поэтапный и масштабируемый рост. Пятый критерий — масштабируемость и избыточность — оценивает, осуществляется ли расширение поселения преимущественно за счёт тиражирования независимых модулей либо через сетевую систему взаимосвязанных пространств. Наконец, критерий человеческих факторов и социального пространства рассматривает способы обеспечения долгосрочной обитаемости, включая вопросы приватности, автономии, общественных функций и пространственных условий, необходимых для устойчивой социальной организации.

Эмпирическая база исследования формируется преимущественно на основе открытых проектных материалов и технических описаний концепций MARSHA и Mars Science City, дополненных рецензируемыми научными публикациями, используемыми для обоснования экологических ограничений, в частности радиационного воздействия. При этом работа учитывает ряд ограничений: обе концепции в значительной степени остаются на концептуальной стадии или стадии наземного тестирования и не прошли валидацию в реальных марсианских условиях эксплуатации. Кроме того, несмотря на повышение ясности и сопоставимости, обеспечиваемое шестимерной рамкой анализа, относительная значимость отдельных критериев может варьироваться в зависимости от приоритетов конкретных исследовательских сообществ или этапов миссии.

Результаты исследования

Концепция MARSHA представляет собой «высокопроизводительную автономную жилую среду», предложенную компанией AI SpaceFactory для экстремальных условий марсианской среды (рис. 1).



Рисунок 1. Концептуальная модель MARSHA: вертикальная яйцевидная (эллипсоидная) оболочка (<https://spacefactory.ai/marsha>)

Её базовая логика заключается в формировании минимальной единицы выживания, способной к независимому развёртыванию и масштабируемому тиражированию в условиях низкого атмосферного давления, повышенного радиационного воздействия и значительных температурных колебаний. В рамках данной парадигмы архитектура в первую очередь функционирует как «оболочка системы жизнеобеспечения»: пространственная форма, пути передачи нагрузок и применяемые материалы изначально подчинены задаче обеспечения герметичности, поддержания внутреннего давления и резервирования безопасности, тогда как развитие поселения городского масштаба и формирование общих инфраструктур рассматриваются как последующие этапы.

С точки зрения морфологии и конструктивной логики MARSHA использует вертикальную яйцевидную (эллипсоидную) оболочку с многоуровневой, вертикально организованной внутренней структурой. Данное формообразование продиктовано инженерными соображениями: марсианская среда обитания должна на протяжении длительного времени поддерживать давление, близкое к земному, что означает постоянное воздействие избыточного внутреннего давления на конструкцию. Внешняя оболочка в этой связи ориентирована на минимизацию концентраций напряжений и формирование непрерывного оболочечного пути передачи нагрузок (рис. 2; 3).



Рисунок 2. Концепция двойной оболочки: изоляция жилых пространств от конструктивных напряжений, вызванных экстремальными температурными колебаниями. (<https://spacefactory.ai/marsha>).



Рисунок 3. Модель аддитивного производства / 3D-печати. (<https://spacefactory.ai/marsha>).

По сравнению с угловыми объёмами, криволинейная яйцевидная форма позволяет более равномерно распределять мембранные напряжения и снижать вероятность возникновения ослабленных зон, повышая общую устойчивость и надёжность конструкции в условиях, где давление является доминирующим фактором нагружения.

Вертикальная компоновка, в свою очередь, повышает эффективность использования полезной площади при ограниченном пятне застройки и поддерживает функциональное зонирование по уровням: нижние этажи отводятся под инженерные и обслуживающие системы, средние — под полуобщественные пространства, верхние — под более приватные зоны отдыха. Такая организация способствует снижению психологических рисков, связанных с длительным пребыванием в замкнутой среде, включая сенсорную монотонность и ощущение изоляции [2].

С точки зрения материалов и стратегии производства MARSHA позиционируется как объект аддитивного строительства, изготавливаемый с использованием автоматизированных и роботизированных систем. В открытых источниках проект описывается как композитная конструкция, сочетающая армирование базальтовым волокном и биополимерные (биопластиковые) связующие, что позволяет осуществлять 3D-печать непрерывной оболочки. Инженерная логика такого решения направлена на достижение баланса между технологичностью производства и конструктивной эффективностью: волокнистое армирование повышает прочность и трещиностойкость, тогда как полимерная матрица обеспечивает печатаемость и надёжное межслойное сцепление. Подобный подход соотносится с более широкими направлениями раннего этапа строительства марсианских жилищ, исследуемыми в рамках программ NASA по 3D-печати, где быстрая фабрикация и минимизация монтажных операций рассматриваются как способ снижения риска утечек и ускорения развертывания жилых объектов.

В целом MARSHA иллюстрирует путь развития по принципу «сначала единичный модуль»: обеспечение выживания и комфорта за счёт высокопроизводительных, тиражируемых автономных единиц с последующей интеграцией более сложной инфраструктуры поселения по мере увеличения масштаба.

Парадигма Case B представляет собой городоориентированный подход, основанный на подповерхностном строительстве с использованием реголита в качестве защитного слоя, а также на модульной взаимосвязанности и поэтапном расширении. В рамках данного подхода

обитаемые объёмы интегрируются с марсианским ландшафтом: реголит функционирует как пассивный элемент радиационного экранирования и тепловой буферизации, в то время как герметичные модули и соединительные коридоры формируют систему поселения, поддерживающую научную деятельность, сельское хозяйство и общественную жизнь. В настоящем исследовании проект Mars Science City, разработанный бюро Bjarke Ingels Group (BIG), используется в качестве репрезентативного примера городского масштаба (рис. 4, 5). Проект позиционируется как наземный прототип и испытательная платформа, размещённая в пустынной среде Дубая, с целью моделирования и верификации строительных и эксплуатационных логик, релевантных для будущих марсианских сценариев.

В рамках данной парадигмы реголитно-экранированный модуль (рис. 6) может рассматриваться как минимальный функциональный элемент роста поселения. Криволинейная оболочка или купольная форма обеспечивает относительно равномерную логику ограждения, способствующую герметичности и конструктивной устойчивости при внутреннем давлении, тогда как частичное заглубление или засыпка реголитом создаёт дополнительный пассивный защитный слой и повышает стабильность микроклимата. Функционально такие модули могут использоваться как относительно автономные зоны — жилые, лабораторные, сельскохозяйственные (теплицы) или технические.

На городском уровне парадигма модульного подземного поселения трансформирует отдельные строительные единицы в «урбанизированные модули». Несколько модулей могут быть объединены в рамках единой схемы герметизации (либо зонированной системы давления), формируя каркас поселения, сочетающий общественные и производственные функции и допускающий дальнейшее расширение путём добавления новых модулей. Данный подход обладает рядом существенных преимуществ. Во-первых, реголитное экранирование и подповерхностное размещение обеспечивают пассивную радиационную защиту и тепловую инерцию без пропорционального увеличения сложности инженерных систем. Во-вторых, модульная сеть поддерживает поэтапное развитие и системную интеграцию, позволяя объединять жильё, научные функции, сельское хозяйство и обслуживание в единую масштабируемую структуру. В-третьих, с точки зрения реализации, парадигма соответствует целям высокого уровня ISRU: реголит рассматривается как основной локальный строительный ресурс, а дорожные карты NASA в рамках программы Moon-to-Mars подчёркивают реголит-ориентированные технологии (спекание, уплотнение и родственные процессы) как ключевое направление снижения зависимости от поставок с Земли. Таким образом, Case B описывает долгосрочный маршрут «городской инженерии»: сначала формируется функционирующая модульная сеть, после чего на неё наслаиваются более сложные общественные и производственные системы, обеспечивающие устойчивый рост поселения.



Рисунок 4. Проект Mars Science City, Дубай, Объединённые Арабские Эмираты
(<https://www.dezeen.com/2017/09/28/bjarke-ingels-mars-science-city-space-exploration-dubai-united-arab-emirates/>)



Рисунок. 5. Пример схемы / карты Mars Science City. (<https://www.nasa.gov/space-technology-mission-directorate/>)

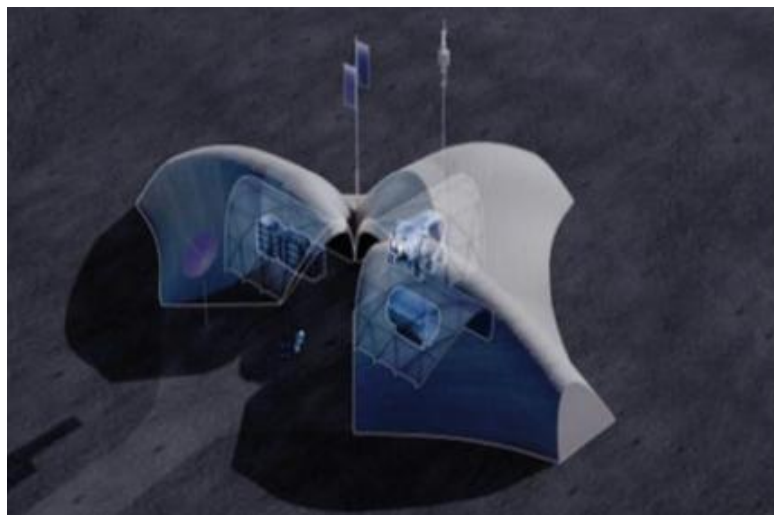


Рисунок 6. Модель реголитно-экранированного модульного блока
(https://www.archdaily.com/989713/nasa-and-ai-space-factory-develop-a-3d-printed-lunar-structure?utm_medium=organic&utm_source=yasmartcamera)

Особая ценность Mars Science City заключается не только в его концептуальном нарративе, но и в позиции «валидации на Земле». Размещение прототипа в пустынной среде Дубая создаёт реалистичную испытательную площадку для изучения интегрированных строительных методов и организации поселений в условиях высоких температур, пылевых нагрузок и ограниченных ресурсов, которые могут служить значимым аналогом отдельных аспектов марсианской среды. В этом смысле Mars Science City выступает как переходный инженерный носитель — от земных пустынь к будущим марсианским поверхностям, поддерживая итеративную проверку материальных стратегий, строительных процессов и системной интеграции поселений [3–6].

На основе шестимерной многокритериальной сравнительной рамки, предложенной ранее, Case A (MARSHA — парадигма автономного жилого модуля) и Case B (парадигма модульного подземного города с реголитным экранированием) рассматриваются в рамках единой оценочной системы координат с целью получения результатов «сопоставления измерение к измерению». В целом данные подходы представляют собой два взаимодополняющих пути формирования марсианской обитаемой среды: первый делает приоритет на «высокопроизводительные, тиражируемые герметичные модули», стремясь в ранних миссиях быстро обеспечить безопасную жилую оболочку и более высокий уровень качества жизни; второй ориентирован на «ландшафтно-интегрированное экранирование в сочетании с модульно растущим городским каркасом», нацеленным на достижение устойчивости, избыточности и масштабируемости, необходимых для длительного пребывания¹.

В аспекте морфологии и несущей логики вертикальная яйцевидная оболочка MARSHA подчёркивает непрерывную передачу нагрузок в условиях доминирования внутреннего давления. Использование криволинейной формы снижает концентрацию напряжений, а вертикальная многоуровневая организация пространства повышает эффективность использования площади при ограниченном пятне застройки, что делает данный подход

¹ Bjarke Ingels Group (BIG). Mars Science City / BIG // BIG Projects. — [n.d.]. — URL: <https://arquitecturaviva.com/works/mars-science-city>

подходящим для формирования раннего прототипа поселения с небольшим числом модулей (рис. 7–9).



Рисунок 7. Вертикальное яйцевидное здание-оболочка (<https://spacefactory.ai/marsha>)



Рисунок 8. Поэтажная схема вертикального яйцевидного здания (<https://spacefactory.ai/marsha>)



Рисунок 9. Иллюстрация многоуровневой организации жилого пространства (<https://spacefactory.ai/marsha>)

В противоположность этому реголитно-экранированная модульная подземная городская модель склонна к разделению герметизированного пространства на множество взаимосвязанных модулей, что позволяет реализовать изоляцию рисков и функциональное зонирование посредством «сетевой компартиментализации». За счёт процессов выемки, обратной засыпки и укрытия реголитом функции экранирования и части стабилизации среды в

значительной степени «делегируются» реголитной среде, вследствие чего внутренние инженерные задачи модулей могут быть в большей мере сосредоточены на обеспечении герметичности и эксплуатационных режимов [3].

В стратегиях радиационной и тепловой защиты расхождения становятся ещё более выраженными. Натурные измерения подтверждают, что радиационная обстановка на поверхности Марса представляет существенный риск, и длительное обитание должно опираться на эффективное экранирование и управление экспозицией. MARSHA стремится обеспечить базовый уровень защиты за счёт интеграции материала и оболочки (при этом допускается последующее добавление внешних экранирующих мер), тогда как реголитно-экранированная парадигма рассматривает укрытие реголитом и/или подповерхностное размещение как «первую линию защиты», используя пассивные средства для снижения радиационного воздействия и температурных колебаний и тем самым уменьшая постоянную нагрузку на системы жизнеобеспечения.

В материальной стратегии и степени «чистоты» ISRU MARSHA использует маршрут 3D-печати с применением композита на основе базальтового волокна и биополимеров/биопластика. К его преимуществам относятся высокая удельная эффективность, высокая формообразующая способность, быстрое получение цельной оболочки и снижение риска утечек, связанных с монтажными стыками; однако возможная зависимость полимерной матрицы от поставок с Земли может усиливать нагрузку на цепочки снабжения при крупномасштабном развертывании. Парадигма реголитно-экранированного модульного подземного города, напротив, подчёркивает использование реголита в качестве основного строительного материала (например, через процессы спекания, упрочнения и применения реголита как заполнителя), стремясь снизить зависимость от импортируемых связующих и сложных компонентов. Такой путь часто рассматривается как более «высоко-ISRU» и приближённый к долгосрочному видению, однако он также предъявляет более высокие требования к подготовке сырья *in situ*, управлению процессами и контролю качества [3; 4].

С точки зрения методов строительства и логистической зависимости сильной стороной MARSHA является «быстрое развертывание единичного модуля»: данный подход подходит для маломасштабных форпостных миссий, используя относительно стандартизированные сценарии печати и ограниченное число операций для получения герметичной единицы выживания. Реголитно-экранированная модульная подземная городская парадигма, напротив, в большей степени опирается на полноценную автономную строительную цепочку, включающую выемку грунта, обращение с сырьём, аддитивное строительство, мониторинг и обслуживание [5; 6]. Её преимущество заключается в устойчивом расширении при параллельном развитии инфраструктуры, однако порог инженерной реализуемости на раннем этапе выше, что делает данный путь более подходящим в качестве основного направления средне- и позднесрочного городского роста (рис. 10–12).

В измерении масштабируемости и избыточности два подхода демонстрируют типичный компромисс между «краткосрочной эффективностью» и «долгосрочной устойчивостью». MARSHA позволяет расширять поселение путём тиражирования модулей, однако избыточность городского уровня (общественные системы, транспорт, сельское хозяйство, техническое обслуживание, аварийная изоляция) требует дополнительной системной организации. Реголитно-экранированная модульная подземная городская модель, напротив, изначально организует расширение через модульную сеть, повышая отказоустойчивость за счёт зонирования и резервирования и сохраняя чёткий сценарий долгосрочного роста посредством линейного или сетевого добавления модулей.

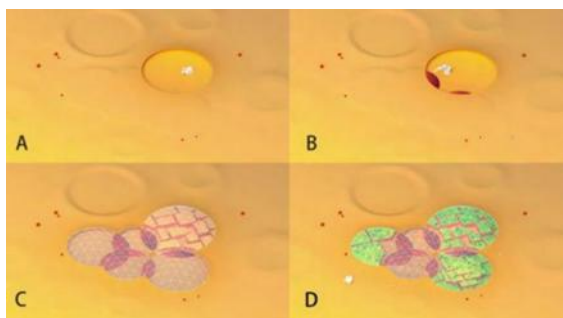


Рисунок 10. Схема строительного процесса реголитно-экранированного модульного подземного города (<https://spacefactory.ai/marsha>)



Рисунок 11. Пример жилой зоны реголитно-экранированного модульного подземного города (<https://spacefactory.ai/marsha>)



Рисунок 12. Пример зоны озеленения/аграрного модуля реголитно-экранированного модульного подземного города (<https://tech.onliner.by/2017/10/05/shlak>)

В аспекте человеческих факторов и социального пространства MARSHA делает акцент на комфорте и психологической благоприятности внутри единичного модуля, используя вертикальное зонирование, пространственную слоистость и управляемую световую среду для снижения монотонности и давления в условиях замкнутого пространства, что поддерживает пребывание малых групп на ранних этапах миссии. Хотя реголитно-экранированная модульная парадигма обладает преимуществами в экранировании и экологической стабильности, она также сталкивается с психологическими вызовами подповерхностного проживания; в связи с этим общественные ядра (атриумы, общие залы, аграрные и активностные зоны) и стратегии циркадного освещения обычно рассматриваются как необходимые меры компенсации

дефицита естественного света и внешних видов, что делает городскую публичность ключевым условием долгосрочного социального функционирования [6].

Синтез шестимерных результатов указывает на более инженерно реализуемую поэтапную стратегию. На раннем этапе миссии «высокопроизводительные автономные модули» типа MARSHA могут служить быстро разворачиваемым базовым уровнем выживания. По мере созревания возможностей in situ строительства и эксплуатации может быть введён «сетевой каркас» реголитно-экранированного модульного города, позволяющий интегрировать общественные системы, сельское хозяйство и транспорт в расширяемую подповерхностную или реголитно-укрытую инфраструктуру. Иными словами, MARSHA выступает отправной точкой стратегии «сначала выжить и жить комфортно», тогда как парадигма реголитно-экранированного модульного подземного города задаёт конечную рамку «долгосрочного роста при высокой устойчивости», и оптимальная траектория будущего развития с высокой вероятностью представляет собой их сопряжение, а не жёсткий выбор одного из двух вариантов (табл. 1) ².

Таблица 1.

Итоги шестимерного сравнительного анализа

Измерение	MARSHA (парадигма автономного жилого модуля)	Парадигма модульного подземного города с реголитным экранированием	Итоговый вывод
Морфология и несущая логика	Вертикальная яйцевидная оболочка; доминирование внутреннего давления; непрерывный путь передачи нагрузок; многоуровневое зонирование повышает пространственную эффективность	Горизонтальная/подповерхностная модульная сеть; компартиментализация; реголит и ландшафт участвуют в экранировании и стабилизации	«Высокопроизводительные единичные модули» эффективны на ранних этапах; «сетевые модули» лучше поддерживают долгосрочную устойчивость
Радиационная и тепловая защита	Базовый уровень защиты за счёт интеграции материала и оболочки; допускается добавление внешних экранирующих мер	Реголитное укрытие и/или подповерхностное размещение как первичная защита; пассивное снижение радиационной и тепловой нагрузки	При длительном пребывании преимущество, как правило, имеют пассивные реголитные стратегии экранирования
Материальная стратегия и ISRU	3D-печать композитом (базальтовое волокно + биополимер/биопластик); масштабирование может ограничиваться зависимостью от полимерных поставок	Реголит-ориентированные пути строительства (спекание, упрочнение, реголит как материал) обеспечивают более высокий уровень ISRU	«Высокопроизводительные материалы» повышают раннюю реализуемость; высокий ISRU является основой масштабируемости
Методы строительства и логистическая зависимость	Стандартизированная печать единичного модуля; ограниченное число операций; подходит для быстрого развертывания форпостов	Требует полной автономной строительной цепочки (выемка, сырьё, аддитивное строительство, мониторинг, обслуживание)	Реалистичная стратегия предполагает поэтапность: сначала модули, затем инфраструктура

² Bjarke Ingels Group (BIG). Mars Science City / BIG // BIG Projects. — [n.d.]. — URL: <https://arquitecturaviva.com/works/mars-science-city>

Масштабируемость и избыточность	Расширение путём тиражирования модулей; городская избыточность формируется на более поздних этапах	Модульная сеть изначально поддерживает отказоустойчивость, зонирование и рост на городском уровне	Долгосрочные поселения должны опираться на сетевую избыточность и компартментализацию
Человеческие факторы и социальное пространство	Акцент на индивидуальном комфорте и психологической благоприятности; подходит для малых групп и ранних этапов миссий	Общественные ядра и циркадные световые стратегии компенсируют психологические ограничения подповерхностного проживания	Подповерхностные схемы требуют обязательного учёта публичности и световой среды

Составлено автором

На основе шестимерных сравнительных результатов, представленных выше, различие между двумя парадигмами может быть понято как более фундаментальное положение: ключевая проблема марсианского заселения заключается не в том, «какую архитектурную форму выбрать», а в том, «какой уровень задач следует решать в первую очередь». Парадигма автономного жилого модуля, представленная концепцией MARSHA, выдвигает наивысший приоритет высокопроизводительной ограждающей оболочке, способной к герметизации, быстрому разворачиванию и тиражированию. Её цель — как можно раньше получить устойчивые единицы выживания и относительно благоприятные условия обитания, сократить строительные этапы и риски утечек, а также соответствовать ресурсным и кадровым ограничениям стадии маломасштабного форпоста [6]. В противоположность этому парадигма реголитно-экранированного модульного подземного города (часто представляемая в публичных материалах через нарратив Mars Science City) в большей степени соответствует пути «сначала городская система», то есть использует модульную связность и организацию поселения городского масштаба как направляющую логику ранних «стартовых поселений». На этом этапе веса оценки должны смещаться в сторону надёжности герметичных конструкций, управляемости строительных процессов, комфорта проживания и психологической стабильности, поскольку численность населения невелика, общественные системы ещё не сформированы, а наибольший риск представляет прерывание миссии вследствие отказа одной единицы³.

На этапе 2 (стадия расширения) реголитно-экранированная модульная инфраструктура начинает функционировать как «каркас устойчивости». По мере постепенного созревания автономной строительной цепочки — выемки грунта, обращения с сырьём, аддитивного производства и мониторинга качества — может быть внедрена система взаимосвязанных модулей, размещённых под поверхностью или укрытых реголитом, что позволяет интегрировать общественные пространства, сельское хозяйство, техническое обслуживание и транспорт в сетевую структуру, обеспечивая управляемые отказы и системную избыточность за счёт компартментализации и изоляции. На этом этапе веса оценки должны смещаться в сторону долгосрочной стабильности радиационной и тепловой защиты, высокого потенциала ISRU для снижения давления на цепочки снабжения, а также надёжных механизмов городского роста и отказоустойчивости [3; 4]. Этап 3 (стадия урбанизации) акцентирует глубокое сопряжение двух подходов: подповерхностная сеть несёт общественные системы и коридоры расширения, тогда как «поверхностные или полуповерхностные высокопроизводительные автономные модули» сохраняются или эволюционируют в качестве тиражируемых узлов

³ Bjarke Ingels Group (BIG). Mars Science City / BIG // BIG Projects. — [n.d.]. — URL: <https://arquitecturaviva.com/works/mars-science-city>

специализированных функций (научные исследования, медицинская помощь, аварийное укрытие, быстрое наращивание вместимости), формируя составную структуру поселения типа «модуль — сеть — узел», обеспечивающую более сбалансированное сочетание комфорта и устойчивости.

Следует подчеркнуть, что данный интегрированный маршрут не устраняет человеческие риски, связанные с подповерхностным проживанием. Натурные измерения подтверждают, что радиационная обстановка на поверхности Марса представляет значительный риск, и длительное пребывание практически не может обходиться без эффективного экранирования. Поэтому, несмотря на выраженные инженерные преимущества подповерхностных и реголитно-укрытых стратегий, психологическая нагрузка, обусловленная ограниченной световой средой и недостатком внешних видов, должна быть зафиксирована в проектировании городских модулей как жёсткое ограничение: общественные ядра (атриумы, общие залы, зоны активности и сельского хозяйства) и стратегии циркадного освещения должны рассматриваться как системные компоненты, равнозначные по значимости экранированию, а не как декоративные элементы, добавляемые на поздних этапах [6–9]. При этом материальные стратегии и маршруты ISRU также следует рассматривать как стадийно-зависимые: композитные оболочки автономных модулей повышают реализуемость на раннем этапе, тогда как крупномасштабное расширение в большей степени опирается на реголит-ориентированное строительство и зрелую цепочку *in situ* ресурсов. Следовательно, выбор материалов должен служить целям конкретной фазы, а не стремиться к абстрактной «чистоте» единственного технического пути.

Ограничения данного исследования также очевидны. Большинство рассматриваемых предложений в обеих категориях остаются на концептуальной стадии или стадии наземной демонстрации; в реальных марсианских условиях старение материалов, абразивное воздействие пыли, термоциклирование, долгосрочные эффекты радиации и надёжность автономных строительных цепочек могут изменить вес и приоритетность ряда выводов. В связи с этим дальнейшие исследования должны развивать «шестимерное сравнение» в сторону более вычислимой оценки, например путём количественного анализа компромиссов между толщиной экранирования, массой и временем строительства при согласованных предпосылках по численности населения и длительности миссии; построения моделей системной инженерии для сопоставления тиражирования модулей и расширения модульной сети по сложности эксплуатации и изоляции отказов; а также проверки влияния световых стратегий на психическое здоровье и социальное взаимодействие посредством наземных экспериментов в аналоговых средах.

Выводы

MARSHA и парадигма реголитно-экранированного модульного подземного города отвечают на два различных вопроса: «как можно быстрее получить пригодные для обитания единицы» и «как обеспечить долгосрочную городскую устойчивость».

Для марсианской миссии по заселению, которая неизбежно является поэтапной и жёстко ограниченной по ресурсам, более рациональным маршрутом представляется создание ранней базы выживания с использованием автономных жилых модулей, а затем переход к расширению через реголитно-экранированную подповерхностную модульную сеть по мере созревания возможностей *in situ* строительства и эксплуатации, в конечном итоге формируя составную марсианскую систему поселения, уравнивающую комфорт, масштабируемость и изоляцию рисков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hassler D.M. Mars' surface radiation environment measured with the Mars Science Laboratory's Curiosity rover / D.M. Hassler, C. Zeitlin, R.F. Wimmer-Schweingruber et al. — DOI: 10.1126/science.1244797 // Science. — 2014. — Т 343, № 6169. — С. 1244797
2. Staedter T. AI SpaceFactory Wins NASA's 3D-Printed Extraterrestrial Habitat Challenge / T. Staedter // IEEE Spectrum. — 2019. — URL: <https://spectrum.ieee.org/3d-printers-could-build-future-homes-on-mars>.
3. Werkheiser K. In-Situ Resource Utilization (ISRU) Overview / K. Werkheiser, G. Sanders // NASA. — 2023. — URL: <https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2023/10/werkheiser-and-sanders-isru-tagged.pdf>.
4. Mueller R.P. Construction with Regolith / R.P. Mueller // NASA Technical Reports Server (NTRS), Presentation. — 2017. — URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20170002067/downloads/20170002067.pdf>.
5. Pagel J.I. Effects of isolation and confinement on humans—implications for manned space explorations / J.I. Pagel, A. Choukèr — DOI: 10.1152/japplphysiol.00928.2015// Journal of Applied Physiology (1985). — 2016. — Т 120, № 12. — С. 1449–1457
6. Neumerkel R.W.E. Design of an Autonomously Deployable Mars Habitat / R.W.E. Neumerkel, M. Vecerdi, S. Häuplik-Meusburger // Proceedings of the 50th International Conference on Environmental Systems (ICES). — 2021 — URL: https://www.researchgate.net/publication/354125054_Design_of_an_Autonomously_Deployable_Mars_Habitat
7. Березин А.А. Колонизация марса / А.А. Березин // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. — 2019. — С. 889–891.
8. Асташкин А.А. Структура параметров геофизических процессов в околоземной среде. основные принципы концепции перспективной космической системы мониторинга геофизической обстановки / А.А. Буров, В.А. Журавлев, С.В. Карелин, А.В. Лапшин, В.Б. Пулинец, С.А. Твердохлебова, Е.М. Шувалов, В. А. Яковлев, А.А. Асташкин // Гелиогеофизические исследования. — 2015. — № 13. — С. 10–28.
9. Логоватовская Е. Архитектура и космос. Обитаемая база на Луне / Е Логоватовская // SCIENTIFIC JOURNAL "ACADEMIA ARCHITECTURE AND CONSTRUCTION". — 2021. — № 1. — С. 54-59.

Blueprint for a Martian City: A Comparative Analysis of Global Concepts

Guo Xue

Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, Russia

E-mail: 1042248036@pfur.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2945-4769>

Abstract. The author presents a comparative analysis of contemporary concepts of Martian city formation, examined in the context of the phased development of an extraterrestrial environment and the creation of sustainable conditions for long-term human habitation. The article analyzes the evolution of the idea of Martian settlement from experimental residential objects to complex urban structures, driven by the advancement of space technologies and the growing interest in the practical exploration of Mars.

Two conceptually different paradigms are selected as the key objects of the study: an autonomous residential module designed for rapid deployment and replication, and a modular subsurface urban model with regolith-based shielding, represented by the Mars Science City project. The author conducts a systematic comparison of these approaches according to six main criteria, including spatial morphology and structural logic, strategies of radiation and thermal protection, material solutions and the use of local resources, construction methods and logistical dependence, scalability and redundancy, as well as features of human and social environment organization.

The article demonstrates that autonomous residential modules are primarily oriented toward the tasks of the early mission stage, ensuring rapid deployment and basic survival conditions, whereas subsurface modular structures form the foundation for long-term urban sustainability and systemic redundancy. The author substantiates the feasibility of an integrated phased strategy in which autonomous modules are used as an initial living environment, while the gradual development of construction and operational capabilities enables the formation of a regolith-shielded urban infrastructure. The obtained conclusions may be applied in further studies devoted to the architecture and urban planning of extraterrestrial settlements.

Keywords: martian city; extraterrestrial urbanism; comparative analysis; architectural concepts; habitable environment; modular settlements; Mars exploration