

<https://doi.org/10.15407/knit2020.05.073>

УДК 523.43 (629.78, 902.03)

А. С. БІЛИК^{1,2,3}, доц., сертифікований інженер, магістр, канд. техн. наук

E-mail: artem.bilyk@gmail.com

І. В. ГРЕБЕНЄВА¹, магістр архітектури, бакалавр інженерії

E-mail: irina.hrebenieva@gmail.com

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури

Повітрофлотський просп. 31, Київ, Україна, 03680

² Український науково-дослідний Центр вивчення аномалій «Зонд» (УНДЦА «Зонд»)

при Національному технічному університеті України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

пр-т Перемоги 37, Київ, Україна, 03056

³ Аерокосмічне товариство України

вул. Малевича 11, Київ, Україна, 03680

ОСОБЛИВОСТІ ПРОЄКТУВАННЯ СПОРУД В УМОВАХ МАРСА

Розглядаються основні фізичні параметри та кліматичні особливості Марса як можливого місця будівництва першої стаціонарної дослідницької місії. На основі цього вибудовуються фактори впливу на будівлі колонії, які в свою чергу є основним підґрунтям для проєктування на Марсі. Також у роботі проведено аналіз відомих проєктних пропозицій споруд на Марсі та ефективних засобів їхнього захисту від негативного впливу середовища, прийнято до уваги досвід будівництва у складних умовах на Землі. Детально проаналізовано дані та визначено параметри для вибору місця розташування комплексу, серед яких склад ґрунту, кліматичні показники, місцевість, рівень космічного випромінювання, місця виявлення колювання метану, зона екватора, перспективні місця для дослідження та місця успішної посадки минулих місій. Таким чином, на основі даних обґрунтовано вибір місця розташування комплексу, що є основним результуючим фактором для будівництва. Важливим аспектом також є визначення етапів колонізації планети та місця колонії у системі будівництва. Розроблена проєктна пропозиція стосується другого етапу колонізації планети. Колонія — це квазізамкнена система, яка має свій «життєвий цикл» з використанням лише власних і наявних на планеті ресурсів. За допомогою параметрів, які впливають на життєздатність проєкту, можна досягнути повний «життєвий цикл» колонії. У роботі також запропоновано ієрархічну систему функцій комплексу дослідницької місії, яка включає п'ять основних функцій: дослідницьку, транспортну, житлову, виробничу та функцію переробки. На основі ієрархії розроблено функціональні параметри приміщень та показано зв'язки між ними. Загалом можна виокремити три блоки: житловий, науковий та технічно-складський, які органічно пов'язані між собою. Функція максимально оптимізована під потреби людини у марсіанських умовах та розрахована на інтеграцію штучного інтелекту у колонію. Однак задачі, що розглядаються, є лише частиною широкого кола технічних, транспортних, фінансових та інших задач, які становлять комплексну проблематику забудови на Марсі.

Ключові слова: Марс, кліматичні особливості Марса, дослідницька місія, колонізація, вибір місця будівництва, ієрархія функцій, функціональна схема.

1. ВСТУП

Пізнання навколишнього світу є однією із функцій людини і природно не обмежується тільки

нашою планетою. Тому один із найважливіших кроків у космічному майбутньому людства — це заснування дослідницьких місій на інших пла-

Цитування: Білик А. С., Гребенєва І. В. Особливості проєктування споруд в умовах Марса. *Космічна наука і технологія*. 2020. **26**, № 5 (126). С. 73—89. <https://doi.org/10.15407/knit2020.05.073>

нетах [2, 7, 8, 10]. Необхідність цього зумовлена можливістю розширення меж досліджень у процесі становлення стійкої цивілізації і захисту її надбань від потенційної загрози знищення. Дослідження та аналіз умов на планетах і їхніх супутниках у Сонячній системі показали, що перебування людини на них без спеціальних засобів, підготовки, споруд — неможливе [5]. Серед найбільш сприятливих місць Марс займає провідну позицію через схожість із земними фізичних та кліматичних особливостей планети, таких як полярні шапки, сезонні зміни, час доби, наявність погодних умов і відносно невелику відстань до Землі [5]. Найбільш актуальними задачами перспективної місії на Марсі видаються біологічні, геологічні, палеонтологічні та, можливо, археологічні дослідження. Незважаючи на схожість із Землею, Марс є достатньо агресивним середовищем для будівництва та перебування людей. Дана робота розглядає архітектурно-функціональні особливості проектування та зведення споруд стаціонарної дослідницької колонії на Марсі.

2. ЗАГАЛЬНІ ФІЗИЧНІ, КЛІМАТИЧНІ ТА ГІДРОГЕОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАНЕТИ

Марс значно менший за Землю, в результаті чого прискорення вільного падіння на його екваторі дорівнює 3.711 м/с^2 (0.378 земного) [29]. З одного боку, невелика гравітація спрощує зліт космічних апаратів із поверхні планети та є перевагою при будівництві, з іншого — тривалий вплив низької гравітації на живі організми наразі досліджено мало. Безумовно, це вплине і на майбутні покоління, для яких Марс буде рідною планетою. Їхні біологічні показники будуть дещо змінені і відповідно архітектура повинна це враховувати, пристосовуючись під нові потреби «марсіан». Важливо також відмітити радіацію, природний рівень якої на Марсі у 50 разів вищий, ніж на Землі, через відсутність магнітного поля. Це менше небезпечного рівня для людини [5], проте тривалий радіаційний вплив на людину при постійному перебуванні на поверхні планети або підвищення рівня жорсткого випромінювання під час спалахів на Сонці потребує наразі додаткових досліджень. Розв'язками

проблем радіаційного захисту можуть стати створення штучного магнітного поля чи заглиблення споруд під поверхню планети.

Середньорічна температура на Марсі сягає -63°C [29], а загальний температурний діапазон на планеті становить $-153...+35^\circ\text{C}$ [12]. Температура поверхні протягом доби істотно змінюється. Наприклад, у південній півкулі на широті 50° температура в середині осені змінюється від -18°C (опівдні) до -63°C (увечері) [12]. Температурний режим — один із найважливіших показників при проектуванні споруд, що впливає на вибір матеріалів та внутрішніх підтримувальних систем, і є вагомим параметром при розрахунку конструкцій. Різкі перепади температури можуть спричинити деформації конструкцій та швидку зношуваність матеріалів. Тому матеріали для будівництва повинні бути ретельно підібрані та максимально ефективно відповідати вимогам. Поверхня Марса має дуже низьку теплову інерцію — вона швидко нагрівається, коли на неї світить Сонце. Типові щоденні коливання температури для зон, далеких від полярних областей, становлять до 170°C [12]. На Землі вітри утворюються у районах, де раптово змінюється теплова інерція, наприклад від моря до суші. На Марсі немає морів, але є ділянки, де змінюється теплова інерція ґрунту, що призводить до ранкових та вечірніх вітрів, схожих на морські вітри на Землі. У високих широтах переважають райони високого і низького тиску, які називаються хвилями бароклінічного тиску, а на низьких широтах — циркуляція Хедлі, які відповідають за утворення вітрів. Атмосферний тиск на Марсі в середньому 600 Па (6 мбар), або близько 0.6% від середнього тиску на рівні моря Землі ($101.3 \text{ кПа} = 1.013 \text{ бар}$) [29]. У всіх приміщеннях, де перебуває людина, має підтримуватися стабільна екосистема, тобто необхідний тиск, вологісно-тепловий режим та якісний повітрообмін. Отже, низький атмосферний тиск на поверхні зумовлює необхідність встановлення системи підтримки потрібного для людини тиску (у межах $0.7...1 \text{ бар}$) та врахування різниці тиску при проектуванні споруд, пристроїв і машин. Через те що різниця тиску досить суттєва (78.860 кПа), принцип роботи конструкцій дещо відрізнятиметься від земних.

Атмосфера на Марсі складається з вуглекислого газу (95.9 %), азоту (1.9 %), аргону (2 %) та містить сліди кисню й води [29]. Отже герметизація приміщень необхідна не тільки через різницю тисків, а й через несприятливий склад атмосфери.

В умовах сухості та малого прискорення вільного падіння пил, що підіймається вітрами, в основному залишається в атмосфері довше, ніж на Землі, оскільки опади практично відсутні (крім снігу CO₂). Велика кількість у атмосфері мікрочастинок пилу діаметром приблизно 1.5 нм надають небу рудувато-коричневого відтінку. На Марсі утворюються величезні пилові шторми, які можуть швидко поширюватись на всю поверхню планети. Результати аналізу показують, що під час штормів майже 99 % сонячного світла не досягає поверхні, а це ускладнює видобуток сонячної енергії [22]. Тому на першому етапі функціонування марсіанської місії можливе використання ядерної енергії з поступовим переходом на вітрову, геотермальну та інші джерела енергії. Звісно, сонячні панелі є достатньо потужним джерелом енергії, і більшість часу будуть працювати поряд із атомним реактором, однак фактори ризику занадто великі, щоб використовувати тільки їх.

На основі даних зондування з орбіти, аналізу на поверхні планети та метеоритів, які долетіли до Землі з Марса, вважається, що найбільш поширеними хімічними елементами у марсіанській корі, крім кремнію та кисню, є залізо, магній, алюміній, кальцій і калій [11]. Ці елементи є основними компонентами мінералів, що містять магматичні породи. Менш поширені елементи титан, хром, марганець, сірка, фосфор, натрій та хлор є важливими складовими багатьох допоміжних мінералів у гірських породах та вторинних мінералах у пилу і ґрунті. Водень наявний у вигляді водяного льоду та в гідратованих мінералах. Вуглець — у вигляді вуглекислого газу в атмосфері, а іноді як сухий лід на полюсах. Невизначена кількість вуглецю також зберігається у карбонатах [11]. У 2012 р. марсохід «Curiosity» здійснив перший рентгенодифракційний аналіз марсіанського ґрунту, який показав наявність кількох мінералів, включаючи польовий шпат,

піроксени та олівін. Таким чином, можна припустити, що марсіанський ґрунт у зразку подібний до «вивітрюваних базальтових ґрунтів» Гавайських вулканів [11]. Різноманіття хімічних елементів дає можливість для виготовлення матеріалів, що є важливим чинником для розвитку колонії. Вода — незамінний компонент для систем колонії. Вода не може бути на поверхні Марса у рідкому стані через низький атмосферний тиск, хіба що на короткий час у низинах, але на обох полюсах є крига, яка складається в основному із (70 %) водяного льоду. Також поклади водяного льоду є у поверхневому шарі ґрунту. За допомогою космічного телескопа «Габбл» були виявлені перехідні явища поляризації, відомі як «хмари». Вони оптично тонкі, але сильно поляризовані, і їхнє походження може бути пов'язане з процесами конденсації атмосферного льоду [14, 24]. Отже, загальні фізичні, кліматичні та гідрогеологічні характеристики показують, як середовище впливатиме на колонію. Всі зазначені фактори діють на кожному рівні проектування, і є вагомими для вироблення рішень із будівництва та інтеграції колонії у навколишню екосистему планети.

3. АНАЛІЗ НАЯВНИХ ПРОПОЗИЦІЙ СПОРУД НА МАРСІ ТА ПРАКТИКА БУДІВНИЦТВА У СКЛАДНИХ УМОВАХ НА ЗЕМЛІ

Моделювання умов будівництва і формування середовища для життя на Марсі вже неодноразово ставали предметом проектних пошуків. Істотний вплив у цьому напрямку був зроблений НАСА. У 2015 р. космічне агентство оголосило конкурс «Habitat Challenge», який складався з трьох фаз та передбачав розробку ефективного середовища проживання для екіпажу з чотирьох астронавтів з використанням методів 3D-друку. Представлені проекти оцінювалися за їхньою інноваційністю, раціональністю архітектурного вирішення та рівнем деталізації BIM-моделювання. Тобто, проробка BIM-моделі будівлі як системи, яка складається з архітектурних рішень, конструкцій, технологічних аспектів, різних систем (вентиляції, опалення і т. п.) як на Землі, так і на Марсі є важливим чинником проектування. Проект «Ice House» від

компанії «Clouds Architecture Office» та «SEArch» переміг у першій фазі конкурсу (рис. 1, *а*). Як будівельний матеріал у проєкті запропоновано лід з поверхні Марса, який, окрім доступності, виступає також як протирадіаційне укриття. Житлові приміщення у внутрішній частині споруди захищені приміщеннями для вирощування рослин [13]. Відома компанія «Foster+Partners» та «Branch Technology» стали переможцями другої фази конкурсу (рис. 1, *б*). Їхня концепція передбачає роботу трьох різних видів роботів на поверхні Марса: ті, які копатимуть ґрунт для будівництва, ті, які обробляють реголіт для створення шаруватих стін, і ті, які використовують мікрохвилі для розплавлення і з'єднання матеріалу. Реголіт створює постійний щит для поселення від випромінювань і зовнішніх температур. Будівництво проходить в декілька етапів: спочатку напівавтономні роботи формують 1.5-метровий котлован, а потім потік надувних модулів збирається у котловані, щоб сформувати ядро поселення [17]. У третій фазі конкурсу переміг проєкт MARSNA від «AI SpaceFactory» (рис. 2, *а*). За даними команди MARSNA презентує радикальний відхід від попередніх схем проживання, який базується на куполах або структурах під землею. Форма споруд оптимізована під атмосферний тиск і зовнішні навантаження, вона також забезпечує більший коефіцієнт корисної площі до об'єму [27]. Провідну позицію у розвитку колонізації Марса займає американська компанія «SpaceX», але її розробки головним чином орієнтовані на транспортну систему, а проєкт поселення — допоки на концептуальному рівні. Загалом у плани «SpaceX» входить будівництво міста на Марсі, починаючи із базової інфраструктури: станції з видобутку палива, електростанції та теплиці для вирощування їжі. Споруди колонії є модульними, що надає швидкості та гнучкості для будівництва. Згідно з планом компанії у недалекому майбутньому планується відправка близько мільйона людей на Марс із вартістю квитка в один кінець на рівні 200 000 доларів США. На думку Ілона Маска, голови «SpaceX», ця ціна цілком досяжна, якщо врахувати гіпотетичний потенціал багаторазовості розробленого компанією ракети-носія «Big Falcon Rocket» [9].

Найсуворіші умови на Землі для проведення натурних експериментів все ж далекі від найбільш сприятливих умов на Марсі. Земна Антарктида досить схожа на умови Марса, хоча і має менші перепади і мінімуми температур. Тому проєктування і будівництво на цьому континенті може дати максимально корисний досвід для спорудження місії на Марсі. Допоки у Антарктиді немає постійного поселення людей, а є тільки дослідницькі станції, на яких протягом певного часу перебувають люди, серед них станція НАН України «Академік Вернадський». Варто відзначити «Halley VI» (Велика Британія) — першу у світі дослідницьку модульну станцію, здатну до переміщення (рис. 2, *б*). Вона складається із семи взаємопов'язаних розташованих по прямій лінії модулів, у яких розміщено спальні, лабораторії, кабінети та енергетичний блок. У центрі — просторий двоповерховий червоний модуль із простором для відпочинку [23].

Також є декілька проєктів, в яких імітуються марсіанські умови. Одним із них є дослідницька станція «Mars Desert» від «Mars Society» (рис. 3, *а*). Станцію побудовано біля міста Ханксвіл у штаті Юта (США) в 2000-х роках і її відвідують невеликими групами від одного тижня до трьох місяців, щоб провадити наукові дослідження. До комплексу входять двоповерховий житловий будинок «Hab», теплиця «GreenHab», сонячна обсерваторія «Musk», робототехнічна обсерваторія, інженерна установка RAM і наукова лабораторія «ScienceDome». Тунелі між усіма будівлями, за винятком роботизованої обсерваторії, дозволяють екіпажу переходити між будівлями без скафандра, поки вони перебувають у симуляції [16].

Проєкт «Mars Science City» (рис. 3, *б*) — це ще один крок у напрямку дослідження марсіанських умов на Землі. Уряд Об'єднаних Арабських Еміратів запросив відомого архітектора Б'ярке Інгельса для будівництва прототипу міста Марса у пустелі. Сформований пов'язаними куполами, «Mars Science City» буде мати кілька лабораторій для вирощування продуктів і сільськогосподарських досліджень, а також споруд для видобутку енергії та води [19].

Проаналізувавши наявні проєктні пропозиції споруд на Марсі, можна звернути увагу на до-

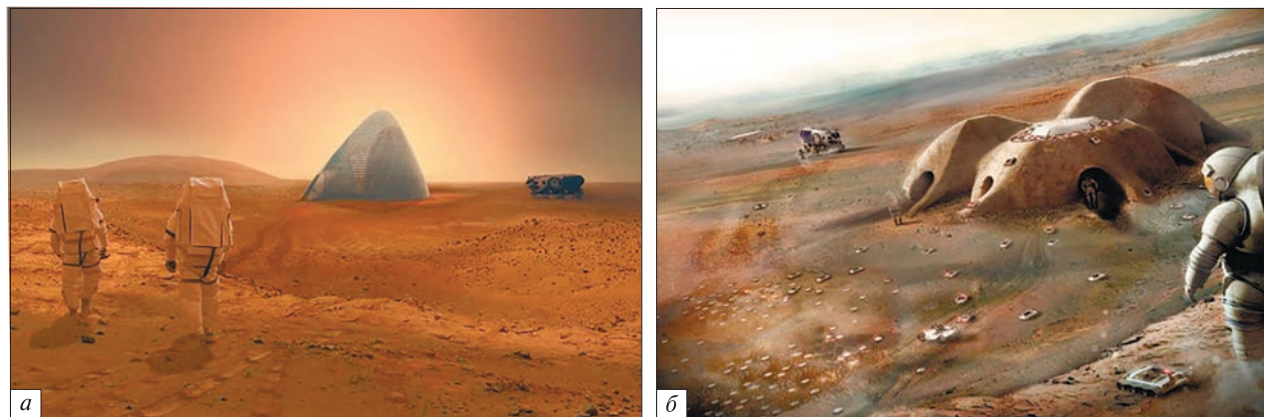


Рис. 1: а — проєкт Ice House від Clouds Architecture Office та SEArch [26], б — проєкт від Foster + Partners та Branch Technology [17]

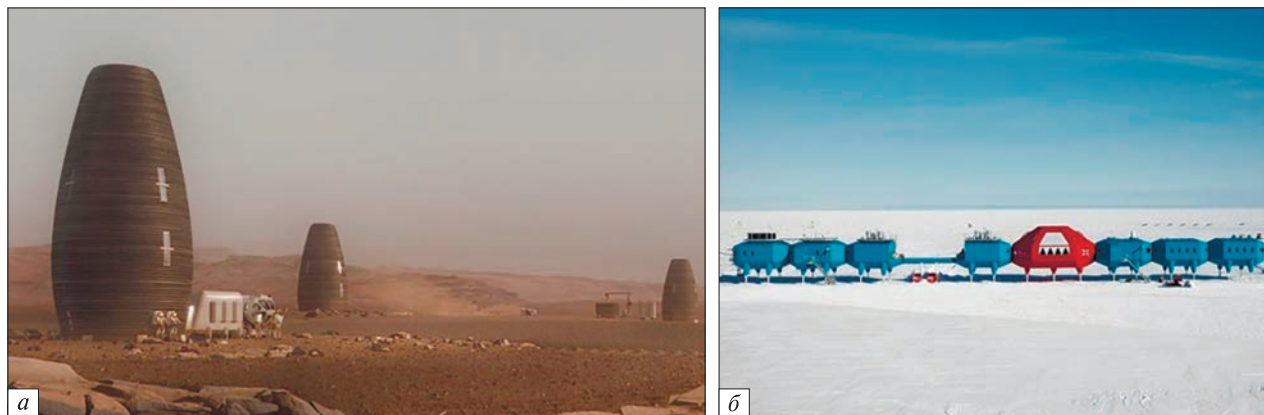


Рис. 2: а — проєкт MARSHA від AI SpaceFactory [27], б — станція Halley VI в Антарктиді [23]



Рис. 3: а — дослідницька станція Mars Desert від Mars Society [16], б — Проєкт Mars Science City від BIG [19]

силь продумані рішення у питаннях захисту від агресивного марсіанського середовища, однак деякі аспекти потребують подальшої проробки. Колонія має функціонувати як квазіавтономна система, навіть на рівні концептуальної пропозиції, і це порушує питання функціональних зв'язків та відповідних технологічних рішень. Також важливим фактором є дослідницька місія як головний чинник архітектурно-планувальних рішень. Варіанти із адаптивними модульними конструкціями є економічними, конструктивно живучими та функціонально гнучкими і можуть бути використані як основний принцип будівництва на Марсі, хоча і потребують значної індустриальності при виготовленні та універсалізації для окремих функціональних блоків.

4. ВИРОБЛЕННЯ ПРИНЦИПІВ ВИБОРУ МІСЦЯ РОЗТАШУВАННЯ КОЛОНІЇ

Станції передбачають тимчасове перебування і повну або часткову залежність від Землі, тоді як колонія для дослідницької місії має бути повністю самодостатнім, стійким утворенням зі сталим розвитком.

Вибір правильного місця — важливий крок для успішного створення першої місії на Марсі. Від цього залежить майбутній розвиток та функціонування колонії. Оскільки транспортування із Землі є економічно не вигідним і довготривалим, необхідно навчитися створювати матеріали, конструкції, прилади тощо із наявних ресурсів планети та вторсировини. Отже, пріоритетною задачею є вибір місця із необхідними умовами та ресурсами.

Щоб проаналізувати наявні виробничі ресурси планети і місцеві кліматичні та ґрунтові умови зі зміною їх у часі, були використані глобальні моделі Марса у вигляді карт із бази даних «Mars Climate Database v5.3» [15]. На основі аналізу розглянуто такі параметри:

1. Кліматичні показники і атмосфера
 - температура атмосфери нижнього шару
 - варіації температури
 - атмосферний тиск
 - середня швидкість вітру
 - видима оптична глибина
2. Ґрунт та поверхня

- щільність ґрунту
- граничний тиск
- температура поверхні
- лід H_2O у ґрунті
- лід CO_2 у ґрунті

3. Елементарний склад атмосфери

- вуглекислий газ
- аргон
- азот
- чадний газ
- озон

4. Випромінювання

- термічне інфрачервоне (потік до поверхні)
- термічне інфрачервоне (потік до космосу)
- сонячне жорстке (потік до поверхні)
- сонячне жорстке (потік відбитий у космос)
- інші типи випромінювань

Також, використовуючи дані карт Європейського космічного агентства (ЄКА) [18], було проаналізовано рельєф планети та поширення таких речовин, як гідрати, олівін, піроксен та оксид заліза, що є одними зі складових ресурсної бази в умовах Марса.

Рельєф значною мірою впливає на вибір місця спорудження, оскільки задає архітектуру та впливає на вибір конструкцій. Найкращим варіантом для будівництва буде скоріш рівнина, оскільки при роботизованому будівництві це економічно вигідний, і з технологічної точки зору простіший варіант з малими ризиками.

Ґрунтуючись на дослідженнях вибору місця для гіпотетичної колонії, було узагальнено відомі та виявлено нові додаткові параметри, орієнтовані на певні цілі. Зокрема, такі дослідження проводилися вченими В. Вамелінг і Л. Шуг з університету Вагенінгена [28], які визначили найбільш сприятливі місця розташування колонії на Марсі, орієнтуючись загалом на потребу вирощування рослин. Вирощування продовольчих культур буде одним із ключових завдань для місії. Незважаючи на те що спочатку рослини будуть вирощуватися у приміщеннях за допомогою аеропоніки, для майбутньої адаптації до поверхні планети необхідно проводити і дослідження із висадки рослин на марсіанський реголіт. Для аеропоніки також необхідні мінерали та вода, яка є у ґрунті у вигляді льоду. З урахуванням на-

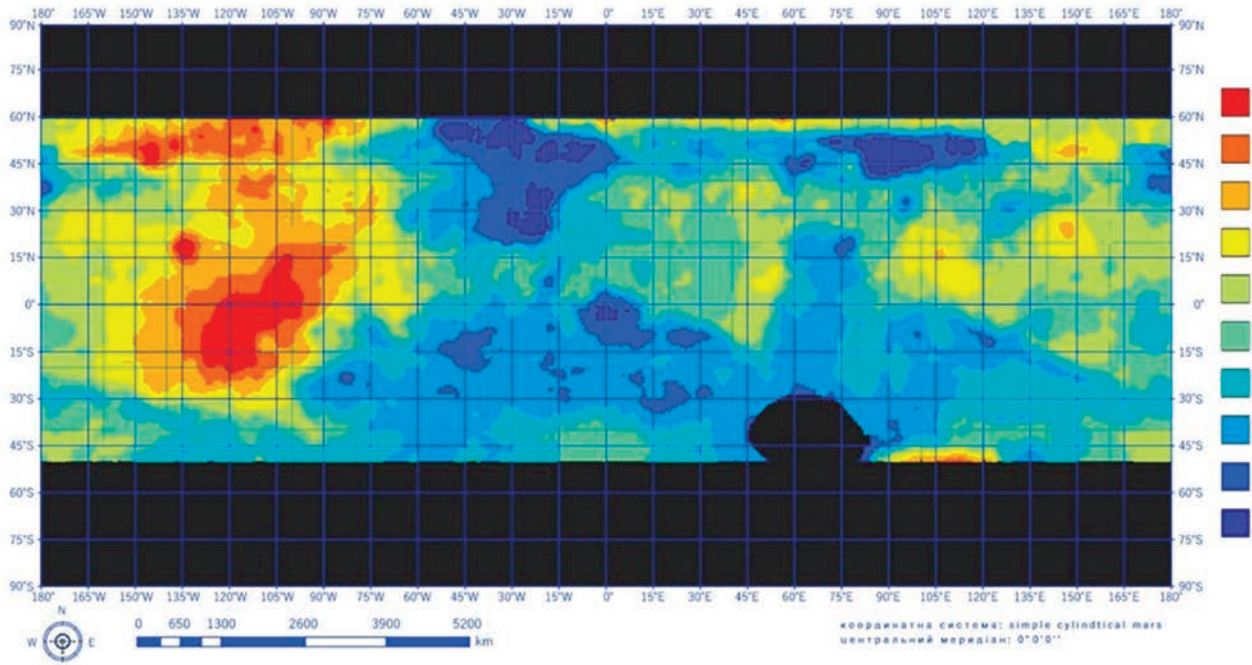


Рис. 4. Карта оціночної градації посадкових майданчиків на Марсі [28]

ведених факторів було отримано карту найбільш придатних місць Марса (рис. 4) [28]. Сині кольори на карті вказують на високий потенціал місць будівництва, червоні кольори — менш придатні місця. Обидва полюси і рівнина Еллада не розглядались через відсутність даних. Для оцінки раціональних місць посадки на Марсі використано декілька марсіанських карт за різними показниками [28]:

1. Склад ґрунту (вміст реголіту, льоду, мінералів, важких металів, калію, хлориду, заліза і кремнію).

2. Рівень радіації.

3. Кліматичні показники.

4. Місцевість (тип рельєфу, перепади висот).

5. Рівень космічного випромінювання.

Карти були об'єднані, і розраховано середній бал по різних ділянках, що за допомогою шкали дало змогу визначити градацію місць посадки [28]. В даному дослідженні ми включили додаткові параметри:

- місця виявлення коливання метану та кисню;
- зона екватора;
- перспективні місця для дослідження;
- місця успішної посадки минулих місій.

Місця виявлення коливання концентрації метану на Марсі, виявлені нещодавно, становлять інтерес для пошуку марсіанського життя, яке може існувати під поверхнею [21, 25]. Основні місця викиду метану в атмосферу були позначені на карті зеленими позначками (рис. 5). Концентрацію метану у кожному місці приведено у частинках на мільярд (ppb). Також останні дослідження вказують на коливання рівня кисню у кратері Гейла [26] (рис. 5). Рівень кисню не відповідає тим же сезонним зразкам, що й інші гази у кратері, зростаючи значно вище, ніж прогнозувалось навесні та влітку, і опускається нижче очікуваного рівня взимку. Причина зміни кількості кисню так само, як і коливання метану, поки що залишається невизначеною.

Зона екватора зменшує витрати для пуску космічних кораблів через меншу силу тяжіння. У подальшому економічна модель колонії передбачає торгівельні та туристичні можливості, видобуток ресурсів як з поверхні, так і з астероїдів тощо, тому космічна транспортна система є важливою частиною колонізації.

Також суттєвим показником для розташування колонії є близькість до місць можливих

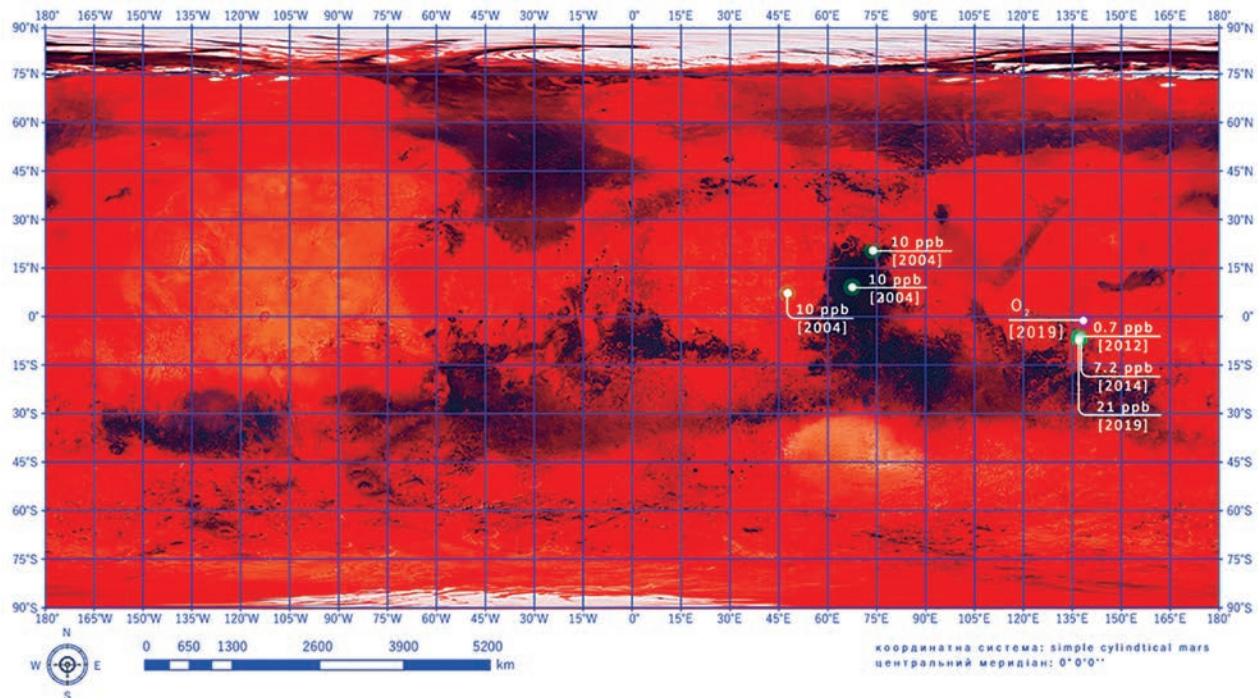


Рис. 5. Карта з місцями виявлення метану та кисню

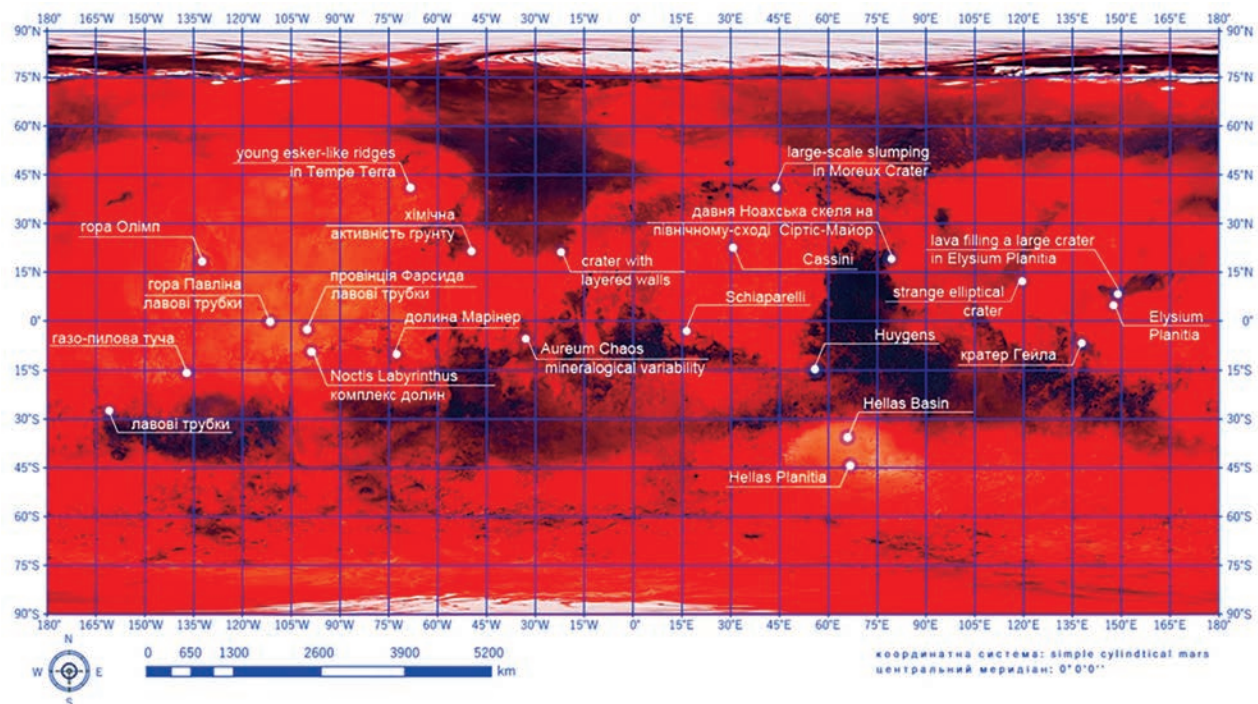


Рис. 6. Карта розташування найбільш значущих аномалій на поверхні Марса

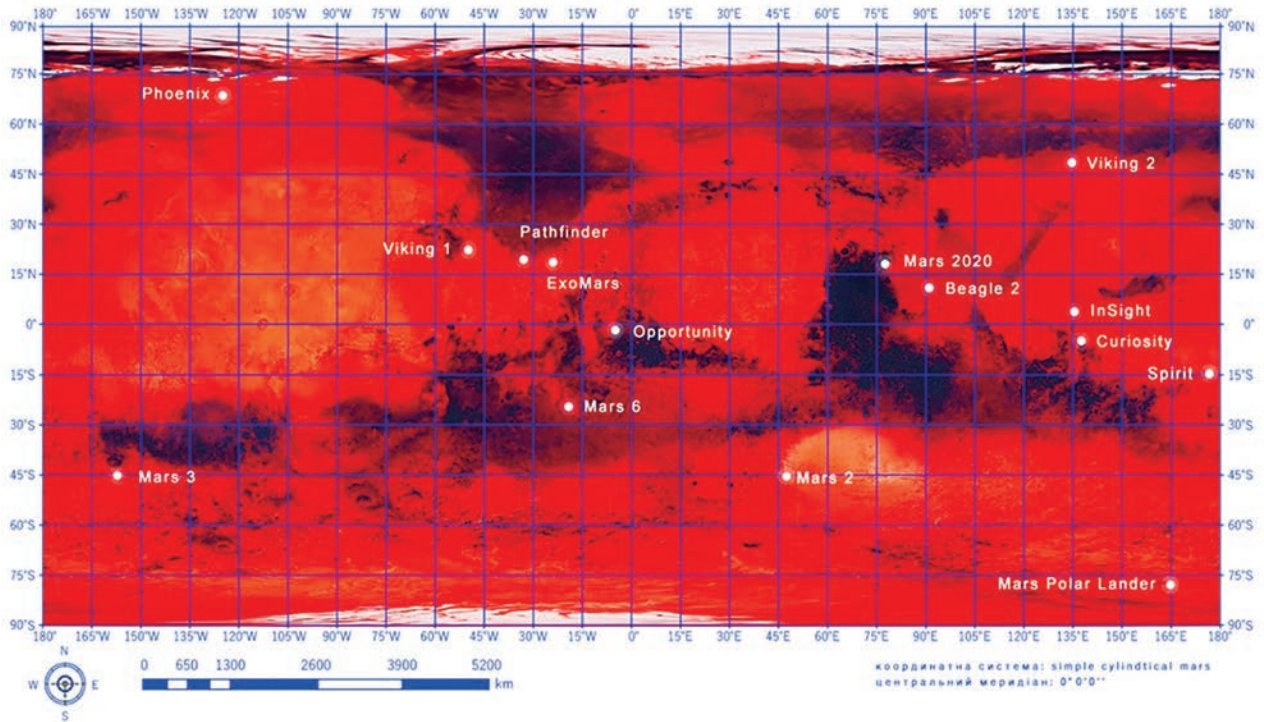


Рис. 7. Місця вдалих посадок дослідницьких апаратів

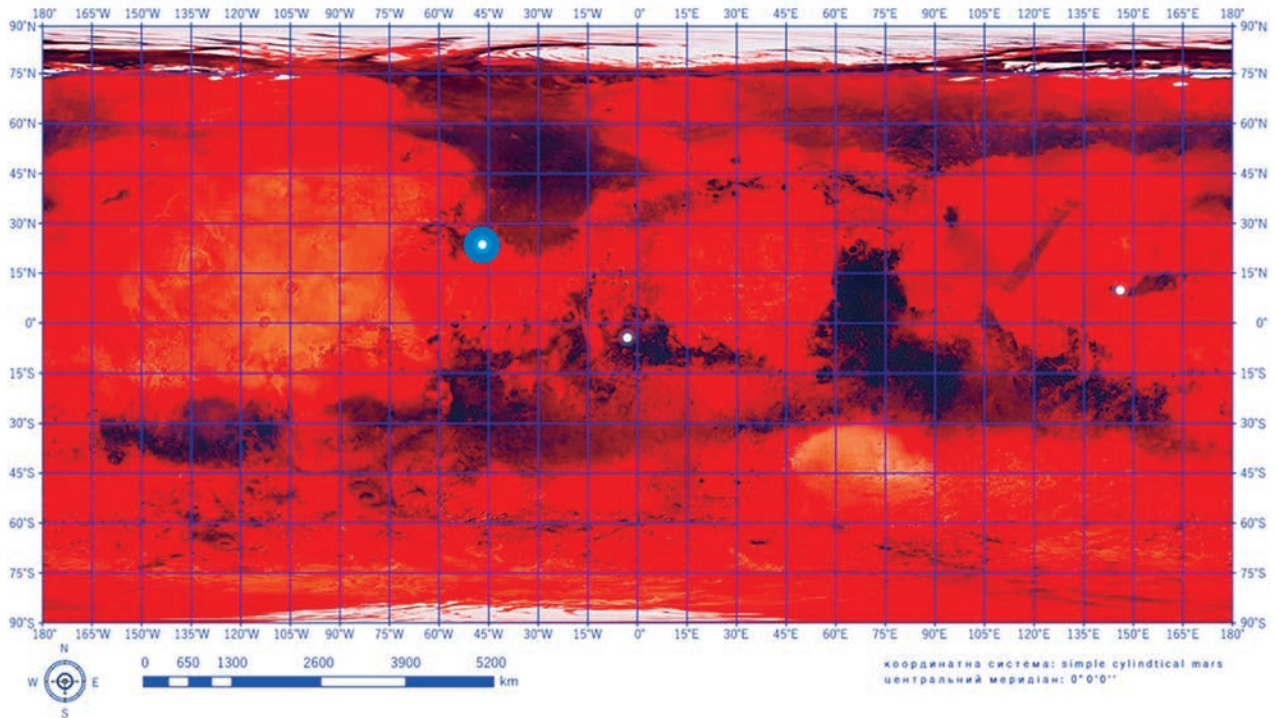


Рис. 8. Карта найбільш оптимальних місць для розташування колонії і пропонує локація

досліджень. Як відомо, вченими та аматорами були виявлені безліч аномалій, які можуть свідчити про невідому тектонічну активність, явища у атмосфері, наявність життя або сліди його діяльності у минулому тощо [10]. Найбільш значущі аномалії винесено нами на загальну мапу (рис. 6). Місця посадки минулих вдалих місій були позначені на рис. 7. Ці місця найбільш досліджені і мають достатньо відомі показники клімату, мікрорельєфу, ґрунтових умов тощо, що знижує ризики для будівництва і експлуатації колонії. Отже, після аналізу даних з наведених вище мап було відмічено три найраціональніші місця для розташування колонії, з-поміж яких експерти обрали найбільш придатне (рис. 8). Основними узагальнюючими критеріями вибору визначено близькість до місця висадки «Viking 1» і «Mars Pathfinder», де вже відома територія і відносно сприятлива кліматична зона.

5. ПРОПОНОВАНІ ЕТАПИ РОЗБУДОВИ НА МАРСІ

Від етапності освоєння і будівництва залежить не тільки відсоток наявної матеріально-ресурсної бази для будівництва, а й кількість людей, а отже, площа будівлі. Виокремлюють чотири етапи колонізації Марса [30]:

- дослідження,
- базове будівництво,
- розширення,
- тераформінг.

Фаза досліджень Марса триває вже деякий час, поки що за допомогою телескопічних і робото-технічних зйомок. Її метою є вирішення основних наукових питань, що стосуються історії Марса як планети, проведення обстеження на наявність ресурсів на планеті, визначення оптимальних місць для майбутньої місії, а також встановлення способу, за допомогою якого люди можуть подорожувати до Марса і жити там [30].

Суть базового етапу будівництва полягає у проведенні сільськогосподарських, промислових, хімічних та інженерних пошуків із виробництва на Марсі, щоб опанувати максимальну кількість методів, необхідних для перетворення марсіанської сировини на корисні ресурси. Перші розвідувальні місії використовуватимуть марсіанське повітря для переробки його у паливо і

кисень. На етапі базового будівництва цей елементарний рівень використання місцевих ресурсів має перейти до видобутку води, вирощування рослин, виробництва кераміки, скла, металів, пластмас, інших матеріалів для інструментів і конструкцій тощо [30].

Початкова фаза досліджень на Марсі може бути виконана невеликим екіпажем (4...6 членів) чи взагалі засобами робототехніки. Фаза базового будівництва дасть змогу збільшити кількість людей до 50...100 осіб і оснастити обладнанням та джерелами енергії. Метою фази базового будівництва є опанування методів і засобів виробництва ресурсів для можливості розвитку місії, а також подальше вивчення планети [30].

Саме для цього етапу ми дослідили функціональні зв'язки та запропонували архітектурні рішення. Кількість людей для поселення прийнята умовно 100 осіб, із можливістю подальшого модульного розширення до 500. Ця цифра зумовлена як сучасними можливостями транспортної системи, так і необхідністю у певній кількості персоналу та робочої сили для даного етапу. Якщо марсіанська місія буде стійкою, буде перспектива діяти у напрямку розширення і тераформінгу планети, а це можливо тільки на основі досліджень і зваженої взаємодії із екосистемами Марса. Таким чином, освоєння Марса у певному сенсі є наслідком економічної життєздатності колонії.

6. ІЄРАРХІЯ ФУНКЦІЙ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНА СХЕМА КОЛОНІЇ

Після вибору місця, обґрунтування необхідної кількості людей та зазначення етапу у загальній системі дослідження планети, на якому будується колонія, необхідно проаналізувати, які функціональні зони включатиме місія. Колонія — це квазізамкнена система, яка має свій «життєвий цикл» з використанням лише власних і наявних на планеті ресурсів. Отже, для створення зонування необхідно розуміти, як співвідносяться окремі функції місії. Для цього було розроблено схему ієрархії функцій (рис. 9), у основу якої покладено повний «життєвий цикл» колонії [3, 4]. У системі можна виділити такі **головні функції: дослідницька, житлова і транспортна**. Виробни-



Рис. 9. Ієрархія функцій дослідницької місії

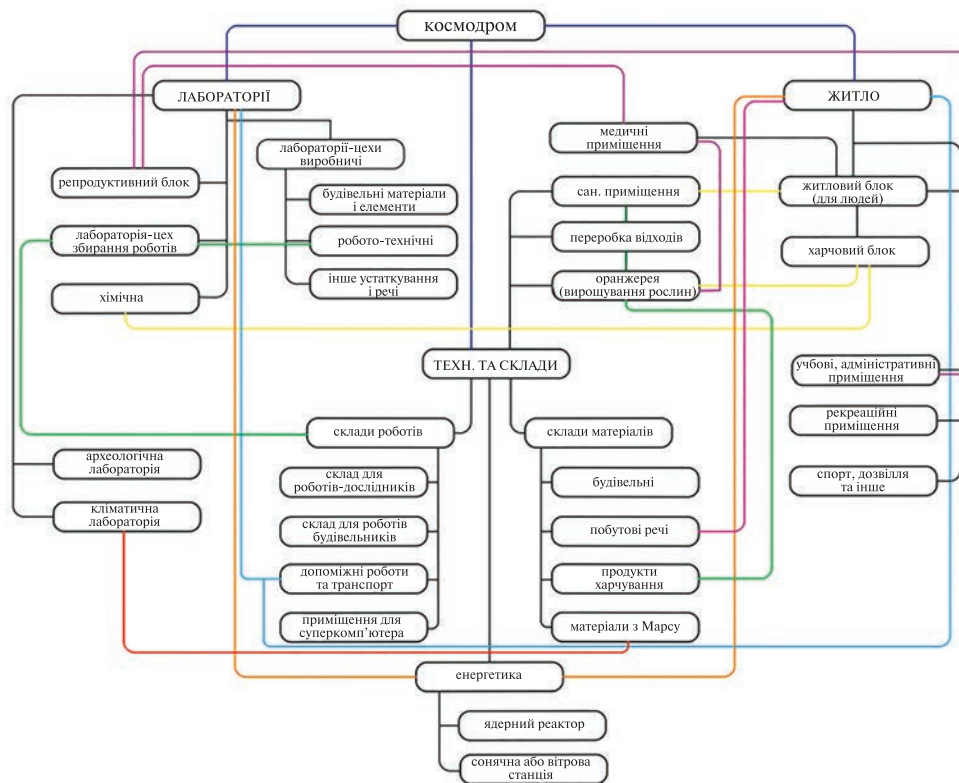


Рис. 10. Схема функціональних зв'язків для приміщень і споруд місії

цтво та переробка є додатковими функціями, які мають інтегруватися з основними і обслуговувати їх.

Дослідницькі функції поділяються на дві групи: ті, що пов'язані насамперед із дослідженням планети, і ті, які можуть бути корисніші саме для розвитку колонії, чи більш загальні. На етапі становлення колонії потреба у ресурсах буде нагальною, саме тому дослідження заради видобутку ресурсів будуть першочерговими. Потім, коли виробництво буде налагоджене, основною метою буде пошукова, археологічно-дослідницька місія.

Транспортна функція включає також дві основні групи — переміщення по поверхні планети та поза поверхнею планети, зокрема космічне сполучення.

Житлова функція визначена потребами людей і включає всі приміщення та системи для їхнього максимально комфортного і безпечного перебування на планеті.

Виробничу функцію представлено потребою у матеріалах та конструкціях для підтримки та розвитку колонії. Виробництво є необхідною складовою замкненого циклу колонії, що можна визначити як показник стійкості.

Функція переробки призначена як зменшити відходи колонії, запускаючи їх назад у ланцюжок обігу ресурсів життєвого циклу і утилізуючи те, що неможливо переробити, так і з метою мінімізувати вплив на екологію. Забруднення відходами іншої планети є неприпустимим.

На основі ієрархії функцій було розроблено схему функціонального призначення споруд. На рис. 10 кольорами показано основні взаємозв'язки приміщень для розміщення функціональних систем колонії.

Житлова функція втілюється у об'ємному блоці житлових приміщень зі спортивним комплексом, рекреаційними зонами та іншими системами, необхідними для перебування людей. Дослідницьку функцію забезпечує блок лабора-

торій, різних за призначенням, але з можливістю суміщення та модульної перебудови. Транспортна функція представлена космодромом, окремими модулями для наземних рухомих одиниць та блоками обслуговування. Через велику кількість технічних систем, роботів та матеріалів виникає технічно-складський блок. До цього блоку можна також віднести всі споруди виробничої функції, оранжерею, як своєрідний осередок виробництва продуктів харчування, та блок переробки.

На основі описаної схеми було розроблено модулі споруд та обумовлені раціональні зв'язки між ними, що дозволило оптимізувати колонію як систему з гнучкими відношеннями функцій та можливістю їхньої зміни. Таким чином, майже на кожен із функцій розроблено свій модуль, відповідний до загальних потреб [3, 4].

7. ВИСНОВКИ І ОБГОВОРЕННЯ

Дослідження Марса і створення на цьому стаціонарної автономної місії є безумовно великим кроком для космічного майбутнього людства. Проаналізовано наявні дані про планету як середовище існування і фактори, що впливають на системи колонії. Показано, які місцеві ресурси можна використати при будівництві і як середовище впливатиме на споруди. Вибір місця посадки є необхідною умовою успішного створення першої колонії на Марсі. Опираючись на глобальні дані згідно з обраними критеріями, було

проаналізовано територію задля виявлення найкращого місця розташування колонії. Після аналізу даних було запропоновано місце будівництва — територія біля посадки місії «Вікінг-1» у північній півкулі Марса. Безумовно, із накопиченням нових даних необхідний глибший та детальніший аналіз на основі описаних і можливо нових критеріїв. Із варіантів спорудження: на поверхні, під поверхнею, часткове занурення, над поверхнею — пропонується комбінований варіант — на поверхні і часткове занурення, що зменшує витрати та водночас дозволяє використати реголіт як захист від випромінювань. У майбутньому, після ретельних досліджень, для розміщення споруд можливо використати природні порожнини під поверхнею Марса, такі як лавові трубки.

Із визначення головних дослідницьких цілей місії розроблено структуру ієрархії функцій, що у свою чергу дозволило зробити функціональну схему споруд колонії та визначити доцільні функціональні зв'язки між спорудами і окремими приміщеннями. Живучість споруд пропонується досягати за рахунок їхньої конструктивної надійності, модульності, дублювання і диверсифікації систем забезпечення.

Проектування на іншій планеті перш за все має на меті не ізолюваність, а синтез з існуючою екосистемою. Використання планетарних ресурсів та створення колонії з повним замкненням життєвим циклом, незалежної від Землі, є основною передумовою успіху місії. Зведені фактори

Умови та ресурси для спорудження і функціонування місії на перших двох фазах

Параметр умов	Фаза дослідження (первинне вирішення)	Фаза базового будівництва (стійка колонія)
Кисень	Рослини у оранжереї, рециркуляція, видобуток із води, вуглекислого газу	Рослини на ґрунті, адсорбція із повітря
Вода	Лід, рециркуляція	Рідка вода, рослини, адсорбція із повітря
Енергія, паливо	Ядерна, вітрова, сонячний колектор	Геотермальна, сонячні батареї, біопаливо
Будівельні матеріали	Лід, природні утворення, реголіт	Сталь, пластики, кераміка, скло тощо
Їжа	Рослини у оранжереях	Рослини на ґрунті
Виробничі матеріали	Переробка, видобуток з поверхні	Видобуток із під поверхні
Магнітне поле	Локальні джерела	Глобальні генератори, часткова адаптація
Радіація	Укриття, засоби захисту	Атмосферний захист, часткова адаптація
Температура	Укриття, засоби захисту	Атмосферний захист
Гравітація	Підтримання, спецкостюми, реабілітація	Повна або часткова адаптація

існування, потреби у ресурсах для спорудження і функціонування місії та можливі напрямки їхнього первинного (фаза дослідження), та додаткового отримання після утворення стійкої колонії (50...100 років, фаза будівництва і далі) наведено у таблиці.

Ми розглянули лише частину того широкого кола технічних, транспортних, фінансових та інших задач, які складають комплексну проблематику забудови на Марсі. Спрямовання зусиль людства від непродуктивної діяльності (війн, переспоживання тощо) до активного пізнання навколишнього космосу дасть розуміння про походження життя на Землі, збільшить стійкість нашої власної цивілізації та досягнення нею вищих рівнів розвитку у всесвітньому масштабі [1]. Надскладні задачі дослідження космосу висту-

пають тригерами розвитку земних технологій, водночас розвиток технологій у космосі та на інших космічних тілах дає, окрім нової продукції, вторинний ефект поступу для Землі.

Україна — одна з небагатьох у світі держав, яка має ресурси, потенціал та інституціональні можливості для виробництва більшості видів власної аерокосмічної продукції. Космічна програма України на 2018—2022 роки [6] зокрема передбачає широке міжнародне співробітництво з державними та приватними структурами у сфері будівництва космічних комплексів. І дослідницька місія на Марс може стати одним із ефективних напрямків такого співробітництва. Україна як держава із розвинутою космічною і будівельною галузями має потенціал долучитися до світової місії пізнання Сонячної системи.

ЛІТЕРАТУРА

1. Білик А., Кириченко О. Аномалії та неминучість космічного майбутнього людства. *Anomalous phenomena: methodology and practice of research*. Зб. наук. праць під ред. А. С. Білика. Київ: Політехніка, 2015. С. 7.
2. Вернадский В. *Научная мысль как планетное явление*. Москва: Наука, 1991. 268 с.
3. Гребенєва І. *Модульні сталеві конструкції споруд для марсіанської місії: ... бакалаврська робота*. Київ: Київ. нац. ун-т будівництва і архітектури, 2019. 155 с.
4. Гребенєва І. *Формування архітектури на Марсі. Алгоритми штучного інтелекту: ... магістерська робота*. Київ: Київ. нац. ун-т будівництва і архітектури, 2019. 110 с.
5. Зубрин Р. *Как выжить на Марсе: Надежное пособие по выживанию и процветанию на Красной планете*. Москва: Эксмо, 2015. 208 с.
6. *Про схвалення Концепції Загальнодержавної цільової науково-технічної космічної програми України на 2018—2022 роки*: Розпорядження Кабінету Міністрів України, опубл. 5 вересня 2018. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/629-2018-%D1%80#n8> (дата звернення: 31.07.2019).
7. Саган К. *Космос*. Санкт-Петербург: Амфора, 2005. 448 с.
8. Урсул А. Д., Рубцов В. В., Абдуллаєв А. В. и др. *Освоение космоса и проблемы экологии*. Кишинев: Штиинца, 1990. 272 с.
9. Хижняк Н. *Амбициозные и безумные планы Илона Маска по колонизации Марса на ближайшее столетие*. 2018. URL: <https://hi-news.ru/technology/ambicioznye-i-bezumnye-plany-ilona-maski-po-kolonizacii-marsa-na-blizhajshee-stoletie.html> (дата звернення: 20.07.2019).
10. Циолковский К. *Жизнь в межзвездной среде*. Москва: Наука, 1964. 84 с.
11. Brown D., Webster G., Hoover R. *NASA rover's first soil studies help fingerprint martian minerals*. 2012. URL: https://www.nasa.gov/home/hqnews/2012/oct/HQ_12-383_Curiosity_CheMin.html (дата звернення: 31.07.2019).
12. *Extreme Planet Takes Its Toll*. Jet Propulsion Laboratory. The California Institute of Technology. 2007. URL: <https://mars.nasa.gov/mer/spotlight/20070612.html>. (дата звернення: 20.07.2019).
13. *Ice House*. SEArch. 2015. URL: <http://www.marsicehouse.com/> (дата звернення: 20.07.2019).
14. Kaydash V., Kreslavsky M., Shkuratov Yu., Videen G., Bell J., Wolff M. Measurements of winds on Mars with Hubble Space Telescope images in 2003 opposition. *Icarus*. 2006. **185**. P. 97—101.
15. Mars Climate Database v5.3: The Web Interface. URL: http://www-mars.lmd.jussieu.fr/mcd_python/ (дата звернення: 20.07.2019).
16. Mars Desert Research Station. Mars Society. 2019. URL: <https://mdrs.marssociety.org/about-the-mdrs/> (дата звернення: 20.07.2019).

17. Mars Habitat. Foster+Partners. 2015. URL: <https://www.fosterandpartners.com/projects/mars-habitat/> (дата звернення: 20.07.2019).
18. Mars Mineralogy. ESA. 2013. URL: https://www.esa.int/spaceinimages/Images/2013/05/Mars_mineralogy (дата звернення: 20.07.2019).
19. Mars Science City. BIG. 2019. URL: <https://big.dk/#projects-mars> (дата звернення: 20.07.2019).
20. Master Evidence Directory. Mars Anomaly Research. 2014. URL: <http://www.marsanomalyresearch.com/evidence-directories/9-master/master-directory.htm> (дата звернення: 31.07.2019).
21. Methane on Mars. Wikipedia. 2019. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Methane_on_Mars (дата звернення: 31.07.2019).
22. *NASA Mars Rovers Braving Severe Dust Storms*. Jet Propulsion Laboratory. The California Institute of Technology. 2007. URL: <https://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?release=2007-080> (дата звернення: 20.07.2019).
23. Rackard N. *The world's first relocatable research center opens in Antarctica*. 2013. URL: <https://www.archdaily.com/330453/the-worlds-first-relocatable-research-center-opens-in-antarctica> (дата звернення: 20.07.2019).
24. Shkuratov Yu., Kreslavsky M., Kaydash V., Videen G., Bell J., Wolff M., Hubbard M., Noll K., Lubenow A. Hubble space telescope imaging polarimetry of Mars during the 2003 opposition. *Icarus*. 2005. **176**. P. 1–11.
25. *Simulated levels of methane in the martian atmosphere — lifetime of 200 days*. ESA. 2009. URL: <http://sci.esa.int/mars-express/45388-simulated-levels-of-methane-in-the-martian-atmosphere/> (дата звернення: 31.07.2019).
26. Trainer M. G., Wong M. H., McConnochie T. H. *Seasonal Variations in Atmospheric Composition as Measured in Gale Crater, Mars*. 2019. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2019JE006175> agupubs.onlinelibrary.wiley.com (дата звернення: 09.03.2020).
27. Walsh N. *NASA Endorses AI SpaceFactory's vision for 3D printed huts on Mars*. 2018. URL: <https://www.archdaily.com/898901/nasa-endorses-ai-spacefactorys-vision-for-3d-printed-huts-on-mars> (дата звернення: 20.07.2019).
28. Wamelink G.W. *The ideal settlement site on Mars — hotspots if you asked a crop*. 2018. URL: <https://www.wur.nl/en/newsarticle/The-ideal-settlement-site-on-Mars-hotspots-if-you-asked-a-crop.htm> (дата звернення: 20.07.2019).
29. Williams D. *Mars Fact Sheet*. 2018. URL: <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/marsfact.html>. (дата звернення: 20.07.2019).
30. Zubrin R. *The economic viability of Mars colonization*. 1998. URL: <https://www.aleph.se/Trans/Tech/Space/mars.html> (дата звернення: 20.07.2019).

Стаття надійшла до редакції 08.08.2019

REFERENCES

1. Bilyk A., Kirichenko O. (2015) *Anomalous phenomena: methodology and practice of research research*: Issue of scientific articles. Kyiv: Polytechnica, 2015 [in Ukrainian].
2. Vernadsky V. (1991). *Scientific thought as a planetary phenomenon*. Moscow: Nauka [in Russian].
3. Hrebenieva I. (2019). *Formation of architecture on Mars. Artificial intelligence algorithms*: ... Master's Thesis. Kiev: Kiev National University of Civil Engineering and Architecture [in Ukrainian].
4. Hrebenieva I. (2019). *Modular steel structures for Martian mission*: Bachelor's Thesis. Kiev: Kiev National University of Civil Engineering and Architecture [in Ukrainian].
5. Zubrin R. (2015). *How to Live on Mars: A Trusty Guidebook to Surviving and Thriving on the Red Planet*. Moscow: Eksmo [in Russian].
6. The Cabinet of Ministers of Ukraine (2018, September 5) Order. On approval of the concept of the national target scientific and technical space program of Ukraine for 2018–2022. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/629-2018-%D1%80#n8> (Last accessed: 31.07.2019) [in Ukrainian].
7. Sagan C. (2005). *Cosmos*. St. Petersburg: Amphora [in Russian].
8. Ursul A. D., Rubtsov V. V., Abdullaev A. V., et al. (1990). *Space exploration and environmental problems*. Chisinau: “Stiince” [in Russian].
9. Hizhnyak N. (2018, October 16) *Elon Musk's ambitious and insane plans to colonize Mars for the next century*. URL: <https://hi-news.ru/technology/ambicioznye-i-bezumnye-plany-ilona-maski-po-kolonizacii-marsa-na-blizhajshee-stoletie.html> (Last accessed: 20.07.2019) [in Russian].
10. Tsiolkovsky K. (1964). *Interstellar life*. Moscow: Nauka [in Russian].
11. Brown D., Webster G., Hoover R. (2012). *NASA rover's first soil studies help fingerprint martian minerals*. URL: https://www.nasa.gov/home/hqnews/2012/oct/HQ_12-383_Curiosity_CheMin.html (Last accessed 31.07.2019).
12. *Extreme planet takes its toll*. (2007). Jet Propulsion Laboratory. The California Institute of Technology. URL: <https://mars.nasa.gov/mer/spotlight/20070612.html> (Last accessed: 20.07.2019).
13. *Ice House*. (2015). SEArch. URL: <http://www.marsicehouse.com/> (Last accessed 20.07.2019).

14. Kaydash V., Kreslavsky M., Shkuratov Yu., Videen G., Bell J., Wolff M. (2006). Measurements of winds on Mars with Hubble Space Telescope images in 2003 opposition. *Icarus*, **185**, 97–101.
15. *Mars Climate Database v5.3: The Web Interface*. URL: http://www-mars.lmd.jussieu.fr/mcd_python/. (Last accessed: 20.07.2019).
16. *Mars Desert Research Station*. (2019). Mars Society. URL: <https://mdrs.marssociety.org/about-the-mdrs/>. (Last accessed: 20.07.2019).
17. *Mars Habitat*. (2015). Foster+Partners. URL: <https://www.fosterandpartners.com/projects/mars-habitat/>. (Last accessed: 20.07.2019).
18. *Mars Mineralogy*. (2013). ESA. URL: https://www.esa.int/spaceinimages/Images/2013/05/Mars_mineralogy. (Last accessed: 20.07.2019).
19. Mars Science City. (2019). BIG. URL: <https://big.dk/#projects-mars>. (Last accessed 20.07.2019).
20. *Master Evidence Directory*. (2014). Mars Anomaly Research. URL: <http://www.marsanomalyresearch.com/evidence-directories/9-master/master-directory.htm>. (Last accessed: 31.07.2019).
21. *Methane on Mars*. (2019). Wikipedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Methane_on_Mars. (Last accessed 31.07.2019).
22. *NASA Mars Rovers Braving Severe Dust Storms*. (2007). Jet Propulsion Laboratory. The California Institute of Technology. URL: <https://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?release=2007-080>. (Last accessed: 20.07.2019).
23. Rackard N. (2013). *The world's first relocatable research center opens in Antarctica*. URL: <https://www.archdaily.com/330453/the-worlds-first-relocatable-research-center-opens-in-antarctica>. (Last accessed: 07.20.2019).
24. Shkuratov Yu., Kreslavsky M., Kaydash V., Videen G., Bell J., Wolff M., Hubbard M., Noll K., Lubenow A. (2005). Hubble space telescope imaging polarimetry of Mars during the 2003 opposition. *Icarus*, **176**, 1–11.
25. *Simulated levels of methane in the martian atmosphere — lifetime of 200 days*. (2009). ESA. URL: <http://sci.esa.int/mars-express/45388-simulated-levels-of-methane-in-the-martian-atmosphere/> (Last accessed: 31.07.2019).
26. Trainer M. G., Wong M. H., McConnochie T. H. (2019). *Seasonal Variations in Atmospheric Composition as Measured in Gale Crater, Mars*. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2019JE006175> agupubs.onlinelibrary.wiley.com (Last accessed: 09/03.2020).
27. Walsh N. (2018). *NASA Endorses AI SpaceFactory's vision for 3D printed huts on Mars*. URL: <https://www.archdaily.com/898901/nasa-endorses-ai-spacefactorys-vision-for-3d-printed-huts-on-mars> (Last accessed: 20.07.2019).
28. Wamelink G. W. (2018). *The ideal settlement site on Mars — hotspots if you asked a crop*. URL: <https://www.wur.nl/en/news-article/The-ideal-settlement-site-on-Mars-hotspots-if-you-asked-a-crop.htm> (Last accessed: 20.07.2019).
29. Williams D. (2018). *Mars Fact Sheet*. URL: <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/marsfact.html> (Last accessed: 07.20.2019).
30. Zubrin R. (1998). *The economic viability of Mars colonization*. URL: <https://www.aleph.se/Trans/Tech/Space/mars.html> (Last accessed: 20.07.2019).

Received 08.08.2019

A. Bilyk^{1,2,3}, Master Engineer, Ph.D. in Tech., Cert. Engineer, Associate Professor

I. Hrebenieva¹, Bachelor Engineer, Master of Architecture

¹ Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture

31 Povitroflotsky Ave., Kyiv, 03680 Ukraine

² Ukrainian Scientific Research Center for Analyses of Anomalies “Zond” (SRCAA “Zond”)

in National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

37 Peremohy Ave., Kyiv, 03056 Ukraine

³ Aerospace society of Ukraine

11 Malevich Str., Kyiv, 03680 Ukraine

FEATURES OF THE DESIGN OF STRUCTURES IN THE CONDITIONS OF MARS

The article discusses the basic physical parameters and climatic features of Mars as a possible site for the construction of the first stationary research mission. They are the main factors of influence in the development of building structures for this planet. The analysis includes existing project proposals for buildings on Mars and effective means of protecting them against the negative impact of the environment, taking into account the experience of construction in complicated conditions on Earth. The detailed analysis of data allowed us to determine the parameters for the choice of location for building a colony. The parameters include soil composition, climatic indicators, terrain, level of cosmic radiation, methane fluctuations places, the equator zone, promising places for research, and successful landing places of the previous missions. Based on this, we justified the choice of

the building complex location, which is the decisive factor for construction. An important aspect is also the determination of the planet colonization stages and the building requirements based on the needs of the colony.

A project proposal has been developed for the second stage of planetary colonization. A colony is a quasi-closed system with its own “life cycle”, consuming only its own resources and available resources of the planet.

The viability parameters of the project determine the full colony “life cycle”. We propose the hierarchical system of functions of the research mission complex. It includes five main functions: research, transport, residential, production, and recycling. The principle of hierarchy is used for the development of functional parameters of premises and the determination of links between them. In general, three blocks can be distinguished: residential, scientific, technical, and warehouse, which is organically interconnected. The system of functions is maximally optimized for human needs in Martian conditions and is designed to integrate artificial intelligence into the colony. However, the problems considered in the article are only a part of a wide range of technical, transport, financial, and other tasks that make up the range of issues of Mars development.

Keywords: Mars, climat features of Mars, colonization, choice of place for construction, archaeological research mission, function hierarchy, Martian anomalies research, functional scheme.