

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2024, Том 16, № 2 / 2024, Vol. 16, Iss. 2 <https://esj.today/issue-2-2024.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/95SAVN224.pdf>

2.1.14. Управление жизненным циклом объектов строительства (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Сазонова, С. А. Обзор природных и климатических условий для строительства стационарных баз на Луне / С. А. Сазонова, В. В. Белов, А. В. Гордеев, Б. А. Пугачёв // Вестник евразийской науки. — 2024. — Т. 16. — № 2. — URL: <https://esj.today/PDF/95SAVN224.pdf>

For citation:

Sazonova S.A., Belov V.V., Gordeev A.V., Pugachev B.A. An overview of the natural and climatic conditions for construction of stationary bases on the Moon. *The Eurasian Scientific Journal*. 2024;16(2): 95SAVN224. Available at: <https://esj.today/PDF/95SAVN224.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.)

УДК 69.001.5; 624.131.31; 523.3-1/-8; 523.34-834

Сазонова Светлана Андреевна

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
Москва, Россия

E-mail: s.sazonovaa17@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4025-2053>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1150727

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=58835541000>

Белов Вячеслав Васильевич

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
Москва, Россия

Доцент кафедры «Строительства объектов тепловой и атомной энергетики»

Кандидат технических наук

E-mail: BelovVV@mgsu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6246-6100>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=771281

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57218418373>

Гордеев Алексей Владимирович

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
Москва, Россия

Доцент кафедры «Сопротивления материалов»

Кандидат технических наук, доцент

E-mail: BelovVV@mgsu.ru

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=658874

Пугачёв Борис Александрович

Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» по реализации капитальных проектов, Москва, Россия

Главный инженер проекта АЭС-2006

E-mail: barougachev@gmail.com

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1249679

Обзор природных и климатических условий для строительства стационарных баз на Луне

Аннотация. Развитие процессов освоения дальнего космоса является поступательным. Так первоначально, необходимо обеспечить отладку технологий, цепочек производственных процессов, в ряде случаев, организовать добычу полезных ископаемых для реализации, например, дозаправки космических аппаратов и ряда других операций.

Вместе с тем, любое хозяйственное освоение на иных небесных телах кроме Земли, в случае концепции стационарных баз, неизбежно затрагивает строительные процессы и технологии.

Рассматривая Луну как возможность сделать первый шаг в указанном выше направлении, появляется прямая необходимость в систематизации и учете широкого круга факторов, обусловленных, прежде всего, природно-климатическими условиями, и особенностями размещения объектов на иных небесных телах.

Так, в данной работе, путем обзора открытых источников научно-технической информации, были установлены: температурные условия, общие особенности климата Луны, включая силу тяжести, частоту падения космических тел на поверхность спутника, данные о сейсмической активности и соответствующего откликах грунта. В результате, сделаны выводы, о том, что из перечисленного оказывает наибольшее влияние на выбор площадки для будущего строительства и связанные с этим конструктивные особенности сооружений при развертывании стационарных баз на поверхности Луны.

Отмечено, что при выборе площадки необходимо обеспечить некий баланс между наиболее целесообразным размещением и принятыми конструктивными решениями сооружений стационарных баз. С этой позиции, авторами приводятся примеры наиболее перспективных площадок для развертывания таких баз.

Ключевые слова: природно-климатические условия Луны при ее хозяйственном освоении; температурные параметры; сейсмичность; отклик грунта по распространению сейсмических волн; падение космических тел на поверхность Луны; ионизирующее излучение; выбор площадки строительства на Луне; рекомендации к конструкции сооружений

Введение

Вопрос освоения космического пространства в наши дни весьма актуален, о чем свидетельствует принятая Федеральная программа России на 2016–2025 годы (утв. Постановлением Правительства от 23 марта 2016 г. № 230), согласно которой предполагается углубленное исследование Луны с окололунной орбиты и на ее поверхности.¹

Луна, как ближайший спутник Земли, рассматривается главным образом с целью добычи гелия-3 (редкого для земных условий) [1], кроме того, служит хорошим полигоном для оттачивания технологий освоения дальнего космического пространства и в какой-то степени может служить перевалочной базой при этом освоении² [2; 3]. Так или иначе, любая хозяйствующая деятельность на Луне сопряжена со строительством стационарных пунктов

¹ Постановление Правительства РФ № 230 от 23 марта 2016 года «Федеральная космическая программа России на 2016–2025 годы» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://web.archive.org/web/20210731205957/https://www.roscosmos.ru/22347/> (дата обращения: 03.02.2024).

² Луна на всех [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.kommersant.ru/doc/3618726> (дата обращения: 18.02.2024).

Япония запустит производство водорода на Луне к 2035 году [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://habr.com/ru/companies/selectel/articles/521206/> (дата обращения: 18.02.2024).

На Луне найден новый минерал и источник «энергии для всех людей на Земле» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://hi-news.ru/research-development/na-lune-najden-novyj-mineral-i-istochnik-energii-dlya-vsex-lyudej-na-zemle.html> (дата обращения: 18.02.2024).

Терраформирование Луны [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://v-kosmose.com/luna-estestvennyiy-sputnik-zemli/terraformirovanie-lunyi/> (дата обращения: 18.02.2024).

(жилищных, энергетических и производственных)³ [4; 5]. Так, по результатам V Международной научно-практической конференции «Российский форум изыскателей», была принята Резолюция, в соответствии с которой — «участниками Форума были обоснованы и определены задачи и приоритетные направления существенного совершенствования и развития системы инженерных изысканий в стране на период до 2050 г. В свете этих решений Российский Форум изыскателей 2023 считает необходимым: Просить Министерство образования и науки РФ и РАН РФ провести среди научных, вузовских и научно-производственных организаций конкурс грантов на разработку новых прорывных технологий инженерных изысканий для разработки «дорожной карты» поисковых перспективных работ на 2030–2040 годы, ориентированных на инженерные изыскания для строительства на Луне, а к 2050 году и строительству на Марсе».⁴

Поэтом целью данной работы является обзор открытых источников информации и систематизация полученных сведений об общих природно-климатических условиях, и параметрах среды Луны, которые необходимо учитывать при ее хозяйствующем освоении.

Материалы и методы

Для систематизации основных особенностей, связанных с освоением Луны при строительстве, а также формирования критериев, влияющих на выбор площадки, для сооружений, располагаемых на ее поверхности, авторами были собраны и проанализированы открытые источники научной и научно-технической информации, и ряд электронных материалов, популяризирующих достижения в части освоения Луны. Полученные таким образом сведения, систематизированы и обобщены, что позволило сделать выводы в части выбора площадки на участках Лунной поверхности с точки зрения ее будущего освоения. Так, в ходе анализа, были изучены: температурные условия и общие особенности климата, природные явления Луны, включая — силу тяжести, условия падения космических тел на поверхность спутника, данные о сейсмической активности, ионизирующем излучении. А также рассмотрены перспективные площадки для развертывания стационарных лунных баз.

Результаты исследования

Лунная поверхность отражает порядка 5–18 %⁵ солнечного света, сила тяжести Луны (у поверхности) составляет всего — 16,5 % от Земной (что в 6 раз слабее последней).⁶ При этом на Луне, отсутствует атмосфера (точнее она сильно разрежена, фактически до состояния глубокого вакуума, и представлена преимущественно газами: «солнечного ветра» (водород — 40 г/с, гелий — 8 г/с), летучими веществами, выбрасываемыми в результате падения

³ Постоянная лунная станция как приоритет России в освоении ресурсов космоса [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.vesyks.ru/vks/article/postoyannaya-lunnaya-stanciya-kak-prioritet-rossii-16684?ysclid=ltypuwzhz2y969326521> (дата обращения: 19.03.2024).

Доклад А.С. Коротеева, директора ФГУП «Центр Келдыша»: «Актуальные задачи в космонавтике XXI века» на первом Международном специализированном симпозиуме «Космос и глобальная безопасность человечества» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.roscosmos.ru/7830/> (дата обращения: 18.02.2024).

⁴ Резолюция V Международной научно-практической конференции «Российский форум изыскателей» (18–23 сентября 2023 г.) [электронный ресурс] / Официальный сайт сети «Интернет» — «Ассоциация саморегулируемая организация «Балтийское объединение проектировщиков». — Режим доступа: https://srobop.ru/i/uploads/rezolyutsiya_rfi_2023.pdf.

⁵ Луна [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Луна> (дата обращения: 04.02.2024).

⁶ Гравитация Луны [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Gravitation_of_the_Moon (дата обращения: 12.03.2024).

метеоритов и космических камней (2 г/с); внутренней дегазации приповерхностного слоя — 32 г/с) [5]. Данные особенности приводят, в первую очередь — к высокому перепаду температур на поверхности, во вторую — инерционности самих температурных колебаний, которые сильно зависят от освещённости. Так изменения температуры «светлой» поверхности (в течении Лунного дня) и в ходе Лунной ночи (продолжительность — 354 часа (14 суток и 18 часов) в земном времени⁷) составляет — от 380 до 100°K, соответственно.⁸ При этом на низких лунных широтах средняя температура поверхности около — 220°K⁹ [5].

Некоторыми исследователями [5] отмечается, что при развёртывании активности на поверхности Луны, следует ожидать дополнительно искусственно созданного человеком заполнения атмосферы, например — веществами ракетных выхлопов и гелием (в случае его добычи). По оценкам авторов [5] объёмы таких газов могут составлять порядка — 1 000 г/с, основной продукт в них будет гелий. Следовательно, допустимо говорить о некоторых прогнозных изменениях климатических особенностей в случае хозяйственного освоения Лунного пространства.

Температурные колебания на поверхности спутника обуславливаются, не только отсутствием атмосферы, но и низкой теплоемкостью, а также теплопроводностью самого лунного грунта (реголита) [5]. Так, его температура на глубине 1 м постоянная и равна — (-35°С).⁸

Кроме того, в следствие отсутствия атмосферы на Луне, и низкой активности полюсов, ее поверхность подвергается бомбардировки космическими телами, такими как метеориты и более мелкие камни.¹⁰ Так, вероятность падения крупных тел (метеоритов) на поверхность составляет 100 ударов в день, или около 33 000 в год, столкновение с астероидами (диаметром не менее 2,5 метров) более невероятное событие, которое может быть оценено как 1 раз в 4 четыре года.¹¹ Основной поток приходится на падение малых космических тел, фактически — «космических камней». Частота их падения, например, на купол стационарной АЭС радиусом 23,2 м, оценена авторами [6], как — $4,23 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{сут.}$, для одного камня [6], где «...масса космических камней, падающих на Луну в сутки составляет — (2 700 кг)¹², количество космических камней, падающих на Луну в сутки — (100 000 шт.)¹²...». Камнепад по поверхности Луны распределен условно равномерно, однако, по данным проекта «NELIOTA» («The Near-Earth object Lunar Impacts and Optical TrAnsients»), за 2 года наблюдений на полюсах

⁷ Лунная ночь (время суток) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Лунная_ночь_\(время_суток\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Лунная_ночь_(время_суток)) (дата обращения: 19.03.2024).

⁸ Температура Луны: диапазон температур на поверхности и внутри спутника, как проводились измерения температуры [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://mirax.space/solnechnaya-sistema/temperatura-luny> (дата обращения: 12.03.2024).

⁹ Температура Луны: диапазон температур на поверхности и внутри спутника, как проводились измерения температуры [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://mirax.space/solnechnaya-sistema/temperatura-luny> (дата обращения: 12.03.2024).

Атмосфера Луны [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Atmosphere_of_the_Moon (дата обращения: 12.03.2024).

¹⁰ ASU research on Apollo samples refines lunar impact history [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://news.asu.edu/content/asu-research-apollo-samples-refines-lunar-impact-history> (дата обращения: 19.03.2024).

¹¹ Сколько камней ежегодно падает на Луну? [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://new-science.ru/skolko-kamnej-ezhegodno-padaet-na-lunu/> (дата обращения: 19.03.2024).

¹² «Луна» [Электронный ресурс] / Интернет сайт «Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга, Отдел исследований Луны и планет». — Режим доступа: <http://selena.sai.msu.ru/Home/SolarSystem/moon/moon.htm> (дата обращения 28.02.2022).

не фиксировался (рис. 1).¹³

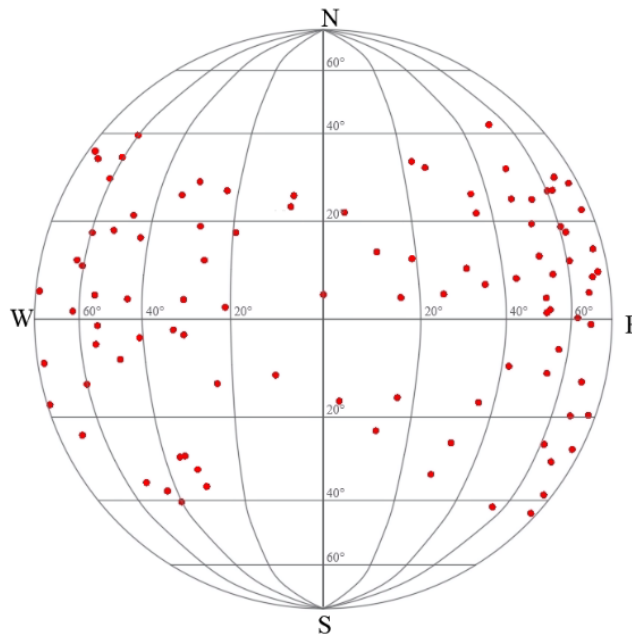


Рисунок 1. Схема местоположения падения космических камней на поверхность Луны (соответствующие области показаны точками), всего проектом «NELIOTA», до 27.03.2020 г. зафиксировано — 102 случая падения камней¹³

На самой ранней стадии существования Луны, миллиарды лет назад, процессы бомбардировки поверхности космическими телами, фактически сформировали особенности ее рельефа — в виде большого количества кратеров и впадин, а также способствовали образованию реголита (лунного грунта верхнего слоя).¹²

В целом Лунный рельеф характеризуется наличием гор высотой до 9 км, испещренных большим количеством кратеров (следами падения космических тел), и в меньшем количестве равнин (занимают около 16 % площади Луны), называемых лунными морями. Лунные моря представляют собой твердые участки поверхности, образованные в результате застывшей после извержения из недр Луны лавы. На обращенном к Земле полушарии Луны расположены: «Океан Бурь», «Море Дождей» (на западе), «Море Ясности», «Море Спокойствия», «Море Изобилия» (на востоке), ближе к северу — «Море Холода». На обратной стороне Луны (невидимой с Земли) расположены моря: «Южное» и «Восточное».¹⁴

Низкая активность магнитных полюсов, и отсутствие атмосферы, делают Луну объектом постоянной бомбардировки солнечным излучением, представляющим собой плазму, состоящую из равного количества ионов и электронов (электрически нейтральных). А примерно 1 раз в 11 лет Солнцем излучаются потоки протонов — «солнечные космические

¹³ 100th lunar asteroid collision confirmed by second telescope [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.esa.int/Space_Safety/100th_lunar_asteroid_collision_confirmed_by_second_telescope (дата обращения: 20.03.2024).

¹⁴ Луна — естественный спутник Земли [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://xc-life.ru/wiki/luna> (дата обращения: 19.03.2024).

Ж.Ф. Родионова. Карты Луны [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://selena.sai.msu.ru/rod/publications/map_moon/map_moon.htm?ysclid=ltytw1u1uj684344441 (дата обращения: 19.03.2024).

Интерактивный глобус Луны [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://spacegid.com/media/globe/?ysclid=ltytz74h2748496918> (дата обращения: 19.03.2024).

лучи» («SCR» — «Solar Cosmic Rays») [5] с высоким уровнем энергии (20–80 МэВ), что может представлять серьезную проблему для людей, материалов и технических устройств, расположенных на поверхности спутника. Время прибытия таких лучей от точки выброса до поверхности Луны, составляет около 10 часов с момента их обнаружения [5].

Кроме того, совокупность факторов, таких как: низкая активность магнитных полюсов; взаимодействие Луны с другими космическими телами, силами тяготения; тектонические процессы, протекающие в теле спутника; способствуют сейсмической активности.

Так в результате сейсмического исследования миссии «Apollo» (NASA) на Луне, были зарегистрированы глубокофокусные (составляют основную массу лунотрясений, глубина расположения очага от 800 до 1 000 км) и поверхностные сейсмические явления [7]. По природе возникновения они бывают приливными и тектоническими.

В докладе Ю.Н. Авсюка [7] отмечается, что лунная сейсмичность, в основном, связана с приливной силой¹⁵, т. е. в моменты выравнивания Луны, Земли и Солнца на одной прямой, возникает дополнительное давление пластического материала ядра на стенку оболочки (кору) Луны, что проявляется чередующимися во времени областями локального попеременного ее растяжения и сжатия. Та же сила определяет активность очаговых зон лунотрясений.

Замечено, что максимальная сейсмическая активность приходится на время нахождения Луны в перигее (ближайшая к Земле точка на орбите Луны), когда на нее действует наибольшая приливная сила от Земли [8]. Вместе с тем, на противоположной для Земли стороне очаговых зон не было обнаружено [9; 10].

Энергия каждого глубокофокусного лунотрясения составляет 10^7 – 10^9 эрг (от $\sim 10,2$ – $1\ 019,7$ кгс/см), поверхностных — порядка 10^{18} эрг ($\sim 1,02 \cdot 10^{12}$ кгс/см), однако, последние происходят гораздо реже первых (так за 5 лет регистрации отмечено всего 25 поверхностных лунотрясений), о количестве глубокофокусных лунотрясений информации нет¹⁶) [7].

Согласно серии наблюдений станцией «Apollo» (NASA) пики «приливных» лунотрясений, цикличны, соответственно — 13,6 суток, 1 месяц, 200 суток и 6 лет [10]. При этом максимальное силовое воздействие — в экваториальном районе [7]. Также отмечена цикличность поверхностной сейсмичности, по зоне распространения, при активизации того или иного полушария (активно — восточное полушарие, пассивно — западное, следовательно, зоны сейсмичности концентрируются на востоке, и наоборот) [7]. Это связано с попеременным растяжением и сжатием секторов коры Луны, при растяжении — сектор сейсмически активен, а при сжатии — пассивен [9]. Время смены цикла составляет примерно 410 суток.

В исследовании [11] приводятся подробности относительно географического распределения лунотрясений по широтным поясам (рис. 2). Установлено, что сейсмическая активность на Луне практически отсутствует на высоких широтах, ярко выраженные максимумы приходятся на средние широты обоих полушарий, а устойчивый локальный минимум располагается вблизи лунного экватора (при этом, для поверхностных волн максимумы характерны на широтах Луны 30–40°, для глубокофокусных — 10–30° (л.ш.) [11]. Однако, выявленные закономерности основаны на малой статистике и требуют дополнительного анализа, как отмечается самими авторами исследования [11].

¹⁵ Приливные силы — силы, возникающие в телах, свободно движущихся в неоднородном силовом поле.

¹⁶ Луна сжимается, это вызывает лунотрясения [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://habr.com/ru/articles/452130/> (дата обращения: 20.03.2024).



Рисунок 2. Карта эпицентров, зафиксированных лунотрясений [10]

Согласно земной шкале магнитуд Рихтера условная величина интенсивности приливных лунотрясений равна — 0,5–1,3 балла, при этом значения самых сильных землетрясений достигает магнитуды — 5,5 балла по шкале Рихтера. Возникновение приливных лунотрясений можно предсказать исходя из законов небесной механики, т. к. их источником являются силы притяжения Земли и Солнца [10].

Приливные лунотрясения чрезвычайно слабы и неопасны (0,5–1,3 балла по шкале Рихтера), и считается, при хозяйственном освоении нет необходимости в проработке сейсмостойкости сооружений, подверженных, обусловленному фактору воздействия [10].

Что касается тектонических лунотрясений, за все время наблюдения было зафиксировано — 11 толчков сейсмической энергией — до 10^{15} эрг ($\sim 1,02 \cdot 10^9$ кгс/см). Эпицентры данной активности регистрировались на периферии границы видимой и обратной сторон Луны (9 — на видимой стороне, 2 — на обратной), подобно приливным — не обнаруживались на юго-восточной четверти видимой стороны Луны, однако, они не регулярны, форма записи тектонических лунотрясений не повторяется, а глубина очагов определена неточно [10].

Важными характеристиками при хозяйственном освоении Луны, являются сейсмические свойства реголита, так как им складывается весь приповерхностный слой спутника, так [10]: мощность его составляет от 2 до 12 м (для разных районов по-разному), коэффициент Пуассона лежит в пределах — 0,42–0,43, плотность — 1,5–1,6 г/см³, пористость — более 50 %, скорость распространения продольных волн (при сейсмической активности) от 90 до 115 м/с, поперечных — 35–37 м/с, отношение этих скоростей, в пределах 2,7–2,9. Для слоя обломочного материала, представленного брекчией (располагаемой под слоем реголита) в пределах вероятного деятельного пласта [10] мощность, которого составляет — 18–38 м,

скорость распространения продольных волн в районе — 300 ± 50 м/с, отношение скоростей распространения продольных и поперечных (сейсмических) волн составляет от 2,2 до 2,4, коэффициент Пуассона — 0,37–0,40, плотность — $1,7\text{--}1,8$ г/см³. По сравнению со средними показателями грунтов Земли, лунный — имеет очень низкие скорости распространения продольных и поперечных волн и наоборот высокое отношение скоростей, более высокое значение коэффициента Пуассона [10].

Относительно выбора площадки для будущего строительного освоения в современных исследованиях¹⁷ [12–14] рассматриваются различные районы Луны, среди которых: «Кратер Шеклтон» (Shackleton Crater) на южном полюсе, «Кратер Пири» (Peary Crater) — на северном, равнина на экваторе — «Море Изобилия» (Mare Foecunditatis), «Холмы Мариус» (Marius Hills) и ряд других (рис. 3).

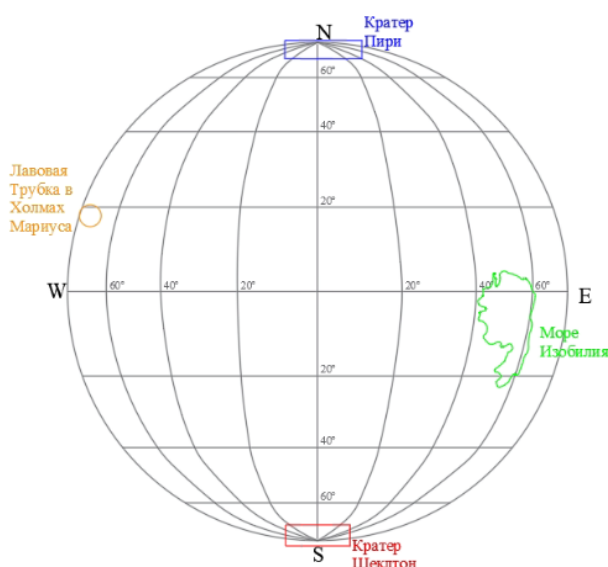


Рисунок 3. Схема расположения рассматриваемых площадок для строительного освоения на видимой стороне Луны

Кратер Шеклтон (Shackleton Crater) диаметром 20 км глубиной 4,2 км расположен в бассейне Южный полюс-Эйткен (South Pole-Aitken basin) (вид на кратер см. рис. 4), являющемся самым большим и старейшим на Луне [15]. Из-за больших размеров этого бассейна предполагается, что лунная кора на данном участке имеет меньшую толщину (всего около 30 км), чем на остальной поверхности Луны (около — 60–80 км) [16].

Верхняя часть кратерного вала весьма отвесна. Преимуществом расположения базы в этом районе, является стабильный температурный режим, так как присутствуют постоянно затененные области (следствием нахождения кратера в тени может являться наличие водорода в виде водяного льда). Однако вершины вдоль края кратера постоянно находятся под воздействием Солнца [12; 13]. Расположение кратера на полюсах предполагает наименьшую вероятность падения космических тел.¹³ Согласно выявленным закономерностям [11], сейсмическая активность на полюсах практически отсутствует, однако фиксировались тектонические лунотрясения (рис. 2).

¹⁷ Первые лунные базы будут на полюсах Луны [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://galeneastro.livejournal.com/359444.html?ysclid=ltouchs5td15221907> (дата обращения: 12.03.2024).

Peary Crater: Greetings from the North Pole of the Moon [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.lroc.asu.edu/posts/46> (дата обращения: 12.03.2024).



Рисунок 4. Фотография Кратера Шеклтон¹⁸

На северном полюсе Луны расположен Кратер Пири (Peary Crater) протяженностью 73 км (рис. 5). Он освещен Солнцем на протяжении всего лунного дня, средняя температура (-50°C), перепады температур — около 20°C . В указанном районе, исследователями¹⁷, также отмечается большая вероятность существования водяного льда. По аналогии с Кратером Шеклтон, описанного ранее, расположение Кратера Пири на полюсе предполагает наименьшую вероятность падения космических тел¹³, а согласно выявленным закономерностям [11], сейсмическая активность — практически отсутствует (рис. 2).

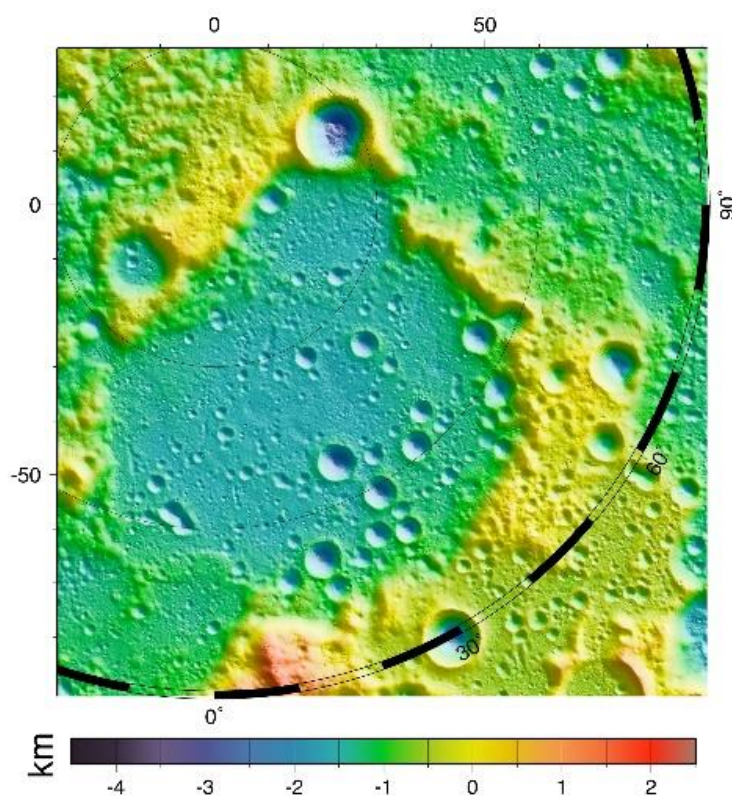


Рисунок 5. Фотография Кратера Пири¹⁹

¹⁸ НАСА показало мозаику кратера Шеклтон на Южном полюсе Луны [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://habr.com/ru/news/762368/> (дата обращения: 20.03.2024).

¹⁹ Peary Crater [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://science.nasa.gov/image-detail/peary/> (дата обращения: 20.03.2024).

Море Изобилия (Mare Fecunditatis) (рис. 6), расположенная в низкоширотной области Луны базальтовая равнина площадью около 310 тыс. км² (7,8° ю.ш., 53,7° в.д.). В работе приведены исследования грунта из северо-восточной части Моря Изобилия: «главным источником материала реголита являются базальтовые породы процелляриевого комплекса» [17]. Одним из преимуществ этой площадки является исследовательский потенциал района [14]. Ориентируясь на карту, фиксируемых ранее эпицентров лунотрясений, приведенную на рисунке 2 данной работы, можно сделать вывод, о том, что сейсмическая активность в указанном районе не была зафиксирована [10], а согласно данным проекта «NELIOTA»¹³ падение космических тел распределено условно равномерно.

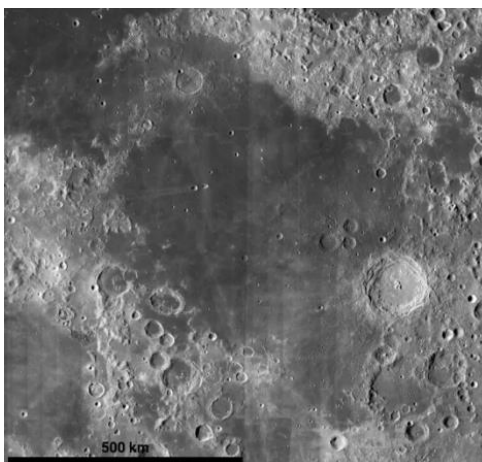


Рисунок 6. Фотография Моря Изобилия²⁰

Лавовые трубы расположенные в Море Изобилия, и образовавшиеся в результате остывания протекающей лавы, могут служить естественным укрытием от падения космических камней, а также экраном защиты от солнечного излучения, кроме того, они обеспечивают естественную среду со стабильной температурой. Однако, трубы хрупки, и вполне могут быть разрушены в результате сейсмической активности на данной площадке, или же падения крупных метеоритов.²¹

Более подходящей площадкой размещения стационарных сооружений, могут являться — пещеры. Так автоматическая межпланетная станция «Lunar Reconnaissance Orbiter» (LRO) зафиксировала стабильный температурный режим на затененных участках пещер (в пределах — 17°C).²² Такие пещеры представляют собой лавовые трубы, образованные из лавовых рек (верхний слой застывает, а лава под ним продолжает течь).²¹ Характерным примером является — пещера в Холмах Мариус, глубиной около 34 м, и размерами в плане 65×90 м (рис. 7).²³

²⁰ A guide to the Moon's Mare Fecunditatis [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.skyatnightmagazine.com/astrophotography/moon/mare-fecunditatis> (дата обращения: 22.03.2024).

²¹ Lunar lava tube [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Lunar_lava_tube (дата обращения: 22.03.2024).

²² Ученые нашли на Луне пещеры с температурой плюс 17 градусов [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://naked-science.ru/article/astronomy/moon-temperature?ysclid=ltoxujfbo988728605> (дата обращения: 13.03.2024).

²³ Marius Hills pit [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2020/02/Marius_Hills_pit (дата обращения: 13.03.2024).

Ученые нашли на Луне пещеры с температурой плюс 17 градусов [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://naked-science.ru/article/astronomy/moon-temperature?ysclid=ltoxujfbo988728605> (дата обращения: 13.03.2024).

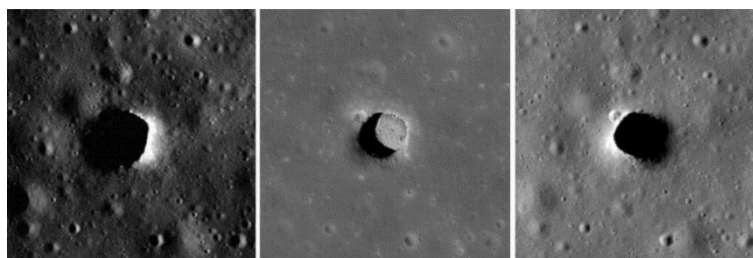


Рисунок 7. Пещера в Холмах Мариус (Marius Hills)²²

В целом, при выборе, будущей площадки хозяйственного освоения Луны, исследователями²⁴, в первую очередь, рассматриваются участки, расположенные на полюсах Луны, преимуществом которых — является относительная стабильность температуры поверхности (без интенсивных ее колебаний)²⁵ [13], однако, следует учитывать, что:

- Механические свойства реголита на равнине между кратерами, а также на валу и внутренних стенках кратеров сильно различаются, так его несущая способность на валу примерно в 5 раз ниже, чем на горизонтальных участках и склонах, вместе с тем возрастает с глубиной [18].

- Сейсмическая активность наименьшая на обратной стороне Луны, однако, даже на видимой стороне она не столь высокая, для приливных лунотрясений энергия в очаге составляет — 10^7 – 10^9 эрг, а для тектонических — 10^{15} эрг, однако последние возникают гораздо реже [9; 10].

- Данных об интенсивности радиационного излучения в различных районах Луны в научной литературе не приводится, поэтому рекомендуется отдавать предпочтение площадкам с «естественной» защитой от излучения (лавовые трубы, пещеры), а также с наличием необходимого количества и качества местного грунта, который можно использовать в качестве радиационного экрана в искусственных защитных сооружениях.

В современных исследованиях отмечается меньшая активность падения космических камней непосредственно на полюсах Луны.

Заключение

Основными особенностями при хозяйственном освоении поверхности Луны, являются: низкая активность магнитных полюсов, а также отсутствие атмосферы, как таковой. Это влечет за собой:

- высокие перепады температур (от 380°K до 100°K);

²⁴ A guide to the Moon's Mare Fecunditatis [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.skyatnightmagazine.com/astrophotography/moon/mare-fecunditatis> (дата обращения: 22.03.2024).

Первые лунные базы будут на полюсах Луны [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://galenaastro.livejournal.com/359444.html?ysclid=ltouchs5td15221907> (дата обращения: 12.03.2024).

Япония запустит производство водорода на Луне к 2035 году [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://habr.com/ru/companies/selectel/articles/521206/> (дата обращения: 18.02.2024).

²⁵ Первые лунные базы будут на полюсах Луны [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://galenaastro.livejournal.com/359444.html?ysclid=ltouchs5td15221907> (дата обращения: 12.03.2024).

Peary Crater: Greetings from the North Pole of the Moon [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.lroc.asu.edu/posts/46> (дата обращения: 12.03.2024).

- бомбардировку солнечным излучением (1 раз в 11 лет потоками протонов энергией в 20–80 МэВ) и космическими телами (частота падения космических камней (массой 30 г) — 33 000 падений/год, астероидов (размером свыше 2,5 м) — 4 падений/год). При этом на полюсах падение космических тел за 2 года наблюдений не было зафиксировано, а по остальной поверхности Луны — распределено условно равномерно.

В целом рельеф Луны характеризуется большим количеством кратеров и малым количеством морей (равнин). Поверхность при этом в деятельном слое, сложена реголитом и брекчией (мощность первого — от 2 до 12, второго — от 18 до 38 м).

Реголит сильно различается по своим свойствам в пределах равнин, между кратерами и валах кратеров, его несущая способность на валу примерно в 5 раз ниже, чем на других указанных участках. Однако, он обладает низкой теплопроводностью, стабилизируя тем самым температуру с глубиной (на глубине 1 м от дневной поверхности температуры (-35°C) и постоянна), что позволяет рассматривать конструкции обволок модулей и сооружений, выполненных непосредственно из него.

Сейсмические процессы на Луне обусловлены воздействием приливных сил от Земли и Солнца, а также тектоническими процессами самой Луны. Последние имеют энергию на порядок превосходящую чем первые, при этом приливные — могут быть достаточно легко спрогнозированы по существующим законам небесной механики.

Магнитуда приливных лунотрясений составляет 0,5–1,3 по шкале Рихтера (поэтому они чрезвычайно слабы и не опасны, и не требуют проработки дополнительных мероприятий сейсмостойкости при строительстве сооружений), тектонических — до 5,5 по шкале Рихтера, однако, возникают они гораздо реже, и по сути являются наименее изученным процессом.

Распространение продольных и поперечных волн в реголите и коренном основании весьма различно, в поверхностном слое мощностью 2–12 м (реголит): скорость распространения продольных волн составляет — $90 \div 115$ м/с, поперечных — $35 \div 37$ м/с, а в основании мощностью 18–38 м (брекчия), эти параметры характеризуются как — 300 ± 50 м/с и 130 ± 50 м/с, соответственно.

С этой позиции наиболее перспективным к застройке, является подстилающий слой в виде брекчии, однако он залегает на относительно большой глубине.

Кроме того, следует учитывать, что при развертывании хозяйствующей активности на поверхности Луны, ожидается дополнительное искусственно созданное человеком заполнение атмосферы, например — веществами ракетных выхлопов и гелием (в случае его добычи). По оценкам авторов [5] объемы таких газов могут составлять порядка — 1 000 г/с, основной продукт в них будет гелий. Следовательно, допустимо говорить о некоторых прогнозных изменениях климатических особенностей Луны, в случае ее хозяйственного освоения.

В ходе исследования, также были установлены, общие предпосылки к выбору самой площадки, предполагаемого развертывания хозяйственной деятельности на лунной поверхности, так:

- Она должна быть экономически целесообразна (то есть предусматривать наличие полезных ископаемых), или же обладать высоким научным потенциалом.
- Иметь сложенный около 2-х м слой реголита, с целью его использования для строительства, при развёртывании базы, и возможности посадки сооружений и других стационарных комплексов на более прочное (менее деформируемое) основание.

- По возможности обеспечивать естественную защиту от «SCR» («солнечных космических лучей») и падения космических тел, или же располагаться в районах и на участках, где вероятность бомбардировки относительно минимальна, чтобы не предусматривать значительные объемы работ, связанные с обеспечением возведения весьма материалоемких конструкций защиты.
- Следует отдавать предпочтения районам будущего размещения, где фиксируется относительно низкая сейсмическая активность (обусловленная преимущественно тектоническими процессами), в частности, такими участками могут служить полюса Луны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богачева М.Н. Оценка эффективности развития глобальной энергетики на базе использования лунных ресурсов "гелий-3" [Электронный ресурс] // Труды МАИ. 2010. № 38, — Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-effektivnosti-razvitiya-globalnoy-energetiki-na-baze-ispolzovaniya-lunnyh-resursov-geliy-3> (дата обращения: 19.03.2024).
2. Калинин Е.П. Научный обзор проектов по изучению и освоению минерально-сырьевых ресурсов Луны и других естественных небесных тел / Е.П. Калинин // Известия Коми научного центра УрО РАН. — 2017. — № 2(30). — С. 101–103. — EDN ZBEZIV.
3. Елохин, И.В. Луна как плацдарм для освоения солнечной системы / И.В. Елохин [Электронный ресурс] // III Международный конкурс научно-исследовательских и творческих работ учащихся «Старт в науке», — Режим доступа: <https://school-science.ru/3/11/32679> (дата обращения: 18.02.2024).
4. Синявский, В.В. Перспективы освоения Луны / В.В. Синявский // Земля и Вселенная. — 2013. — № 2. — С. 71–82. — EDN PZEOQF.
5. Gani V. Ganapathi, Joseph Ferrall, P.K. Seshan. Lunar Base Designs: Characterizing the Environment, and Selecting Habitat Designs for Future Trade-offs. / Gani V. Ganapathi, Joseph Ferrall, P.K. Seshan [Электронный ресурс] // JPL Publication 93–20, — Режим доступа: <https://spacearchitect.org/pubs/NASA-CR-195687.pdf> (дата обращения: 04.03.2024).
6. Белов, В.В. Некоторые аспекты исследования возможности строительства АЭС на Луне / В.В. Белов, С.А. Сазонова // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. — 2022. — Т. 23, № 2. — С. 124–139. — DOI 10.22363/2312-8143-2022-23-2-124-139. — EDN QGVSQC.
7. Ю.Н. Авсюк, “Механическая интерпретация некоторых особенностей лунной сейсмичности”, Докл. АН СССР, 268:1 (1983), 51–55.
8. Сагитов М.У. Лунная гравиметрия. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979, 432 с.
9. Lammlein D.R. Lunar seismicity and tectonics // Physics of the Earth and Planetary Interiors. — 1977. — Т. 14. — № 3. — С. 224–273.
10. Галкин И.Н., Шварев В.В. Строение Луны [Электронный ресурс] // Новое в жизни, науке и технике. Серия "Космонавтика, астрономия" № 2. М., "Знание", 1977. — с. 64. — Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007719548?ysclid=Ix9iea8ia773023403> (дата обращения: 12.03.2024).

11. Левин Б.В., Сасорова Е.В. Общие закономерности в распределении сейсмических событий на Земле и на Луне // Доклады РАН 2010. Т. 434. № 2. С. 252–256.
12. Paul D. Spudis, Ben Bussey, Jeffrey Plescia, Jean-Luc Josset, Stéphane Beauvivre. Geology of Shackleton Crater and the south pole of the Moon. — DOI: 10.1029/2008GL034468 [Электронный ресурс] // Geophysical Research Letters 35(14), February 2008, — Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/228660656_Geology_of_Shackleton_Crater_and_the_south_pole_of_the_Moon (дата обращения: 12.03.2024).
13. Elphic, R.C.; Eke, V.R.; Teodoro, L.F.A.; Lawrence, D.J.; Bussey, D.B.J. Models of the distribution and abundance of hydrogen at the lunar south pole [Электронный ресурс]. / Geophysical Research Letters, Volume 34 (13) — Apr 16, 2008, — Режим доступа: <https://www.deepdyve.com/lp/wiley/models-of-the-distribution-and-abundance-of-hydrogen-at-the-lunar-T0FXpJuMBT> (дата обращения: 12.03.2024).
14. Siyuan Zhao, Yuqi Qian, Long Xiao, Jiannan Zhao, Qi He, Jun Huang, Jiang Wang, Hui Chen, Weiyang Xu. Lunar Mare Fecunditatis: A Science-Rich Region and a Concept Mission for Long-Distance Exploration. — DOI:10.3390/rs14051062. [Электронный ресурс] // Remote Sensing 14(5):1062, February 2022, — Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/358845101_Lunar_Mare_Fecunditatis_A_Science-Rich_Region_and_a_Concept_Mission_for_Long-Distance_Exploration (дата обращения: 13.03.2024).
15. Noah E. Petro, Carlé M. Pieters. Surviving the heavy bombardment: Ancient material at the surface of South Pole-Aitken Basin. — DOI: <https://doi.org/10.1029/2003JE002182>. [Электронный ресурс] // Journal of Geophysical Research, volume 109, issue E6, June, 2004. — Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/228416648_Surviving_the_heavy_bombardment_Ancient_material_at_the_surface_of_South_Pole-Aitken_Basin (дата обращения: 22.03.2024).
16. Potter, R.W.K.; Collins, G.S.; Kiefer, W.S.; McGovern, P.J.; Kring, D.A. Constraining the size of the South Pole-Aitken basin impact. — DOI: 10.1016/j.icarus.2012.05.032 [Электронный ресурс] // Icarus, Volume 220, Issue 2, August 2012, Pages 730–743. — Режим доступа: <https://www.semanticscholar.org/paper/Constraining-the-size-of-the-South-Pole-Aitken-Potter-Collins/eaad413f469eacfc8c598740c35eef9e76467477> (дата обращения: 22.03.2024).
17. К.П. Флоренский, А.Т. Базилевский, А.А. Пронин. Геолого-морфологическая характеристика района посадки автоматической лунной станции "Луна-16" [Электронный ресурс]. // Лунный грунт из Моря Изобилия, Издательство "Наука", Москва, 1974, — Режим доступа: <https://www.planetology.ru/florensky/documents/2.2.59.pdf?language=russian> (дата обращения: 17.05.2024).
18. Слюта, Е.Н. Физико-механические свойства лунного грунта (обзор) / Е.Н. Слюта // Астрономический вестник. — 2014. — Т. 48, № 5. — С. 358–382. — DOI 10.7868/S0320930X14050053.

Sazonova Svetlana Andreevna

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian
E-mail: s.sazonovaa17@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4025-2053>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1150727
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=58835541000>

Belov Vyacheslav Vasil'evich

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian
E-mail: BelovVV@mgsu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6246-6100>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=771281
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57218418373>

Gordeev Alexey Vladimirovich

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian
E-mail: BelovVV@mgsu.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=658874

Pugachev Boris Aleksandrovich

«Rosenergoatom» JSC Branch of Capital Projects Implementation, Moscow, Russia
E-mail: bapougachev@gmail.com
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1249679

An overview of the natural and climatic conditions for construction of stationary bases on the Moon

Abstract. The development of the processes of deep space exploration is progressive. So, initially, it is necessary to ensure the debugging of technologies, chains of production processes, in some cases, to organize the extraction of minerals for the realization of, for example, refueling of spacecrafts and a number of other operations.

At the same time, any economic development on celestial bodies other than the Earth, in case of the concept of stationary bases, inevitably affects construction processes and technologies.

Considering the Moon as an opportunity to make the first step in the above-mentioned direction, there is a direct need to systematize and take into account a wide range of factors conditioned, first of all, by natural and climatic conditions, and peculiarities of objects location on other celestial bodies.

Thus, in this work, by reviewing open sources of scientific and technical information, were established: temperature conditions, general features of the Moon's climate, including the force of gravity, the frequency of falling space bodies on the surface of the satellite, data on seismic activity and corresponding ground response. As a result, conclusions are drawn about what of the above has the greatest influence on the choice of site for future construction and related design features of co-facilities in the deployment of stationary bases on the surface of the Moon.

It is noted that when selecting a site it is necessary to ensure a certain balance between the most expedient location and the accepted structural solutions of the structures of stationary bases. From this position, the authors give examples of the most promising sites for deployment of such bases.

Keywords: natural-climatic conditions of the Moon during its economic development; temperature parameters; seismicity; seismic waves propagation response of the soil; space bodies falling on the Moon surface; ionizing radiation; selection of the construction site on the Moon; recommendations for the construction design