

Освоение Луны: первый современный этап

Н.Е.Кухаркин¹, К.Ф.Раскач¹, П.А.Александров¹

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (Москва, Россия)

Создание обитаемой научной базы на Луне — логичный шаг в дальнейшем изучении космоса. Однако на этом пути мы встречаемся с рядом трудностей технического и финансового характера. В основном это связано с дорогостоящей доставкой на Луну любых грузов и еще более дорогой доставкой обратно на Землю. Выходом здесь может стать максимальное использование местных ресурсов: грунта (реголита) и воды, указание на существование которой вблизи полюсов Луны недавно было получено. При наличии энергетических ресурсов из реголита можно изготавливать строительные материалы и различные конструкции. Полученные ранее данные о содержании воды в холодных ловушках в 5 и 30% позволяют предполагать ее добычу в промышленных масштабах, а путем электролиза получать ракетное топливо, которое необходимо для дальнейшего изучения космического пространства и возвращения людей и исследовательских аппаратов на Землю.

Ключевые слова: Луна, вода, полярные области, отказоустойчивость электроники, обитаемая база.

Луна — естественный спутник Земли — рассматривается как промежуточная позиция при дальнейшем освоении космоса. Любые программы ее исследования связаны с доставкой на лунную поверхность материалов и оборудования, что ложится тяжелым бременем на экономику. Здесь возможны два подхода. Первый из них связан с необходимостью разработки ракет-носителей и доставки всего, что нужно с Земли. Второй основывается на использовании ресурсов самой Луны, что сулит существенную экономию за счет забрасываемого на наш спутник оборудования и расходных материалов, а также возможность использования современных ракет-носителей. Естественно, при этом возникает ряд проблем, которые и будут обсуждаться в статье.

Недавно мы стали свидетелями успеха китайской программы освоения Луны. Китайские аппараты осуществили мягкую посадку на ее обратную сторону и доставили на Землю образцы грунта. Большой научной ценно-



Николай Евгеньевич Кухаркин, кандидат технических наук, советник президента Национального исследовательского центра (НИЦ) «Курчатовский институт», заслуженный энергетик РФ. Область научных интересов — создание и испытание ядерных энергетических установок для атомной энергетики, авиации, космоса и морского флота.
e-mail: kukharkin_ne@nrcki.ru



Кирилл Федорович Раскач, доктор физико-математических наук, заместитель руководителя комплекса того же центра. Занимается математическим моделированием процессов в ядерных энергетических установках.
e-mail: raskach_kf@nrcki.ru, raskachkf@mail.ru



Петр Анатольевич Александров, доктор физико-математических наук, директор Института информационных технологий того же центра. Круг научных интересов охватывает вопросы физики конденсированного состояния, технологии микроэлектроники и радиационной стойкости.
e-mail: alexandrov_pa@nrcki.ru

сти полученные данные не представляют, но подтверждают, что КНР вошла в число ведущих космических держав. Российская программа освоения Луны ориентирована на широкий круг научных исследований и применения для их осуществления тяжелых ракет-носителей. Использованию же местных ресурсов (воды и реголита) в ней уделяется мало внимания. Более ориентирована на поиск и возможное использование местных ресурсов американская программа «Артемида» (Artemis). В ходе подготовки к ее реализации были выбраны возможные точки посадки беспилотных кораблей вблизи южного полюса Луны — в основном исходя из подходящего рельефа и предполагаемого наличия воды. Программа базируется на использовании тяжелых и сверхтяжелых ракет с пока не доказанной надежностью.

Возможность использования местных ресурсов

Ранее были проведены многочисленные исследования состава и гранулометрических свойств приповерхностного слоя Луны*. Стало известно, что в результате ударного воздействия метеоритов и комет ее поверхность состоит из сильно измельченного (от долей микрометра до нескольких сантиметров) материала (реголита), по составу близкого к земному базальту. Химический состав базальта представляет собой смесь оксидов Si, Mg, Al, Ca, Fe и др., с очень низкой долей редких элементов. В самом поверхностном слое (0–10 мкм) присутствуют разные изотопы водорода и гелия — результаты воздействия солнечного ветра. Впрочем, количество их невелико из-за испарения и ухода в космос [1].

Описанная ситуация характерна для постоянно освещенных солнцем областей. Если же мы рассмотрим состав грунта в постоянно затененных областях, то там будут совершенно другие условия и, как следствие, — другой состав. Вблизи южного полюса Луны, в том числе и в неизменно затененных областях, проводились измерения температуры поверхности с помощью тепловизора [2], установленного на спутнике Луны (рис.1). Оказалось, что существуют области с постоянной температурой ниже -200°C . Следовательно, при столкновении Луны с кометой (что наверняка неоднократно происходило за 4 млрд лет эволюции) часть содержащейся в ней воды могла осесть в области с низ-

кой температурой. Далее эта область могла покрыться пылью от данного и последующих столкновений, что еще сильнее замедлило бы испарение воды (и так очень малое при -200°C). Таким образом, вблизи полюсов Луны в постоянно затененных местах вполне вероятно наличие воды (льда). Подобный эксперимент провели США в октябре 2009 г. (миссия LCROSS — Lunar Crater Observation, NASA)**. По спектрометрическим данным, полученным в результате ударного воздействия, содержание воды в одной точке по отношению к основной породе составляло ~ 5.5 вес.%. Такое количество воды говорит о возможности ее промышленного получения на Луне.

Анализ оптических спектров отражения в приполярных областях Луны, выполненных с высоким пространственным разрешением, показал наличие гораздо большей концентрации воды — до 30 вес.% [2]. Опираясь на эти два результата, полученные разными способами, можно планировать использование лунной воды. Обсудим вопрос о необходимости ее получения на Луне. Если отталкиваться от опыта эксплуатации обитаемых космических станций (в том числе МКС) и наземных экспериментов типа SIRIUS (Scientific International Research in Unique Terrestrial Station), то вода

** www.bbc.com/news/science-environment-11598813

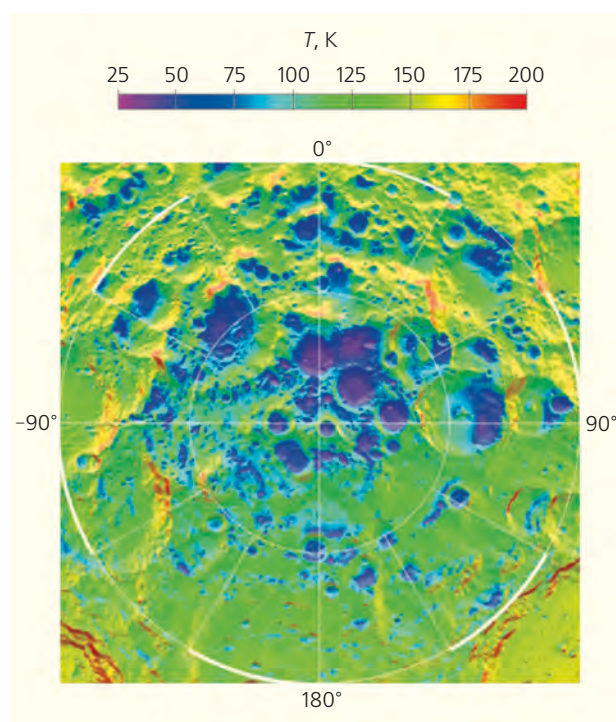


Рис.1. Карта центральной области южного полюса, выполненная с помощью тепловизора.

* См., например: *Базилевский А.Т.* «Луноходы-1 и -2» в истории лунных исследований. К 50-летию первого запуска аппарата. Природа. 2021; 2: 3–14.

необходима в первую очередь для жизнеобеспечения: приготовления пищи персонала, выработки кислорода для дыхания, для гигиенических целей и полива оранжерей*. При наличии достаточного количества воды отпадает необходимость ее экономии при поддержании влажности воздуха и обработке отходов жизнедеятельности. Это достаточно сложные системы со своим ресурсом, энергопотреблением и весом.

Наличие воды и необходимой энергетики позволит использовать кислород и водород, полученные при электролитическом разложении воды непосредственно на поверхности Луны, в качестве ракетного топлива, а также для хранения энергии и в электрохимических генераторах (ЭХГ).

Второй важный материал, вполне доступный на Луне, — реголит, т.е. измельченный базальт. Из многочисленных измерений и расчетов известно, что полная величина солнечного излучения, падающего на перпендикулярную лучу лунную поверхность, составляет 1380 Вт/м^2 [1]. Из-за отсутствия на Луне атмосферы, а значит, и поглощения в ней, указанная величина будет одинаковой на экваторе и на полюсе. Если взять высокоотражающее вогнутое зеркало (например, из алюминия), то легко сфокусировать излучение, отраженное 1 м^2 на площадь $10 \times 10 \text{ см}^2$. Учитывая интегральный по всему солнечному спектру коэффициент отражения алюминия и низкое альbedo лунной поверхности (т.е. почти полное поглощение и превращение в тепло солнечного излучения), мы ориентировочно получим плотность энергии 1 кВт/м^2 . Эту величину можно в несколько раз увеличить, используя не один отражательный элемент, а несколько.

Учитывая аномально низкую теплопроводность лунного грунта [1], предположим, что при облучении сфокусированным солнечным излучением поверхность будет плавиться и образовывать стеклообразную газонепроницаемую структуру. Толщина остеклованного слоя в основном определяется временем и температурой прогрева. Такой эксперимент, конечно, нужно сначала провести на Земле. Здесь можно воспроизвести все необходимые условия, кроме уменьшен-

ного тяготения, что, вероятно, не так существенно. Особо важно найти технологические приемы, которые смогут обеспечить герметичность, полученного остеклованного покрытия.

Эта, казалось бы, простая технология, имеет много подводных камней. Сначала надо принять во внимание, что температуропроводность реголита очень мала, а это приводит к весьма медленному прогреву его поверхностного слоя. Кроме того, данный процесс должен проходить на облучаемой солнцем поверхности, а это способствует появлению пыли и запылению поверхности вогнутого зеркала, которое снижает его эффективность [3]. Данные соображения приводят к необходимости разработки альтернативных методов при изготовлении строительных материалов и конструкций для обитаемой лунной базы. Например, можно использовать кислород-водородную горелку, тогда пористая поверхность реголита будет прогреваться горячими газами. В этом случае малая температуропроводность не играет большой роли. Оценить указанные выше эффекты довольно трудно, поэтому необходима наземная экспериментальная отработка.

Выбор места посадки и расположения обитаемой базы

Место посадки выбирается исходя из необходимости использовать местные ресурсы воды. Предполагается осуществить посадку на постоянно освещенном месте, вблизи границы с тенью (рис.2). На посадочном блоке помещается солнечная батарея с системой ориентации на Солнце и система связи с Землей. После прилунения солнечная батарея разворачивается и начинается электролиз привезенной воды и зарядка аккумуляторов — с тем, чтобы

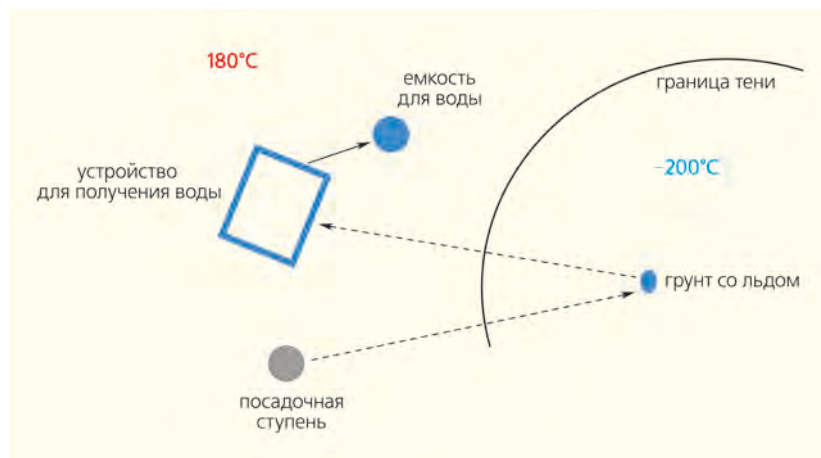


Рис.2. Место предполагаемой первой посадки лунохода, траектория его движения с образцами и граница тени.

* SIRIUS — международный исследовательский проект, в котором изучаются вопросы медико-биологического и психологического обеспечения длительных пилотируемых космических полетов.

накопить энергию для функционирования лунохода в основном и резервном режимах. Предполагается, что этот предварительный поисковый этап будет осуществляться без присутствия человека.

Луноход, доставленный посадочным блоком, оборудован устройством для передвижения, которое питается от ЭХГ и, как резерв, — от аккумулятора. Запас энергии рассчитывается для работ на расстоянии 1–3 км и для возвращения на базу. На луноходе должно предусматриваться устройство для взятия пробы грунта с нескольких глубин (но не глубже 1 м) и герметичный объем, который закрывается после наполнения грунтом, взятым с определенной глубины. Эта герметичная емкость снабжается системой взвешивания с точностью определения $\leq 0.1\%$. После возвращения к посадочному блоку осуществляется разгерметизация проб и нагрев их солнечным излучением в специальном устройстве примерно до 200°C . После полной термической дегазации происходит повторное взвешивание проб, по разнице веса до и после дегазации определяется относительное количество воды. Другие газовые примеси, характерные для комет, малы, они будут выделяться в первую очередь. В дальнейшем при количественном анализе возможно использование масс-спектрометра, но на первом этапе в этом нет необходимости. В принципе для отработки этой технологии пробный эксперимент также можно провести на Земле.

Навигация лунохода осуществляется аналогично навигации беспилотного автомобиля, несколько вариантов которого сейчас испытываются. Здесь важно, что информация о рельефе поверхности и препятствиях получается при работе подвижных лазерных дальномеров с достаточно простой системой обработки данных и выдачи сигналов на управляющую систему. Таким образом, управление луноходом будет проходить в реальном времени, а не с задержкой в 2.5 с, типичной для передачи изображения на Землю и управляющих сигналов обратно. Кроме того, важным обстоятельством служит отсутствие солнечного света, создающего помехи лазерным дальномерам.

Итак, сначала надо проанализировать уже полученные термометрические характеристики около полюса и выбрать место с наиболее низкой температурой (рис.3). Затем изучить данные по рассеянию нейтронов и переданные спутниками Луны оптические спектры, которые ориентировочно указывают на присутствие водорода и связи О—Н. Далее необходимо просмотреть снимки высокого разрешения, которые помогут найти место посадки первой миссии и определить траекторию движения

лунохода. Место посадки должно выбираться на относительно ровной, освещенной солнцем площадке, которая расположена недалеко (с точки зрения движения лунохода) от постоянно затененной, возможно, наиболее холодной области.

В рамках первой миссии нужно изучать процесс дегазации и накопления воды. Из-за малой теплопроводности реголита он может быть весьма длительным, но все будет зависеть от количества льда (воды) в реголите.

Основная цель данной миссии — составление карты содержания воды и выбор на ее основе места для обитаемой базы. Можно высказать несколько аргументов в пользу ее расположения в затененном месте. При отсутствии прямого солнечного облучения не будет и радиационной нагрузки, связанной с вспышками на Солнце, поэтому нет необходимости заглублять станцию в грунт, что сильно уменьшит трудоемкость. Наличие постоянно низкой температуры радикально уменьшит толщину стенок контейнеров для хранения кислорода и водорода, получаемых при электролизе воды, а также жилой блок нужно будет нагревать, что всегда легче, чем охлаждать.

На этом этапе необходимо принять стратегическое решение о продолжении работ. Может оказаться, что в месте посадки 1-го блока вода не найдется, тогда придется переосмыслить всю про-

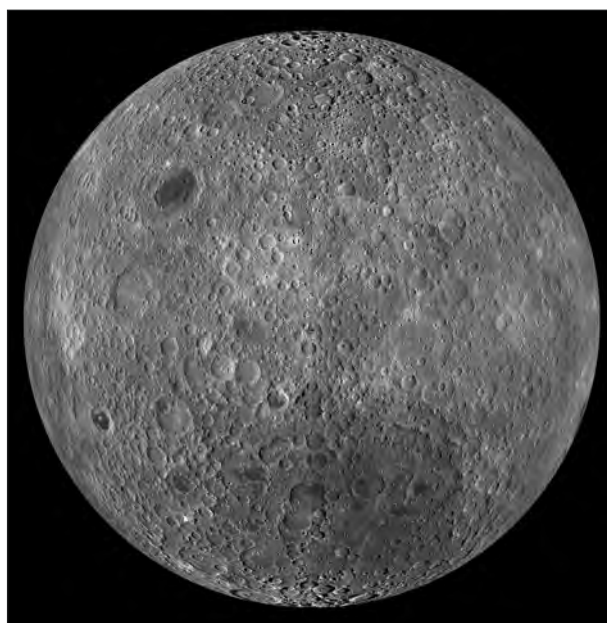


Рис.3. Обратная сторона Луны. Фото выполнено камерой автоматической межпланетной станции НАСА «Lunar Reconnaissance Orbiter» в 2009 г. Южный полюс (180° долготы и 0° широты) находится в центре ортографической проекции.

Изображение NASA / GSFC / Lunar Reconnaissance Orbiter

грамму и, возможно, сделать перерыв или остановку в исследованиях. При обнаружении воды в промышленных концентрациях (более 5 вес.%) появляется перспектива использования ее для жизнеобеспечения и, главное, для производства ракетного топлива.

Дальнейшие этапы освоения

Следующий этап предполагает строительство и начало использования обитаемой базы. Как мы уже показали, строительные конструкции можно изготавливать в освещенном солнцем месте. Это означает, что затем потребуются их транспортировка и установка на участке расположения базы. Строительство, с учетом получения необходимой безопасности персонала, — процесс довольно длительный и энергоемкий. Энергопитание работ и жизнеобеспечения людей, которые будет находиться в посадочном блоке, должно осуществляться от солнечной батареи. На этих предварительных этапах также предполагается проводить все работы без участия человека.

Приведем ориентировочную оценку необходимых энергетических ресурсов на разных этапах деятельности на Луне. Для электролиза 1 л воды необходимо затратить 4–5 кВт·ч электроэнергии (с учетом КПД электролизера и электрохимического генератора). Примерно половина исходной энергии солнечной батареи должна быть потрачена на движение лунохода. На один рейс необходимо 15 кВт·ч. Всего за год предполагается 20 рейсов. В итоге получаем, что на работу лунохода в год необходимо 300 кВт·ч. Таким образом, вполне реально использовать солнечную батарею мощностью 10–15 кВт. Ситуация коренным образом меняется, если мы хотим получить ракетное топливо и кислород для жизнеобеспечения. Предположим, что на год необходимо 1 тыс. т ракетного топлива. Для его получения из воды нужно затратить $4.5 \cdot 10^6$ кВт·ч, тогда, с учетом КПД и КИУМ (коэффициента использования установленной мощности), соответственно, в 30% и 50%, получим примерно 2–3 МВт тепловой мощности. Все проблемы жизнеобеспечения решаются с использованием около 10% этой мощности. Исходя из данных чисел, можно думать и о ядерном энергоисточнике. Если не учитывать изготовление ракетного топлива, то понадобится гораздо меньшая (примерно на порядок) мощность.

Дальнейшее расширение деятельности на Луне требует доставки экипажа для постоянного проживания и обслуживания систем жизнеобеспечения. Увеличить энергопотребление и создать запас ра-

кетного топлива на основе кислорода и водорода, получаемых из воды, можно только путем использования ядерного энергоисточника, конструкция и принцип работы которого подлежат обсуждению. Итак, появляется возможность долгого накопления энергии от солнечных батарей или от ядерного реактора и достаточно быстрого ее использования с применением ЭХГ или ракетного двигателя, и все это — без тяжелых и сверхтяжелых носителей.

Проблемы, требующие решения

Наиболее очевидная часть представленной программы — поиск воды. Здесь, на первый взгляд, не требуются новые решения и возможно использование уже разработанной техники. Этап, связанный со строительством базы и разработкой технологии изготовления строительных материалов, менее очевиден и нуждается в наземной экспериментальной проработке, которая относительно дешева.

При реализации описанного подхода возникает несколько принципиальных вопросов, требующих исследований. Например, обычная коммерческая электроника при температурах -200°C работать не будет: может произойти существенное увеличение проводимости межсоединений, неполная ионизация уровня допирования и растрескивание ввиду рассогласования КТР (коэффициентов термического расширения) компонентов. Из этой ситуации возможно два выхода: термостатирование объема, содержащего электронные компоненты, и изменение технологии. Второй путь очень длительный и затратный, первый же требует дополнительной энергетики, но он более прост.

Другая важная вещь, связанная с электроникой, — повышение отказоустойчивости электронных систем при облучении тяжелыми заряженными частицами галактического происхождения. Особо надо учитывать большой срок службы и практическую невозможность замены. Это существенно для МКС, спутников Луны, лунной базы и других долговременных устройств. Выходом служит покомпонентное резервирование в цифровых устройствах, разрабатываемое в Курчатовском институте*. Низкие температуры в районе расположения станции будут влиять на работоспособность конструкционных материалов. Необходимо согласовывать по КТР разные используемые материалы и не допускать больших механических напряжений в объемных конструкциях. Здесь может помочь

* См., например: Александров П.А., Жук В.И., Литвинов В.Л. Наноэлектроника и радиация. Природа. 2015; 1: 14–21.

экономическое рассмотрение проблемы. Из-за дорогой доставки грузов на Луну их ранее недоступная цена перестает играть существенную роль.

В отличие от МКС, обитаемая база располагается на поверхности Луны, и возможно попадание пыли в рабочие и жилые помещения. Это чрезвычайно опасно. Присутствие очень острых субмикрометровых пылинок во вдыхаемом воздухе вредно для здоровья [3]. Потому необходимо предусмотреть высокоэффективную фильтрацию. При отработке технологии на Земле нужно учитывать разницу в силе тяжести на ней и на Луне. Кроме того, в жилом отсеке будет повышенная влажность и комнатная температура, а это как раз наиболее подходящая среда для развития грибов. Известно, что микологические загрязнения отрицательно влияют на здоровье людей, а также на работу многих механизмов и электроники. Этот вопрос сейчас подробно изучается в рамках международного эксперимента SIRIUS, в котором принимают участие НИЦ «Курчатовский институт», Институт медико-биологических проблем РАН, Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, НАСА и др.

* * *

Проблема использования местных ресурсов при освоении Луны стоит довольно давно. Но до сих пор не было надежных экспериментальных данных об их наличии и возможности использования. Очень дорогая доставка оборудования на Луну и большой срок его службы делают этот вопрос принципиальным. Использование местной воды при достаточной энергетике позволит наладить производство компонентов ракетного топлива (кислорода и водорода). Данный процесс может быть экономически эффективен в случае продажи топлива заинтересованным странам и организациям для исследования космоса. Вопрос принципов работы мощного энергоисточника можно будет решать после получения экспериментальных данных о количестве воды в грунте, величине его теплопроводности и возможности ремонта оборудования.

Более подробное рассмотрение затронутых в этой статье вопросов позволит отказаться от проектирования и изготовления тяжелых ракет-носителей и на современном этапе сделает всю проблему решаемой. ■

Работа выполнена при поддержке НИЦ «Курчатовский институт» (приказ №2220 от 27.10.2020).

Литература / References

1. Луна — шаг к технологиям освоения Солнечной системы. Под научной редакцией В.П.Легостаева и В.А.Лопоты. М., 2011. [The Moon is a step towards technologies for the development of the Solar System. V.P.Legostaev, V.A.Lopota (eds.). Moscow, 2011. (In Russ.)]
2. Li S., Lucey P.G., Milliken R.E. et al. View Direct evidence of surface exposed water ice in the lunar polar regions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*. 2018; 115(36).
3. Захаров А.В., Зеленый Л.М., Попель С.И. Лунная пыль: свойства, потенциальная опасность. *Астрономический вестник*. 2020; 54(6): 483–507. [Zakharov A.V., Zelenyi L.M., Popel' S.I. Lunar dust: properties and potential hazards. *Solar System Research*. 2020; 54(6): 455–476.]

Exploration of the Moon: the First Modern Stage

N.E.Kukharkin¹, K.F.Raskach¹, P.A.Alersandrov¹

¹National Research Center "Kurchatov Institute" (Moscow, Russia)

The creation of an inhabited research station on the Moon is a logical step in the further study of space. However, there are a number of technical and financial difficulties. It is mainly due to expensive delivery to the Moon of any cargo and even more expensive delivery back to Earth. The solution of the issue is the use of local resources, soil (regolith) and water. The existence of the latter was recently indicated near the poles of the Moon. The presence of energy resources allows to produce, building materials and various constructions from the regolith. Previously obtained data on the water content in cold traps of 5 and 30% make it possible to assume its production on an industrial scale, and to use electrolysis to obtain rocket fuel, which is necessary both for further study of the outer space and returning people and research apparatus to Earth.

Keywords: Moon, water, polar areas, electronics fault tolerance, inhabited research station.