

Перспективы развития космической горно-перерабатывающей отрасли



П. П. Ананьев,
к. т. н., генеральный
директор, НП «ЦИГТ»
cigt@mail.ru



С. В. Васильев,
д. т. н., эксперт



Р. В. Мещеряков,
д. т. н., профессор, проректор
по научной работе и инновациям,
ФГБОУ ВПО Томский государственный
университет систем управления
и радиозлектроники
mrv@tusur.ru



А. В. Плотникова,
ст. преподаватель/директор,
МГИ НИТУ МИСиС/ООО «ГАН»
plotnikovaav@inbox.ru



К. О. Беляков,
вице-президент
по стратегическому развитию
группы компаний «Элекард»
Konstantin.Belyakov@elecard.ru



Е. Б. Кузнецов,
зам. генерального директора,
ОАО «РВК»
kuznetsov.eb@rusventure.ru

Статья содержит анализ мировых трендов, ориентированных на развитие технологий добычи и переработки полезных ископаемых на природных космических объектах.

Сделана оценка инновационной привлекательности проектов по созданию орбитальных заправочных станций и их обеспечение ракетным топливом и криогенными компонентами, полученными из воды природных космических объектов.

На основе анализа энергетических и массо-габаритных требований сформулированы возможные направления развития космической горно-перерабатывающей отрасли как инновационного междисциплинарного направления.

Ключевые слова: природные космические объекты, вода, добыча, переработка, орбитальные заправочные станции, мировые тренды.

Актуальность

Доставка полезных ископаемых на Землю, добытых на природных космических объектах, экономически не целесообразна. Исключение составляют отдельные группы веществ, к которым относятся гелий-3 и металлы платиновой группы. Вместе с тем, экономический интерес представляет переработка полезных ископаемых непосредственно на станции добычи в космосе. Очевидной потребностью получения продукции является вещества, необходимые для нормального функционирования действующих космических аппаратов и иных искусственных объ-

ектов. Таким образом, можно говорить о формирующейся космической горно-перерабатывающей отрасли (КГПО).

Экономическая целесообразность функционирования КГПО обусловлена высокой стоимостью вывода каждого килограмма полезной нагрузки на околоземную или окололунную орбиту, а именно: до \$10000 и до \$20000 соответственно. Главная причина дороговизны заключается в большой доле топлива в составе ракетносителя.

Современные возможности ракетносителей позволяют выводить на околоземную орбиту груз весом до 100 т самыми крупными ракетами («Энергия»

или «Сатурн-5»), или 20-22 т («Протон»). Для выполнения крупномасштабных задач требуются более мощные ракеты-носители, но при этом увеличение их возможностей не безгранично, между тем, существует и другой путь — производство компонентов горючего (например, водородное топливо) и создание элементов и конструкций космической техники непосредственно в космосе.

Однако, получение водородного топлива или выплавка на орбите металла из сырья, доставленного с Земли, является явно чрезвычайно дорогостоящим (значительную долю затрат будет составлять стоимость доставки), следовательно, нужно использовать сырье природных космических объектов.

Одним из актуальных и коммерчески привлекательных проектов в настоящее время, даже при условии доставки готовых компонентов горючего с Земли, является создание системы орбитальных заправочных станций.

Объем рынка и перспективы его развития

Более 1100 спутников находятся на земной орбите и 360 из них — коммерческие. Большинство из них достаточно дорогие. Десятки или сотни миллионов долларов требуются для их разработки, постройки и запуска. Существует вероятность выхода такого спутника из строя через несколько лет эксплуатации из-за нештатной ситуации: утечки топлива или поломки. NASA планирует построить орбитальную станцию для обслуживания, ремонта и дозаправки спутников. Астронавты NASA на Международной космической станции уже выполняли две тренировочные миссии по дозаправке спутников в 2011 и 2014 гг. [1].

Экспертная оценка возможного объема дополнительных услуг и функционирования орбитальных заправочных станций в интересах продления срока работы коммерческих спутников на два года может быть сделана следующим образом. Срок жизненного цикла спутника — в среднем 10 лет, амортизация в год — \$5 млн (при цене спутника \$50 млн), количество спутников 300 штук. Следовательно, объем дополнительного рынка на настоящий момент — \$3 млрд. Американские эксперты делают оценку в увеличении ВВП США к 2025 г. до \$1 трлн, за счет функционирования орбитальных заправочных станций, работающих на «космическом сырье», при условии планового возрастания численности орбитальной группировки и реализации крупных проектов по освоению космоса.

По данным NASA, больший интерес к созданию спутниковой сервисной станции на околоземной орбите проявляют коммерческие компании, а не сама NASA. В программе NASA Asteroid Redirect Mission, планируется посадить модуль на поверхность астероида, отколоть от него большой кусок и направить к Земле для дальнейшего изучения и добычи полезных материалов. Программа уже профинансирована и запланирована на декабрь 2020 г.

Компания Shackleton Energy Company (SEC) рассматривает варианты по созданию первой оперативной базы для добычи льда на Луне. Лед будет использоваться для производства жидкого кислорода и жидкого

водорода для топлива космических аппаратов, создание и запуск первой АЗС в космическом пространстве планируется открытие в 2020 г.

По данным основателя SEC Билла Стоуна, такая орбитальная станция газа (наряду с транспортом на околоземной орбите, предлагаемым Virgin Galactic и Scaled Composites) — одна из важных вещей для освоения космоса людьми [2]. Именно это нужно, чтобы SEC стала первой мировой космической энергетической компанией, предоставляющей ракетное топливо, средства жизнеобеспечения, расходные материалы и иные услуги на низкой околоземной орбите и на Луне.

Б. Стоун считает, что промышленные экспедиции на Луну будут стоить около \$15 млрд, что, по его словам, сопоставимо со стоимостью строительства большого комплекса по добыче нефти из Северного моря. Компания планирует отправить промышленных астронавтов на Луну и быть готовыми к работе в 2020 г. Первоначально основное внимание будет уделено Южному полюсу Луны, где SEC планирует провести две разведывательные миссии, используя роботов, в ближайшие четыре года (рис. 1).

Если разведывательная миссия окажется успешной, то SEC планирует продолжать движение в направлении построения пилотируемой лунной базы и начать промышленную операцию по добыче и переработке воды и лунного грунта.

Производимое SEC топливо из водных источников Луны будет предлагаться всем странам и компаниям. Компания стремится вернуть затраченные деньги в течение десяти лет. Б. Стоун предусматривает, что первая заправочная станция SEC будет расположена около Международной космической станции (МКС), другие станции, будут базироваться в зависимости от спроса.

SEC рассчитывает собрать средства для создания рабочих модулей своей космической программы, используя сайт Rocket Hub [4].

Также прорабатывается вопрос извлечения воды из лунного грунта. В качестве примера можно привести один из проектов NASA: разрабатывается специализированный робот-погрузчик массой 45 кг, максимальная скорость передвижения не превышает 4 сантиметра

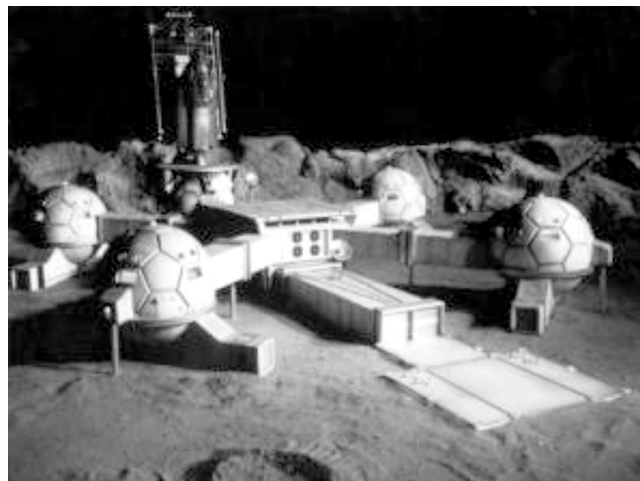


Рис. 1. Проект баз по добыче воды на Луне компании SEC [3]

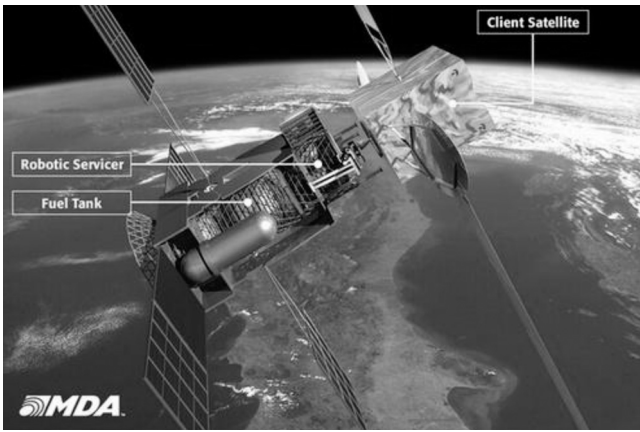


Рис. 2. Проект орбитальной заправочной станции MDA [7]

в секунду, грузоподъемность (по грунту) 18 кг, место переработки грунта – технологическая платформа массой 900 кг. По расчетам, чтобы заправить одну ракету топливом, получаемым гидролизом из лунной воды (кислород и водород), одному такому роботу «RASSOR Excavator’у» потребуется работать пять лет по 16 часов в сутки [5]. Низкая производительность обусловлена не только малым содержанием воды в грунте, но и низкой вероятностью присутствия в нем частиц льда. В лунном грунте в основном присутствует физически и химически связанная вода, что накладывает дополнительные требования к временным и энергетическим параметрам при создании технологии извлечения воды нагревом [1]. Следует учесть, что свойства и структура космического льда может существенно отличаться от земного аналога [6].

Канадская компания MDA планирует создание на орбите Земли заправочной станции для спутников (рис. 2). Уже подписан контракт с компанией Intelsat, которая владеет 5 спутниками связи на орбите. По контракту компания MDA будет заправлять спутники Intelsat в течение 3-4 лет. Стоимость сделки \$280 млн.

Грузоподъемность заправочной станции составляет 2 т. По контракту 5 спутников компании Intelsat нуждаются в 200 кг топлива, т. е. данная заправочная станция израсходует на Intelsat 1 т топлива. Оставшуюся тонну топлива заправочная станция будет продавать спутникам других организаций, если у них будут соответствующие запросы [2].

Трудность постройки заправочных станций в том, что некоторые элементы ракетного топлива криогенные, то есть состоят из очень холодных субстанций, таких как жидкий кислород и водород

NASA собирается заняться изучением астероидов и Марса (2025-2030 гг.), решение проблемы с заправоч-

ными станциями в космосе поможет в осуществлении данных программ.

В разработке проектов по постройке орбитальных заправочных станций планируют принять участие 4 компании: Analytical Mechanics Associates Inc, Ball Aerospace & Technologies Corporation of Boulder., The Boeing Company of Huntington Beach и Lockheed Martin Space Systems Company [2].

Проблемы развития космической горно-перерабатывающей отрасли

Техническая проблематика КГПО в рамках настоящей статьи не предполагает рассматривать КГПО в части сложности и специфики создания космической техники для реализации упомянутых выше задач, ориентированных, в первую очередь, на создание и обеспечение работы космических заправочных и ремонтных станций. Рассматривается только проблематика по разведке, добычи, переработки сырья на природных космических объектах.

Из-за ограниченности массо-габаритных размеров технологического оборудования для добычи и переработки сырья, а также наличия существенных ограничений по использованию воды в технологических процессах, возникает проблема использование типовых горно-перерабатывающих технологий.

Сложности использования типовых схем рудоподготовки и обогащения на основе традиционного принципа «руда–вода» исключают основные традиционные технологические операции из перечня рассматриваемых применительно к горному космическому делу.

На основе анализа технических характеристик, в табл. 1 приведены удельные показатели типового горного оборудования на этапах передела, используемого в земных условиях [8].

Анализ данных, приведенных в табл. 1, показывает, что только транспортировка основного технологического оборудования, для переработки 10 т/ч горной массы (без учета материалоемкости сооружений и вспомогательного оборудования) потребует доставки груза массой 180-270 т, что эквивалентно затратам на транспортировку в \$1,8-2,7 млрд. Очевидно, что техническая реализуемость и рентабельность подобных проектов сомнительна.

Доставка 1 кг груза на околоземную орбиту составляет около \$10000, доставка того же груза на Луну – \$20000. Еще дороже обойдется доставка космических полезных ископаемых для переработки на Землю. В то же время, по оценкам специалистов NASA доставка того же количества груза из пояса астероидов или с

Таблица 1

Величина удельной энергоёмкости и удельной материалоемкости оборудования для переработки одной тонны минерального сырья в час

№ п/п	Наименование этапов технологического передела	Удельная энергоёмкость, кВт·ч/т	Удельная материалоемкость оборудования, кг/(т·ч)
1.	Буровзрывные работы, экскавация, транспортировка горной массы	2-3	2000-3000
2.	Рудоподготовка, обогащение	30-40	6000-9000
3.	Выделение полезного компонента, получение готовой продукции	400-600	10000-15000
	Итого:	432-643	18000-27000

Марса на орбиту Луны потребует гораздо меньших затрат. Таким образом, можно предположить, что именно Луна явится в обозримом будущем объектом добычи и переработки полезных ископаемых вне Земли [5, 9].

Поверхностный слой Луны — реголит состоит из частиц разрушенных горных пород. Можно выделить две основные совокупности частиц: частицы первичных магматических горных пород и частицы, подвергшиеся заметным преобразованиям на поверхности Луны. Изучение реголита показало, что в нем находится много зерен отдельных минералов и их сростков: стекловидных частиц, полевого шпата, железистых силикатов ильменита [10].

Вероятно возникновение дополнительных технологических сложностей при экскавации лунного грунта. Солнечный ультрафиолет выбивает из частиц лунного грунта электроны и частицы грунта приобретают положительный заряд. Есть предположение, что ночью лунная пыль приобретает отрицательный заряд, за счет воздействия свободными электронами из состава лунного ветра. Наличие электрического заряда приводит к аномальному налипанию частиц грунта [11].

Отсюда следует, что для развития горных космических технологий потребуются принципиально новые подходы в поиске и реализации к практическому использованию новых физических принципов при разработке технологий и оборудования.

Экспериментально подтверждено, что при воздействии на грунт импульсного электромагнитного поля, наблюдается переход части физически связанной воды (до 45%) в свободное состояние [9]. Анализ результатов экспериментов позволяет предполагать, что новая электромагнитная технология позволит снизить температуру выпаривания воды из лунного грунта в 1,5-2,5 раза и увеличить производительность технологического оборудования более чем в 2 раза по сравнению с американским аналогом RASSOR Excavator'у [5, 9].

Строительство лунных баз потребует использование материалов, произведенных из местного сырья.

Физические принципы воздействия на горные породы, традиционно используемые в земных условиях мало приемлемы. Возможный вариант получения строительного материала из горных пород природных космических объектов может основываться на плавлении горной массы, с последующим формированием требуемых объектов [12].

Развитие горных космических технологий может потребовать использования энергетических воздействий за счет приложения электромагнитных полей с целью управления технологическими свойствами минерального сырья [9, 13]. В настоящий момент в горном деле уже применяются высокоэнергетические и импульсные электромагнитные технологии [14, 15].

Также известны технологии термического разрушения горных пород, которые не требуют применения оборудования с высоким показателем металлоемкости. Данный метод основывается на растрескивании горной породы под действием реактивной струи продуктов горения из сопла Ловаля. Термическое бурение успешно использовалось в земных условиях [16].

Космическая энергетика может иметь свои особенности по эффективности использования: ядерная энергетика, гелиоэнергетика (прямое воздействие излучения), солнечная энергетика (преобразование в электрическую энергию), а также перспективная энергетика на основе гелия-3 [17].

Горно-космические технологии должны иметь в качестве приоритетного направления — снижение материалоемкости, а не энергоемкости. Например, в качестве одной из возможностей может рассматриваться нагрев и испарение горной породы вплоть до полной сублимации с последующим разделением элементов и получения моноатомных веществ.

Для сравнения с характеристиками, приведенных в табл. 1, сделана экспертная оценка значений аналогичных характеристик, основанных на использовании гелиоэнергетики (рис. 3). Учитывая, что плотность энергии в окрестности орбиты Луны составляет 1,2 кВт/м², а затраты энергии на испарение и сублимацию большинства веществ составляют

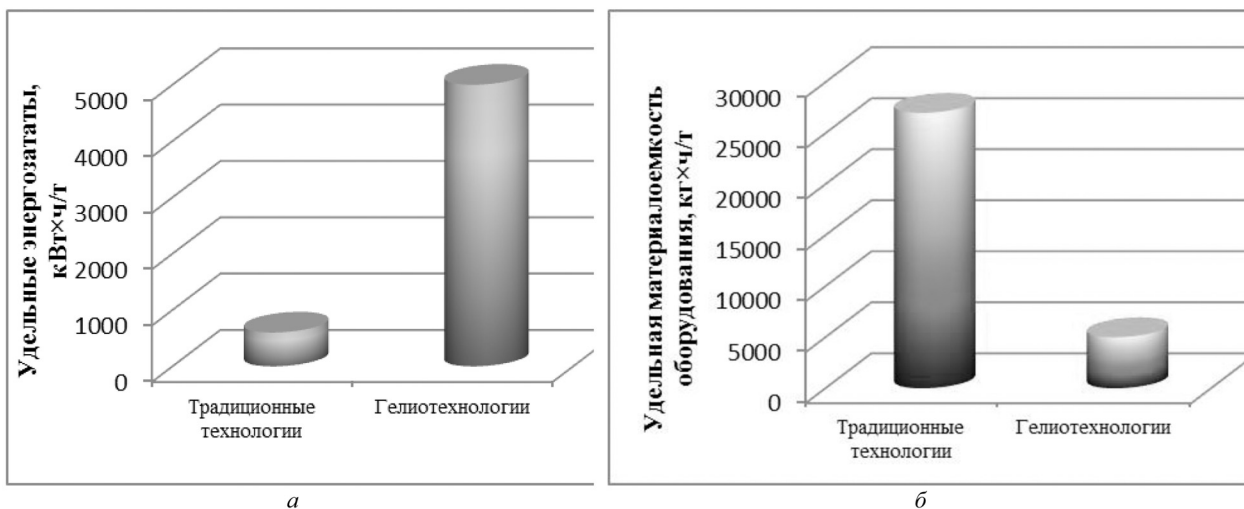


Рис. 3. Сопоставление средних показателей традиционной технологии и гелиотехнологии при добыче 1 т минерального сырья и его переработки до получения металла: а — удельная энергоемкость процесса; б — удельная материалоемкость оборудования

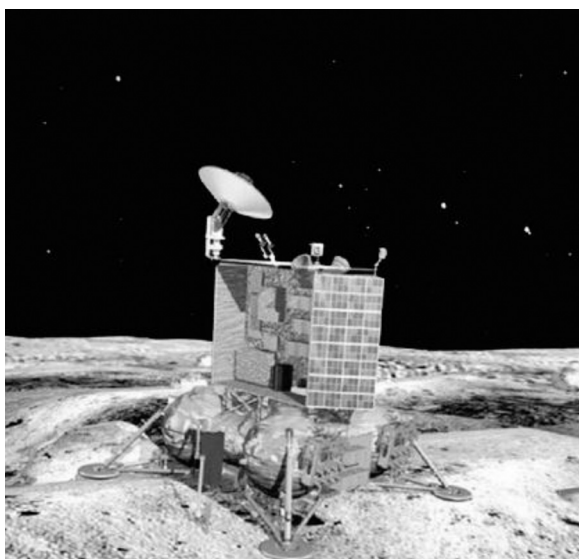


Рис. 4. Аппарат «Луна-27»

420-2800 кВт·ч/т, можно оценить энергетические и массовые характеристики гелиоиспарителя. Для сублимации и испарения 1 т вещества потребуются удельные энергозатраты от 500 до 5000 кВт·ч/т при массе энергетической установки от 0,5 до 5 т, что значительно меньше аналогичных показателей, приведенных в табл. 1.

Формирование национальных проектов России, имеющих междисциплинарный характер и обладающих высокой инновационной составляющей, является важной задачей в условиях существующей жесткой конкуренции.

Ограниченность средств, выделенных на национальные и международные космические проекты, обуславливает необходимость решения первоочередных задач при тщательном выборе направлений научно-технических проектов. Кроме того, в данной сфере свою нишу занимают частные компании (наиболее характерно для США), которые также влияют на выбор направлений развития космической техники.

Такие проекты могут быть направлены на глубокую модернизацию базовых и создание новых отраслей экономики. В перспективе, они должны стать значимым инструментом государственной экономической политики и содействовать развитию значимой части инновационного сектора России.

Зарождающееся перспективное научно-практическое направление, ориентированное на создание технологий добычи и извлечения полезных компонентов на природных космических объектах может стать основой проекта, обладающего всеми выше перечисленными признаками.

Тенденции развития космической отрасли в России

При всей неординарности горно-космического проекта, многие эксперты высказывают сомнение о его целесообразности и своевременности. Однако, на его реализацию, начиная от формирования концепции и заканчивая созданием образцов техники, может потребоваться от 5 до 15 лет. Если разработка концепции

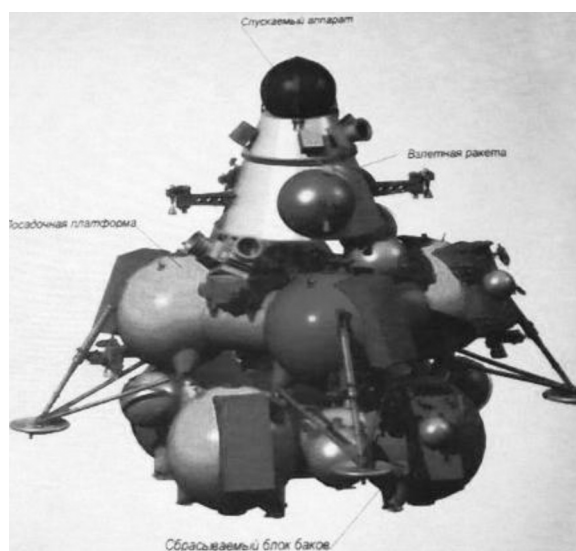


Рис. 5. Станция «Луна-28» [19]

проекта КГПО и его реализация будет начата в настоящее время, то возникнут предпосылки создать основу для лидерства России в области космических услуг.

К приоритетам российской федеральной космической программы (ФКП) относится целый ряд направлений, включая: развитие и поддержание орбитальной группировки, фундаментальные космические исследования (в том числе исследование Луны с запуском пяти космических аппаратов) сохранение места на мировом рынке космических запусков.

Центральной частью лунной программы станет аппарат «Луна-27» (рис. 4), который сядет в одной из приполярных областей Луны. Его задача — взять пробы грунта с глубины до двух метров, при этом сохранить включения летучих веществ, что налагает специальные требования к технологии бурения и отбору проб. Еще одним важным экспериментом станет станция «Луна-28» (рис. 5), которая не только возьмет образцы грунта с Луны, но и доставит его на Землю с проведением более тонкого геохимического анализа, исследованием изотопного состава [18].

Предлагается, совместно с Европейским космическим агентством (ЕКА), реализовать проект возвращения образцов грунта с Фобоса в рамках проекта «Бумеранг». В дальнейшем предусматривается аналогичная миссия за грунтом Марса.

В России рынок космических услуг остается исключительно за государственными предприятиями и организациями.

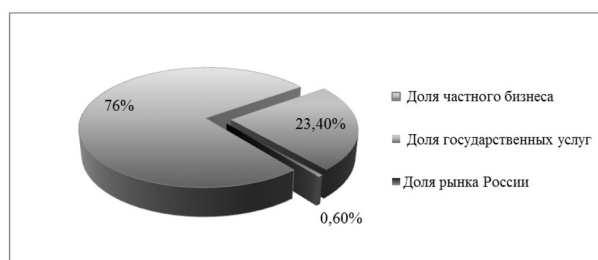


Рис. 6. Распределение общего объема мирового рынка космических услуг по состоянию на 2014 г.

По состоянию на 2014 г., согласно данным ежегодного отчета Space Report, объем мирового космического рынка составлял \$330 млрд (рис. 6) [20].

Коммерческая доля рынка составляет 76% (более \$250 млрд), государственный сегмент — порядка \$80 млрд.

Доля России на мировом космическом рынке составляла 0,6%. Низкую долю России на мировом рынке связывают с малым количеством коммерческих спутников и недостаточным спросом населения на услуги спутниковой связи и телевидения.

К 2020 г. Россия планирует допустить к рынку космических услуг частные компании. К этому времени власти надеются создать эффективную систему поддержки российских предприятий в этой отрасли

Заключение

Приведенный аналитический обзор планируется использовать при разработке концепции инициативного проекта развития космической горно-перерабатывающей отрасли.

Проект будет ориентирован на достижение лидирующих позиций России при создании и функционировании системы добычи и переработки сырья на природных космических объектах для обеспечения необходимыми компонентами орбитальных заправочных и сервисных станций.

Учитывая масштабность проекта, его реализация возможна лишь при тесном сотрудничестве Институтов развития РФ, субъектов инвестиционного бизнеса, ориентированных на решение предметных разделов сложных инновационных задач и соответствующих государственных структур РФ в рамках частно-государственного партнерства.

Принципы частно-государственного партнерства необходимо будет определить до 2020 г. До указанного срока потребуются проработка концептуальных аспектов проекта, включая проработку целого комплекса предметных технических предложений с учетом междисциплинарного характера задач.

Для обеспечения инвестиционной привлекательности проекта, который является по своей сути венчурным, необходима тщательная оценка рисков технического, финансового и коммерческого характера.

На первом этапе, предполагающим проработку комплекса предметных технических предложений, планируется осуществить начальную капитализацию результатов интеллектуальной деятельности, за счет их адаптации к существующим условиям коммерциализации.

Список использованных источников

1. А. Ализар. «NASA готово к постройке орбитальной станции для ремонта и заправки спутников» июнь 2015 г. <https://geektimes.ru/post/252282>.
2. План по созданию первой лунной базы и заправочной станции в космосе. 22 октября 2011 г. <http://www.infuture.ru/mobile/article/5188>.
3. <http://www.acmeroug.ru>.
4. Лунная горнодобывающая компания США и норвежские технологии компании для разработки буровых и энергетических решений для операций на Луне. Март 2015 г. <http://www.shackletonenergy.com>.

5. Ю. Ильин. «Лунное такси и эмиграция на Марс: куда простираются амбиции «аэрокосмических частников». Февраль 2013 г. <http://compulenta.computerra.ru/tehnika/robotics/10004210>.
6. <http://www.kosmolenta.com>.
7. О. В. Мосин. Свойства льда для его модификаций. 17 мая 2008 г. <http://www.o8ode.ru/article/krie/ice.htm>.
8. В. И. Городниченко, А. П. Дмитриев. Основы горного дела: учебник для вузов. М.: Издательство «Горная книга», 2008. — 464 с.
9. П. П. Ананьев, О. М. Гридин, А. В. Плотникова, Ю. В. Смирнова. Технологии извлечения воды из грунтов космических природных объектов//ГИАБ, № 10, 2013. С. 272-277.
10. Фундаментальные космические исследования. В 2-х кн. Кн. 2: «Солнечная система»/Под науч. ред. Г. Г. Райкунова. М.: Физматлит, 2014. — 456 с.
11. Н. Д. Семкин, А. С. Видманов. Модели динамики движения лунной пыли и методы получения потоков заряженных частиц пылевых лабораторных условиях//Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. С. 164-176.
12. А. М. Игнатова, М. Н. Игнатов. Использование ресурсов реголита для освоения лунной поверхности// Международный журнал экспериментального образования, № 11, 2013. С. 101-110.
13. С. А. Гончаров, П. П. Ананьев. Применение магнитно-импульсной обработки руд с целью повышения технологических показателей их переработки//Горный журнал, № 5, 2008. С. 20-22.
14. П. П. Ананьев, В. А. Чантурия, Е. С. Томская. Переработка и комплексное использование минерального сырья//Горный журнал, № 12, 2014.
15. А. В. Плотникова. Ресурсосберегающая технология переработки труднообогатимых руд на основе магнитно-импульсного воздействия//Известия вузов. Черная металлургия. № 9. 2013. С. 69-70.
16. С. А. Гончаров. Механизм термического расширения горных пород//Горный журнал, № 9, 2012. С. 53-55.
17. Э. М. Галимов. Замыслы и просчеты: фундаментальные космические исследования в России последнего двадцатилетия. М.: Издательство УРСС, 2013.
18. «РАН и Роскосмос вместе будут исследовать космос и осваивать Луну. Подписано соглашение о сотрудничестве между РАН и ФКА» 24 декабря 2015 г. <http://www.ras.ru/news/shownews.aspx?id=98b4812e-0a53-49ff-8130-8dbdd5529a7f>.
19. <http://www.rususa.com>.
20. Г. Перемитин. Россия пустит частные компании на рынок космических услуг. 27 октября 2015 г. http://www.rbc.ru/technology_and_media/27/10/2015/562f37ee9a79471c24b529d6.

Prospects of development of space mining and processing industry

P. P. Anan'ev, Candidate of technical Sciences.

S. V. Vasilev, expert, Doctor of Technical Sciences.

R. V. Meshcheryakov, Doctor of Technical Sciences, professor, vice-rector for science and innovation, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics.

A. V. Plotnikova, MMI NUST MISIS.

K. O. Belyakov, Vice-President of Strategic Development Elecard.

E. B. Kuznetsov, Deputy General Director, RVC OJSC.

The article contains the analysis of global trends focused on the development of technologies of extraction and processing of minerals of natural space objects.

Evaluation of investment attractiveness of the projects to create orbital fuel stations and provision of jet fuel and cryogenic components produced from water natural space objects.

Based on the analysis of energy and mass-dimensional requirements, possible directions of development of space mining and processing industry, as an innovative interdisciplinary areas.

Keywords: natural space objects, water, mining, processing, orbital refueling stations, global trends.