

# Добыча полезных ископаемых в космосе: обзор современных исследований и разработок

А.К. Кирсанов✉, С.А. Вохмин, Г.С. Курчин, Е.П. Волков

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Российская Федерация

✉ AKirsanov@sfu-kras.ru

**Резюме:** В связи с планомерным истощением ресурсов на нашей планете добыча полезных ископаемых в космосе, которая когда-то была футуристической идеей, на сегодняшний день быстро становится областью активных изысканий. Данная статья представляет собой обзор актуальных исследований и инженерных разработок, направленных на создание новых методов и технологий добычи ресурсов на таких внеземных небесных телах, как Луна или астероиды. В исследовании демонстрируется ресурсный потенциал, который человечество может начать извлекать для своих нужд, а также краткий перечень уже действующих программ разных космических агентств, направленных на дальнейшее освоение космоса. В работе рассматриваются существующие технологические достижения и коммерческие интересы, стимулирующие данный вид деятельности. Дополнительно показаны такие перспективные направления космической добычи, как автоматизированные роботизированные системы, биодобыча, различные виды взрывных работ и транспортировка частей астероида на Землю для дальнейшего извлечения из него полезных компонентов. Помимо этого, в работе представлена информация о существующих технологиях жизненного обеспечения, необходимых для комфортного нахождения специалистов на космических телах, в случае если это подразумевает выбранная технология. На основе анализа современного состояния исследований и разработок сделан вывод о перспективности и значимости дальнейших усилий в области космической добычи для будущего освоения космического пространства и обеспечения потребностей человечества в ресурсах.

**Ключевые слова:** добыча полезных ископаемых в космосе, внеземные ресурсы, добыча на астероидах, изучение астероидов, планетная геология, ресурсы космических тел, экономика космической отрасли

**Для цитирования:** Кирсанов А.К., Вохмин С.А., Курчин Г.С., Волков Е.П. Добыча полезных ископаемых в космосе: обзор современных исследований и разработок. *Горная промышленность*. 2024;(4):75–80. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-4-75-80>

## Space mining: a review of current research and developments

A.K. Kirsanov✉, S.A. Vokhmin, G.S. Kurchin, E.P. Volkov

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

✉ AKirsanov@sfu-kras.ru

**Abstract:** Due to gradual depletion of the Earth's resources, space mining, which was once a futuristic idea, is now rapidly becoming an area of active research. This paper provides an overview of relevant research and engineering developments aimed at creating new methods and technologies for resource extraction on extraterrestrial celestial bodies such as the Moon or asteroids. The study shows the resource potential that humankind can begin to exploit for its needs and provides a brief list of already active programs of different space agencies aimed at further space exploration. The paper discusses the existing technological advances and commercial interests promoting this activity. Besides, it shows such promising space mining areas as automated robotic systems, biomineral, various kinds of blasting, and transportation of asteroid parts to the Earth for further extraction of useful components. The paper also provides information on the existing life support technologies required to secure comfortable existence of the specialists on the space bodies, in case the chosen technology implies it. Relying on the analysis of the current state of research and development, the authors conclude that further efforts in the area of space mining are promising and important for the future exploration of outer space and for meeting humanity's resource needs.

**Keywords:** space mining, extraterrestrial resources, asteroid mining, asteroid exploration, planetary geology, resources of space bodies, space economics

**For citation:** Kirsanov A.K., Vokhmin S.A., Kurchin G.S., Volkov E.P. Space mining: a review of current research and developments. *Russian Mining Industry*. 2024;(4):75–80. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-4-75-80>

**Введение**

Глобальный спрос на минеральные ресурсы в современном мире быстро растёт [1], что обуславливается постоянной разработкой новых, экологически чистых энергетических технологий, таких как ветряные турбины, солнечные батареи, аккумуляторы для электромобилей и т. д. (табл. 1) [2]. Однако в связи с постепенным истощением континентальных и морских месторождений человечество неминуемо будет создавать более совершенные технологии, позволяющие обратить свой взор на космические тела как на источник восполнения этих критически важных элементов [3–7].

**Таблица 1**  
Необходимые полезные ископаемые для различных экологически чистых технологий

**Table 1**  
Minerals required for various environmentally friendly technologies

Сектор «зелёных» технологий	Перечень необходимых полезных ископаемых
Солнечная энергия	Бокситы, алюминий, кадмий, медь, галлий, германий, индий, железо, свинец, никель, селен, кремний, серебро, теллур, олово, цинк
Энергия ветра	Бокситы, алюминий, хром, кобальт, медь, железо, свинец, марганец, молибден, редкоземельные элементы, цинк
Электромобили и различные накопители энергии	Бокситы, алюминий, кобальт, медь, графит, железо, свинец, литий, марганец, никель, редкие земли, кремний, титан

Возможность добычи полезных ископаемых в космосе ранее относилась к области научной фантастики, а сегодня она изучается в рамках новой активно развивающейся концепции. Просторы космоса таят в себе бесчисленное множество небесных тел, многие из которых согласно проведённым многочисленным исследованиям богаты ценными минералами [8–11]. Именно поэтому в последние годы учёными со всего мира были достигнуты значительные успехи в создании различных технологий, необходимых для добычи полезных ископаемых в космосе, некоторые из них рассмотрены в данной работе.

В последнее время наблюдается всплеск интереса как со стороны правительственных агентств (например, программа NASA по перенаправлению астероидов – Asteroid Redirect Mission; Люксембургское Космическое Агентство, продвигающее коммерческий сектор добычи; Японское агентство аэрокосмических исследований, проявляющее интерес к добыче полезных ископаемых на астероидах и др.), так и частных компаний (например, Deep Space Industries (в 2019 г. приобретена компанией Bradford Space); Arkyd Astronautics (в 2009 г. переименованная в Planetary Resources, Inc.), Momentus Space; Honeybee Robotics и др.) к изучению возможности и коммерческой целесообразности добычи внеземных ресурсов [12–16].

Таким образом, с учётом повышающегося интереса к этой области целью данной статьи являлось краткое описание современного состояния исследований и разработок в области космической добычи полезных ископаемых.

**Методология**

При проведении настоящего исследования был осуществлён анализ профильных исследований и разработок в области космической добычи по различным научным базам данных. Помимо этого, для всестороннего освещения темы были использованы отчёты космических агентств разных стран и компаний.

**Ресурсный потенциал**

Добыча полезных ископаемых в космосе открывает доступ к огромным залежам ценных ресурсов, запасы которых в околоземных небесных телах, как считается, могут быть намного больше, чем на нашей планете [17; 18]. Данное утверждение базируется на многолетних исследованиях плотности, фотометрии, спектроскопии и радиолокационной отражаемости внеземных объектов, потенциально подходящих под критерии космической добычи, а также на образцах, доставленных на Землю.

Луна, астероиды, кометы – всё это потенциально представляет собой поле для изучения дальнейшей возможности вовлечения в промышленную космическую разработку. Ниже будут кратко описаны основные направления по изучению ресурсного потенциала околоземных небесных тел.

**Луна**

Целью геологоразведочных работ на Луне является оценка потенциала добычи ресурсов, необходимых для развития лунной инфраструктуры и обеспечения долгосрочного космического присутствия человека за пределами нашей планеты. К числу приоритетных ресурсов относятся [19]:

- пропелленты – водяной лёд, залегающий в полярных областях Луны, может служить источником для производства ракетного топлива, что позволит значительно снизить расходы на транспортировку грузов с Земли;
- вода – является незаменимым ресурсом для жизнеобеспечения человека в космических условиях. Она может быть получена из лунного льда путём его десублимации и электролиза;
- водород и кислород – эти элементы могут быть получены из воды и лунных минералов, что обеспечит производство дыхательной смеси и топлива для космических аппаратов;
- строительные материалы – реголит и горные породы, обильно представленные на лунной поверхности, могут быть использованы для возведения лунных баз и других объектов;
- минеральное сырьё – Луна богата летучими, редкими и редкоземельными элементами, которые представляют значительную ценность для различных отраслей промышленности.

Добыча этих ресурсов позволит создать на Луне самодостаточную экономику, снизив зависимость от поставок с Земли и стимулируя дальнейшее космическое исследование.

В этой связи в последнее время многие страны запустили множество космических кампаний по созданию различного рода инфраструктурных объектов для добычи полезных ископаемых на Луне.

Так, например, к 2035 г. Японское агентство аэрокосмических исследований хочет построить на Луне завод по производству водородного топлива из добытого льда, которое будет использоваться как для заправки луноходов и

выработки электричества, так и для полётов между Луной и окололунной космической станцией.

В мае 2014 г. с целью создания на Луне обитаемой базы и инфраструктуры для добычи полезных ископаемых, заместителем председателя правительства РФ Д.О. Рогозиным был анонсирован проект российской лунной программы, включающий в себя отправку автоматических межпланетных станций («Луна-25, 26, 27, 28») для развёртывания полигона; пилотируемые экспедиции на орбиту Луны без высадки космонавтов; высадка космонавтов на Луну и развёртывание первой полноценной инфраструктуры для добычи полезных ископаемых. Завершение данной программы запланировано на 2040 г.

В мае 2019 г. президент США Дональд Трамп объявил о начале Программы «Артемида» (Artemis) – амбициозного лунного проекта, рассчитанного на создание устойчивого присутствия человека на Луне к 2030 г. и использование Луны как трамплина для будущих миссий на Марс. Этапы реализации проекта:

- Artemis I: беспилотный облёт Луны (успешно завершён 11 декабря 2022 г.);
- Artemis II: пилотируемый облёт Луны (планируется на 2025 г.);
- Artemis III: высадка астронавтов на лунную поверхность в районе южного полюса (планируется на 2025 г.);
- Artemis IV и далее: доставка дополнительных модулей для лунной станции Gateway, проведение научных исследований, добыча ресурсов.

На данный момент к программе Artemis присоединились 18 стран: США, Канада, Европейское космическое агентство (ЕКА), Япония, Австралия, Бразилия, Великобритания, Израиль, Италия, Южная Корея, Люксембург, Мексика, Новая Зеландия, Норвегия, Польша, Румыния, ОАЭ, Саудовская Аравия, Украина.

Помимо такой глобальной космической программы, как «Артемида», практически у каждой страны-участницы есть и свои локальные космические программы. Так, например, в августе 2023 г. Индия стала первой страной, успешно посадившей космический аппарат в районе южного полюса Луны, и четвёртой страной, совершившей мягкую посадку на Луну, после Советского Союза, США и Китая. Полёт проходил под эгидой Индийской космической исследовательской организации (ISRO) в рамках программы Chandrayaan.

Учитывая вышеизложенное, добыча лунных ресурсов сулит не только экономические выгоды, но и открывает новые горизонты для научно-исследовательской деятельности. Изучение лунных образцов, производство топлива на месте, создание лунных баз – всё это может стать катализатором для дальнейшего освоения космоса, прокладывая путь к Марсу и другим планетам.

### Астероиды

В контексте добычи полезных ископаемых главное отличие астероида от Луны в том, что некоторые астероиды по сути являются концентрацией этих полезных ископаемых. Согласно общераспространённой классификации глобально астероиды делятся на 3 класса (табл. 2), каждый из которых содержит в себе определённые типы полезных компонентов.

Считается, что астероиды, особенно металлические (М-класса), богаты драгоценными металлами, такими как платина, золото и палладий. Эти ресурсы крайне важны для различных технологических применений, от электроники до аэрокосмической техники. На этом их потенциал не исчерпывается – астероиды являются потенциальными источниками железа и никеля (важнейшими компонентами для производства стали), а также могут содержать редкоземельные элементы (необходимые для современной электроники), и даже азот (необходим для систем жизнеобеспечения и производства удобрений).

Осознавая данную ценность астероидов, человечество уже сейчас активно готовится к их освоению. Миссии NASA, такие как OSIRIS-REx и Lucy, уже сейчас изучают астероиды, собирая информацию об их составе и потенциальных возможностях добычи. Частные компании, такие как SpaceX и Planetary Resources, разрабатывают планы по добыче астероидных ресурсов, видя в этом не только экономическую выгоду, но и возможность обеспечить человечество ресурсами на долгие годы вперёд.

### Кометы

Кометы представляют наименьший интерес для добычи ресурсов. Из-за высокой эллиптичности орбит для их достижения требуется скорость, значительно большая, чем для полётов к астероидам. Постоянные испарения газа и пыли на кометах создают угрозу для систем косми-

**Таблица 2**  
Классы астероидов и их детализированное представление

**Table 2**  
Asteroid classes and their description

Класс астероидов	Химический состав	Ресурсы	Примечание
Класс C – углеродный	Глинистые и силикатные породы	Вода, углеродистые соединения	Самые распространённые. Наиболее удалённые от Солнца; самые древние и сохранившиеся благодаря низким температурам
Класс S – силикатный	В основном каменные материалы (например, оливин, пироксен) и никель-железные металлы	Никель и железо	Существуют в основном во внутренней части Главного пояса астероидов, и многие околоземные объекты относятся к этому типу. Данный класс считается источником наиболее часто встречающихся хондритовых метеоритов
Класс M – металлический	Преимущественно металл. Следы силикатов	Никель, железо, металлы платиновой группы, кобальт, золото	Также называются X-классом. Считается, что это остатки более крупных (>100 км) астероидов, от которых остались только чрезвычайно плотные металлические ядра после массивных столкновений на заре существования Солнечной системы. Находятся в средней части Пояса астероидов

ческих аппаратов и затрудняют навигацию в их окрестностях. Однако, несмотря на эти трудности, кометы остаются источником воды и других важных ресурсов, что делает их потенциально ценными и пригодными для будущих космических миссий и исследований [20].

### Технологические достижения

Реализация идеи космической добычи требует преодоления уникальных проблем, связанных как с прямыми трудностями, например, с нашим уровнем технологической готовности (скорее всего потребуются новые технологии разведки и добычи полезных ископаемых) или безопасностью персонала (космическая среда представляет собой набор таких сложностей как экстремальные температуры, радиационное излучение, вакуум), так и с глобальными вопросами, такими как правовые и этические нормы добычи, международное сотрудничество и т. д.

Несмотря на многочисленные трудности, связанные с будущей добычей полезных ископаемых в космосе, научное сообщество по всему миру активно разрабатывает новые технологии, способные сделать эту амбициозную задачу реальностью.

### Инновационные методы добычи

Исследователи разрабатывают инновационные методы добычи, адаптированные к условиям микрогравитации и вакуума космического пространства. Эти методы включают в себя использование роботов-манипуляторов, электростатической сепарации, 3D-печати и других передовых технологий.

В работе [21] рассматривается возможность использования кумулятивных зарядов взрывчатых веществ для производства взрывных работ на астероидах с их дальнейшим перенаправлением на нашу планету. Авторы предполагают, что перспективный для отработки кусок астероида подходящей формы может быть направлен на Землю, где из него уже и извлекут ценные компоненты. Предполагается, что этот метод будет более экономичным, поскольку не требует транспортировки большого количества оборудования к астероиду.

В работе канадских учёных [22] рассматривалось несколько методов бурения. В их исследовании подчёркиваются проблемы использования в космосе взрывчатых веществ, что связано с такими факторами как их стабильность и транспортабельность, а также безопасность производства работ. Авторы рассмотрели такой альтернативный метод как плазменный взрыв, который использует электрическую энергию для дробления породы.

В работе американских исследователей [23] говорится о том, что традиционные методы добычи на Луне и Марсе не совсем подходят для таких условий, и рассматриваются различные варианты добычных роботизированных систем.

В 2019 г. на борту МКС был проведён эксперимент по биодобыче под названием BioRock<sup>1</sup>, где изучалась способность микробов извлекать элементы из базальта (распространённой горной породы, встречающейся на Луне и Марсе). Результаты данного эксперимента подтверждают, что микробы могут функционировать и расщеплять породу даже в условиях микрогравитации. Аналогичные эксперименты проводились Японским

агентством аэрокосмических исследований и Европейским космическим агентством.

Осенью 2023 г. британская компания Asteroid Mining Corp. представила свою разработку под названием SCAR-E (Space Capable Asteroid Robotic-Explorer – космический робот исследователь-астероидов). На данный момент робот напрямую не предназначен для добычи полезных ископаемых, но после планируемых модернизаций может использоваться для разведки местности на любом небесном объекте, а также сбора образцов породы.

Из отечественных разработок следует выделить буровзрывную технологию ведения горных работ на Луне и Марсе при проведении наклонной штольни [24].

### Устойчивые технологии жизненного обеспечения

Для обеспечения жизнедеятельности людей вдали от Земли необходимо создавать замкнутые системы жизнеобеспечения, способные регенерировать воду, воздух и производить продукты питания. Эти системы будут играть решающую роль в обеспечении долгосрочного присутствия человека в космосе для добычи полезных ископаемых.

Для этих целей с 2008 г. на Международной космической станции (МКС) используется сложная система регенерации воды, позволяющая восполнять порядка 98% жидкости.

Такая технология, как система электролиза компании Bosch на МКС, удаляет углекислый газ, выдыхаемый астронавтами, и преобразует его в кислород, что помогает поддерживать пригодную для дыхания атмосферу внутри космического корабля. Также внимания заслуживает разработка Французской компании Air Liquide – «Sabatier», которая использует химический процесс для превращения углекислого газа и водорода в воду и кислород.

Поскольку производство продуктов питания является основой жизни как на Земле, так и за её пределами, разработка новых и усовершенствование действующих систем выращивания являются одними из приоритетных задач. С 2014 г. по настоящее время на МКС работает система «Veggie», позволяющая астронавтам выращивать для себя свежую зелень<sup>2</sup>.

Помимо разработок новых методов добычи полезных ископаемых и технологий, призванных улучшить жизненное обеспечение людей в космосе, учёные рассматривают и такие варианты, как возможность создания поселения людей в астероидах, строительство модульных тороидальных, сферических или цилиндрических лунных баз и других объектов поселения людей в космосе [25; 26]. С позиции добычи полезных ископаемых этот факт говорит нам о потенциальном снижении негативного влияния горнодобывающей промышленности на окружающую среду нашей планеты, а также интенсификации развития инновационных разработок во всех сферах (создание новых материалов, сплавов, методов строительства и т. д.), что, в свою очередь, станет новым этапом в развитии человечества.

Учитывая вышеизложенное, можно заключить, что несмотря на значительные трудности, научно-технический прогресс неуклонно приближает человечество к реализации космической добычи. Разработка новых

<sup>1</sup> Space Station Research Integration Office. Harnessing the power of microbes for mining in space. 2022. Available at: <https://www.nasa.gov/missions/station/iss-research/harnessing-the-power-of-microbes-for-mining-in-space/> (accessed: 07.05.2024).

<sup>2</sup> National Aeronautics and Space Administration. Veggie. Available at: [https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2019/04/veggie\\_fact\\_sheet\\_508.pdf](https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2019/04/veggie_fact_sheet_508.pdf) (accessed: 07.05.2024).

технологий, международное сотрудничество и инновационные подходы открывают путь к новому этапу космической экспансии и добыче ценных ресурсов, которые могут стать ключом к решению проблем человечества на Земле.

### Заключение

Несмотря на многочисленные трудности, связанные с суровыми условиями космоса, огромными расстояниями и высокими на данный момент капитальными затратами, интенсивные исследования и разработки в области космической добычи открывают новые возможности для реализации этой амбициозной задачи.

Ведущиеся в настоящее время поиски потенциальных космических месторождений, разработка технологий роботизированной добычи и развития концепции исполь-

зования ресурсов на месте (In-Situ Resource Utilization – сокращённо ISRU) закладывают основу для будущего, в котором космическая добыча станет реальностью. Данная деятельность может обеспечить доступ к важнейшим ресурсам, которых на Земле становится всё меньше, стимулировать технологический прогресс и, возможно, привести к открытию совершенно новых ресурсов.

Кроме того, добыча полезных ископаемых в космосе в сочетании с технологиями ISRU может проложить путь к созданию устойчивого присутствия человека за пределами Земли, что позволит осваивать дальний космос и колонизировать другие небесные тела. Продолжая инвестировать в развитие технологий космической добычи, человечество открывает будущее, богатое ресурсами и обладающее потенциалом для расширения наших возможностей на просторах космоса.

### Список литературы / References

1. Кирсанов А.К., Саая С.Ш., Карванен А.Е., Анушенков С.В., Лопатина А.Н. Обзор современного состояния мировой горнодобывающей промышленности. *Маркшейдерия и недропользование*. 2023;(2):38–43. [https://doi.org/10.56195/2079332\\_2023\\_2\\_38\\_43](https://doi.org/10.56195/2079332_2023_2_38_43)  
Kirsanov A.K., Saaya S.Sh., Karvanen A.E., Anushenkov S.V., Lopatina A.N. Overview of the current state of the global mining industry. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2023;(2):38–43. (In Russ.) [https://doi.org/10.56195/20793332\\_2023\\_2\\_38\\_43](https://doi.org/10.56195/20793332_2023_2_38_43)
2. Fleming M., Lange I., Shojaeina S., Stuermer M. Mining in space could spur sustainable growth. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2023;120(43):e2221345120. <https://doi.org/10.1073/pnas.2221345120>
3. Мельниченко А.М. Увеличение доли маломасштабных и среднемасштабных месторождений в горнодобывающем комплексе России. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2015;(11):400–402. Режим доступа: [https://giab-online.ru/files/Data/2015/11/400\\_402\\_11\\_2015.pdf](https://giab-online.ru/files/Data/2015/11/400_402_11_2015.pdf) (дата обращения: 24.06.2024).  
Mel'nichenko A.M. About increasing the part of the small-scale and middle-scale deposits in mining sector of Russian Federation. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2015;(11):400–402. (In Russ.) Available at: [https://giab-online.ru/files/Data/2015/11/400\\_402\\_11\\_2015.pdf](https://giab-online.ru/files/Data/2015/11/400_402_11_2015.pdf) (accessed: 24.06.2024).
4. Мининг С.С. Геолого-экономическая оценка месторождений твердых полезных ископаемых в условиях истощения минеральных ресурсов. *Маркшейдерский вестник*. 2005;(4):48–49.  
Mining S.S. Geological and economic assessment of solid mineral deposits in the context of the depletion of mineral resources. *Mine Surveying Bulletin*. 2005;(4):48–49. (In Russ.)
5. Kirsanov A.K., Katyshev P.V. Economic drivers of seabed mining. *Izvestiya vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Gornyi Zhurnal*. 2024;(1):20–26. Available at: <https://www.mining-science.ru/download/2024/1-2024/002.pdf> (accessed: 24.06.2024).
6. Хайрутдинов М.М., Конгар-Сюрюн Ч.Б., Тюляева Ю.С., Хайрутдинов А.М. Планетная технология. Предпосылки формирования новой научной дисциплины. *Горная промышленность*. 2020;(3):113–120. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2020-3-113-120>  
Khayrutdinov M.M., Kongar-Syuryun Ch.B., Tyulyaeva Yu.S., Khayrutdinov A.M. Planetary Technology. Prerequisites for the Formation of a New Scientific Discipline. *Russian Mining Industry*. 2020;(3):113–120. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2020-3-113-120>
7. Dahl C., Gilbert B., Lange I. Mineral scarcity on Earth: Are Asteroids the answer. *Mineral Economics*. 2020;33(1-2):29–41. <https://doi.org/10.1007/s13563-020-00231-6>
8. Cannon K.M., Gialich M., Acaín J. Precious and structural metals on asteroids. *Planetary and Space Science*. 2023;225:105608. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2022.105608>
9. Łuszczek K., Przylibski T.A. Selected metal resources on H chondrite parent bodies. *Planetary and Space Science*. 2021;206:105309. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2021.105309>
10. Ананьев П.П., Мещеряков Р.В., Ларионов П.В., Плотникова А.В., Беляков К. О. Методические подходы к переработке космического минерального сырья. *Руды и металлы*. 2017;(2):69–74.  
Ananyev P.P., Meshcheryakov R.V., Larionov P.V., Plotnikova A.V., Belyakov K.O. Methodical approaches to cosmic mineral material processing. *Ores and Metals*. 2017;(2):69–74. (In Russ.)
11. Paikowsky D., Tzezana R. The politics of space mining – An account of a simulation game. *Acta Astronautica*. 2018;142:10–17. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2017.10.016>
12. Mazanek D.D., Merrill R.G., Brophy J.R., Mueller R.P. Asteroid Redirect Mission concept: A bold approach for utilizing space resources. *Acta Astronautica*. 2015;117:163–171. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2015.06.018>
13. Serres M. How Luxembourg becomes Europe's commercial space exploration hub. *Annales des Mines – Réalités industrielles*. 2019;(2):69–72. <https://doi.org/10.3917/rindu1.192.0069>

14. Мунтян М.Е., Сигаури-Горский Е.Р. Опыт Японии в области исследования и использования космического пространства: национальные и международно-правовые аспекты. *Теория и практика общественного развития*. 2023;(8):226–233. <https://doi.org/10.24158/tipor.2023.8.29>  
Muntyan M.E., Sigauri-Gorsky E.R. Japan's experience in the exploration and use of outer space: National and international legal aspects. *Theory and Practice of Social Development*. 2023;(8):226–233. (In Russ.) <https://doi.org/10.24158/tipor.2023.8.29>
15. Choi Y. Review of space industry and technology for asteroid mining. *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*. 2021;58(6):640–651. <https://doi.org/10.32390/ksmer.2021.58.6.640>
16. Steffen O. Explore to exploit: a data-centred approach to space mining regulation. *Space Policy*. 2022;59:101459. <https://doi.org/10.1016/j.spacepol.2021.101459>
17. Badesce V. (ed.) *Asteroids. Prospective Energy and Material Resources*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2013. 689 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-39244-3>
18. Шустов Б.М. Космические ресурсы для развития экономики и науки. *Воздушно-космическая сфера*. 2019;(4):46–55. <https://doi.org/10.30981/2587-7992-2019-101-4-46-54>  
Shustov B.M. Space resources for industry and science. *Aerospace Sphere Journal*. 2019;(4):46–55. (In Russ.) <https://doi.org/10.30981/2587-7992-2019-101-4-46-54>
19. Брюханов Н.А., Легостаев В.П., Лобыкин А.А., Лопота В.А., Сизенцев Г.А., Синявский В.В. и др. Использование ресурсов Луны для исследования и освоения Солнечной системы в XXI веке. *Космическая техника и технологии*. 2014;(1):3–14.  
Brukhanov N.A., Legostaev V.P., Lobykin A.A., Lopota V.A., Sizentsev G.A., Sinyavskiy V.V. et al. Use of lunar resources for solar system exploration and exploitation in the 21st century. *Space Engineering and Technology*. 2014;(1):3–14. (In Russ.)
20. Лемешевский С.А., Графодатский О.С., Ширшаков А.Е., Москатиньев И.В., Митькин А.С., Балиев А.В. Космическая транспортная система для освоения малых космических тел. *Вестник НПО им. С.А. Лавочкина*. 2018;(2):47–55.  
Lemeshevskii S.A., Graphodatsky O.S., Shirshakov A.E., Moskatiniyev I.V., Mitkin A.S., Baliyev A.V. Space transport systems for industrial and scientific development of small celestial bodies. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*. 2018;(2):47–55. (In Russ.)
21. Chpolianski D., Zhang Z.X. Review on quarrying methods suitable for space mining missions. *Journal of Sustainable Mining*. 2024;23(2):8. Available at: <https://oulu.repo.oulu.fi/handle/10024/48711> (accessed: 24.06.2024).
22. Satish H., Radziszewski P., Ouellet J. A review of mining technologies for space. In: *Proceedings of the Canadian Design Engineering Network (CDEN) Conference, Kaninaskis, Alberta, July 18–20, 2005*. <https://doi.org/10.24908/pceea.v0i0.3879>
23. Mueller R.P., Van Susante P.J. A review of extra-terrestrial mining robot concepts. In: *Earth and Space 2012 – Proceedings of the 13<sup>th</sup> ASCE Aerospace Division Conference and the 5th NASA/ASCE Workshop on Granular Materials in Space Exploration, April 15–18 2012, USA*. IEEE; 2012, pp. 295–314. <https://doi.org/10.1061/9780784412190.034>
24. Корнеев В.А. Способ проведения наклонной штольни для вскрытия лавовых трубок на Луне и Марсе. Патент РФ. №2787484 С1, МПК E21C 51/00, E21D 9/02, B64G 99/00.: №2022103430: заявл. 10.02.2022: опубл. 09.01.2023.
25. Grandl W., Böck C. Asteroid habitats – living inside a hollow celestial body. In: *Handbook of Space Resources*. Cham: Springer, 2023, pp. 763–785. Available at: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-97913-3\\_22](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-97913-3_22) (accessed: 07.05.2024).
26. Grandl W. Human life in the Solar System. *REACH*. 2017;5:9–21. <https://doi.org/10.1016/j.reach.2017.03.001>

**Информация об авторах**

**Кирсанов Александр Константинович** – кандидат технических наук, доцент кафедры шахтного и подземного строительства, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Российская Федерация; e-mail: AKirsanov@sfu-kras.ru

**Вохмин Сергей Антонович** – кандидат технических наук, заведующий кафедрой шахтного и подземного строительства, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Российская Федерация; e-mail: SVokhmin@sfu-kras.ru

**Курчин Георгий Сергеевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры шахтного и подземного строительства, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Российская Федерация; e-mail: GKurchin@sfu-kras.ru

**Волков Евгений Павлович** – кандидат технических наук, доцент кафедры подземной разработки месторождений им. Н.Х. Загирова, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Российская Федерация; e-mail: EVolkov@sfu-kras.ru

**Information about the authors**

**Aleksandr K. Kirsanov** – Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Department of Mine and Underground Construction, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation; e-mail: AKirsanov@sfu-kras.ru

**Sergey A. Vokhmin** – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department of Mine and Underground Construction, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation; e-mail: SVokhmin@sfu-kras.ru

**Georgy S. Kurchin** – Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Department of Mine and Underground Construction, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation; e-mail: GKurchin@sfu-kras.ru

**Evgeny P. Volkov** – Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Department of Underground Deposit Development named after N.H. Zagirov, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation; e-mail: EVolkov@sfu-kras.ru

**Article info**

Received: 04.06.2024

Revised: 04.07.2024

Accepted: 11.07.2024

**Информация о статье**

Поступила в редакцию: 04.06.2024

Поступила после рецензирования: 04.07.2024

Принята к публикации: 11.07.2024