УДК 629.78:622:523.34

# УТИЛИЗАЦИЯ ПРИВНЕСЕННОГО НА ЛУНУ АСТЕРОИДНОГО ВЕЩЕСТВА – ЭКОНОМИЧНЫЙ ПУТЬ К ПОЛУЧЕНИЮ КОСМИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ ВЫСОКОЙ ЦЕННОСТИ

**© 2018 г. Шевченко В.В.**

Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга МГУ (ГАИШ МГУ)
Университетский пр-т, 13, г. Москва, Российская Федерация, 119991, *e-mail: director@sai.msu.ru*

*В последние годы в аналитических обзорах эксперты все чаще обращают внимание на рост дефицита редких и редкоземельных элементов, необходимых для развития передовых технологий в современной промышленности. Для решения этой проблемы в будущем были предложены проекты утилизации вещества астероидов, сближающихся с Землей. Несмотря на сложности захвата, транспортировки и последующей разработки в космосе подобного объекта, такой путь решения задачи казался технологически возможным и рентабельно оправданным. Железо-никелевый астероид размером 10 м в поперечнике мог бы содержать до 75 т редких и редкоземельных металлов, прежде всего металлов платиновой группы, что эквивалентно коммерческой стоимости в ценах 2016 г. примерно $2,8 млрд. В данной работе показано, что утилизация астероидного вещества, поступающего на лунную поверхность, может оказаться технологически более простой и экономически более рентабельной. До настоящего времени считалось, что лунные ударные кратеры не содержат пород образовавших их астероидов, так как при высоких скоростях падения ударники испаряются в процессе столкновения с поверхностью Луны. Благодаря последним исследованиям выяснилось, что при скорости падения меньше 12 км/с ударник может частично сохраниться в механически раздробленном состоянии. Следовательно, к числу возможных ресурсов, присутствующих на лунной поверхности, можно отнести никель, кобальт, платину и редкие металлы астероидного происхождения.*

*Приводимые расчеты показывают, что общая масса, например, платины и платиноидов на поверхности Луны в результате падения астероидов может составить до 14,1 млн т.*

***Ключевые слова:*** *Луна, лунные ресурсы, астероиды, химический состав астероидов, редкие металлы, редкоземельные металлы, ударные процессы на Луне, космические технологии разработки астероидов, процессы привнесения астероидного вещества на Луну.*

# UTILIZATION OF THE ASTEROID SUBJECT ON THE MOON – A MORE ECONOMIC WAY TO OBTAIN COSMIC RESOURCES OF HIGH VALUE

**Shevchenko V.V.**

*Sternberg Astronomical Institute of the Moscow State University (SAI MSU)*
*13 Universitetskiy pr-t, Moscow, 119991, Russian Federation, e-mail: director@sai.msu.ru*

*In recent years, in analytical reviews, experts are increasingly paying attention to the growing scarcity of rare and rare-earth elements necessary for the development of advanced technologies in modern industry. To solve this problem, in the future, projects were proposed for the utilization of a substance of asteroids approaching the Earth. Despite the difficulties of seizing, transporting and further developing such an object in space, this way of solving the problem seemed technologically feasible and cost-effective justified. A 10-m iron-nickel asteroid could contain up to 75 tons of rare and rare-earth metals, primarily platinum-group metals, which is equivalent*

*to a commercial price of about $2.8 billion in 2016 prices. In this paper it is shown that the utilization of an asteroid substance entering the lunar surface can be technologically more simple and economically more cost-effective. Until now, it was believed that the lunar impact craters do not contain the rocks of the asteroids that formed them, since at high velocities the impactors evaporate during a collision with the lunar surface. According to the latest research, it turned out that at a fall rate of less than 12 km/s the drummer can partially survive in a mechanically fractured state. Consequently, the number of possible resources present on the lunar surface can be attributed to nickel, cobalt, platinum and rare metals of asteroid origin.*

*The calculations show that the total mass, for example, of platinum and platinoids on the lunar surface as a result of the fall of asteroids may amount to 14.1 million tons.*

***Key words:*** *the Moon, lunar resources, asteroids, the chemical composition of asteroids, rare metals, rare earth metals, impact processes on the Moon, space technology for the development of asteroids, the processes of bringing an asteroid substance to the moon.*

**ШЕВЧЕНКО В.В.**

ШЕВЧЕНКО Владислав Владимирович — доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом исследований Луны и планет ГАИШ МГУ, e-mail: vladislav_shevch@mail.ru

SHEVCHENKO Vladislav Vladimirovich — Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Head of Moon and Planets Research Department at SAI MSU, e-mail: vladislav_shevch@mail.ru

При будущем развитии лунной индустрии произведенные из местного сырья материалы, полуфабрикаты и изделия смогут найти экономически и технологически оправданное применение непосредственно на лунной поверхности, на окололунной орбите, на геостационарных и низких околоземных орбитах. В настоящее время предполагается, что детальное изучение материальных ресурсов Луны является весьма актуальным, поскольку его результаты могут определить перспективные направления научно-технических и технологических разработок в области освоения Солнечной системы [1]. В этой основополагающей работе по стратегическому использованию лунных природных ресурсов отмечалось, что современная стадия развития человечества сопровождается рядом неблагоприятных антропогенных воздействий на земную среду.

В первую очередь следует обратить внимание на истощения материальных и энергетических запасов на Земле. В связи с этими глобальными процессами неизбежно возникнет потребность в исследованиях, связанных с добычей и переработкой лунных ресурсов [2]. С учетом новых мировых тенденций необходимо провести тщательное изучение возможностей поисков и утилизации в доступном космосе редких и редкоземельных элементов.

## Редкие и редкоземельные металлы и их значение при современном развитии техники и технологий

Изучение проблем, связанных с использованием редкоземельных металлов (РЗМ), экспертами Центра исследований кризисных ситуаций показывает, что в последние десятилетия спрос на этот ресурс имеет устойчивую тенденцию к росту. Объемы мирового рынка возросли за последние 50 лет с 5 000 до 125 000 т в год [3], что объясняется широким использованием РЗМ в быстроразвивающихся областях промышленности, связанных с прогрессом высоких технологий. Уникальные свойства редкоземельных металлов находят свое применение, в первую очередь, в авиационно-космической и военно-промышленной отраслях экономики и поэтому являются стратегическими материалами. Кроме того, потребителей интересуют шесть элементов, известных как платиновая группа металлов: иридий (*iridium*, Ir), осмий (*osmium*, Os), палладий (*palladium*, Pd), родий (*rhodium*, Rh),

рутений (*ruthenium*, Ru) и собственно платина (*platinum*, Pt). Эти элементы, редко встречающиеся на Земле, обладают уникальными химическими и физическими свойствами, что делает их жизненно необходимыми индустриальными материалами.

***Прогнозы возрастающего дефицита редких и редкоземельных элементов на Земле.*** В последние годы в аналитических обзорах эксперты все чаще обращают внимание на рост дефицита редких и редкоземельных элементов. Упомянутый выше рост потребностей накладывается на все уменьшающиеся темпы добычи этих ресурсов. Такая неблагоприятная тенденция еще осложняется рядом геополитических обстоятельств. Ресурсы редких и редкоземельных элементов географически распределены очень неравномерно. Так, два месторождения в ЮАР обеспечивают 80% всей мировой добычи платины. Бóльшая часть (92%) используемого в мире ниобия (*niobium*, Nb) экспортируется из Бразилии. Ниобий широко применяется для производства сверхпроводящих магнитов и сплавов с высокой жароустойчивостью для реактивной авиации и ракетной техники. Ниобий нашел свое применение также в производстве контейнеров для хранения радиоактивных отходов или установок по их использованию. Ниобий увеличивает прочность таких металлов, как титан, молибден, цирконий, и одновременно повышает их жаростойкость и жаропрочность. Из сплавов, содержащих ниобий, и чистого ниобия сделаны некоторые детали ракет и бортовой аппаратуры искусственных спутников Земли.

В настоящее время почти все запасы редкоземельных элементов (97%) поставляются Китаем. Указывая на такую диспропорцию, аналитики крупнейшего в мире финансового конгломерата *Goldman Sachs Group, Inc.* (*GSGI*) несколько лет назад отмечали, что мерилом нарастающего дефицита является, в т. ч., резкий рост мировых цен на редкие и редкоземельные металлы [4]. На момент исследования цены поднялись почти десятикратно от уровня 2009 г. и продолжали расти. Если в 2010 г. стоимость 1 кг редкоземельных металлов составляла $10,3, то в течение последующих двух лет она поднялась до $162,66. Вместе с тем, согласно прогнозам аналитиков из *GSGI*, разведанных запасов, например, платины, меди и никеля на Земле осталось не более чем на 40 лет [5]. В различных источниках называются примерно такие же прогнозы по времени исчезновения на Земле большей части редких и редкоземельных металлов. Сложившаяся ситуация заставляет исследователей обратиться к поискам ресурсов РЗМ в доступной в настоящее время части околоземного космического пространства.

***Планирование задач по добыче редких и редкоземельных металлов в космосе (мировая практика).*** В своей недавней клиентской рассылке финансовый конгломерат *GSGI* дает развернутый анализ современной ситуации и, в частности, призывает к развитию добычи платины в космосе [6]. По мнению аналитиков *GSGI*, в настоящее время уже нет финансовых и технологических препятствий для освоения ресурсов астероидов. Так, согласно предварительным разработкам специалистов по космической технике из Калифорнийского технологического института, создание изыскательских зондов обойдется в несколько десятков миллионов долларов. Космический комплекс для поимки близко подходящих к Земле астероидов потребует затрат в $2,6 млрд. Финансовые аналитики считают, что для современных венчурных компаний эти вложения вполне доступны. Ведь строительство одной шахты по добыче редкоземельных металлов на Земле стоит $1 млрд. В то же время, благодаря развитию частных космических компаний, стоимость запусков постоянно сокращается. Если раньше, в эпоху космических шаттлов, отправка на орбиту одного килограмма грузов обходилась в $30 000, то сегодня эти затраты уже сведены до $5 000. Частные космические компании *Space X* и *Blue Origin* обещают сократить эти суммы еще в несколько раз за счет повторного использования первых ступеней ракет и других компонентов. Таким образом, по прогнозам аналитиков *GSGI*, первоначальные затраты быстро окупятся. При разработке одного астероида добывающая компания может получить платины на сумму $50 млрд. В цитируемом документе приводятся данные еще одной частной компании по разработке космических ресурсов — *Planetary Resources, Inc.* (*PRI*), согласно которым металлический астероид, сопоставимый по размерам с футбольным полем, как правило, обладает запасами платины на указанную сумму.

Компания *PRI* одной из первых объявила, что целью ее создания является утилизация материальных ресурсов ближнего космоса [7]. Автор этой статьи в том же году (2012 г.) получил приглашение

от одного из основателей компании П. Диамантиса периодически участвовать в экспертных оценках направлений будущей деятельности *PRI*. Как предприниматель П. Диамантис ранее был организатором ряда проектов, связанных с развитием космоса и передовых технологий. В упомянутом сообщении он конкретизировал цели создаваемой компании, которые предполагают создание новых космических аппаратов и новой технологии для утилизации ресурсов астероидов.

Базовая концепция, которая разрабатывается в последние годы специалистами *PRI*, представляет собой орбитальный комплекс в виде некоего эластичного контейнера, снабженного двигательной установкой для осуществления маневров в космосе (рис. 1) [8]. Предполагается, что выбранный заранее астероид может захватываться этим устройством и перемещаться на стационарную окололунную орбиту или в точки Лагранжа 1 или 2, где объект будет находиться в течение долгого времени и постепенно подвергаться разработке.

В рамках разрабатываемой технологии планируется использовать астероиды, которые находятся на орбитах с перигелийными расстояниями, меньшими или равными 1,3 а.е. Очевидно, что при современном уровне возможностей ракетной техники утилизации могут подвергнуться астероиды ограниченных размеров. В связи с этим особую важность приобретает этап первоначального поиска и выбора объектов. В схеме, развиваемой *PRI*, на начальном этапе предполагается, что выбор нужного объекта будет осуществляться на основе дистанционного анализа с использованием телескопов наземного или космического базирования. В процессе первых шагов по определению целей и задач новой компании специалисты из *PRI* просчитали возможности выбора объектов с помощью наземных телескопических наблюдений и экономическую эффективность дальнейшей утилизации ресурсов выбранного астероида.

На рис. 2 приводится схема результатов данного анализа, опубликованная в журнале *New Scientist* [9]. Для маркетингового анализа были использованы результаты телескопических наблюдений астероида 1986 *DA*, проведенные известным исследователем тел Солнечной системы У. Хартманном (*William Hartmann*) в 1994 г. Левая диаграмма на рис. 2 показывает химический состав этого металлического астероида, имеющего размеры около 2 км и массу $3 \cdot 10^{13}$ кг. Основным компонентом астероида является железо с примесью платины, никеля и кобальта.

На момент проведения исследований (1994 г.) мировая рыночная конъюнктура была такова, что общая стоимость вещества астероида 1986 *DA*, если бы его удалось утилизировать, могла бы составить $25 трлн. Но через несколько лет, на момент образования компании *PRI* (2012 г.), конъюнктура мирового рынка металлов сильно изменилась, и общая стоимость рассматриваемого астероида могла бы составить уже $87,2 трлн. Следует заметить, что в последнем случае наибольшую ценность представляли запасы никеля, а не платины, как можно было бы предполагать. Для наглядности оценок авторы проведенного исследования показали в правой диаграмме величину государственного долга США, на момент исследования равного $15 трлн.

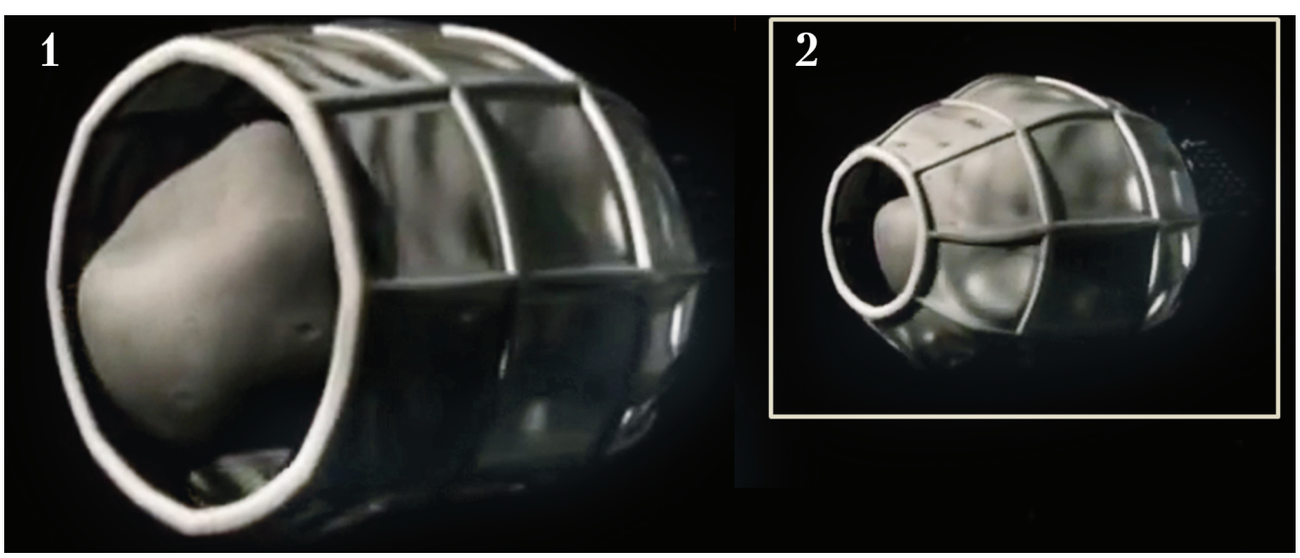



***Рис. 1. Концептуальная схема захвата астероида (рис. Planetary Resources, Inc.):*** *1 — захват и помещение в эластичное устройство выбранного для разработки астероида; 2 — транспортировка выбранного астероида на окололунную орбиту или в точки Лагранжа*

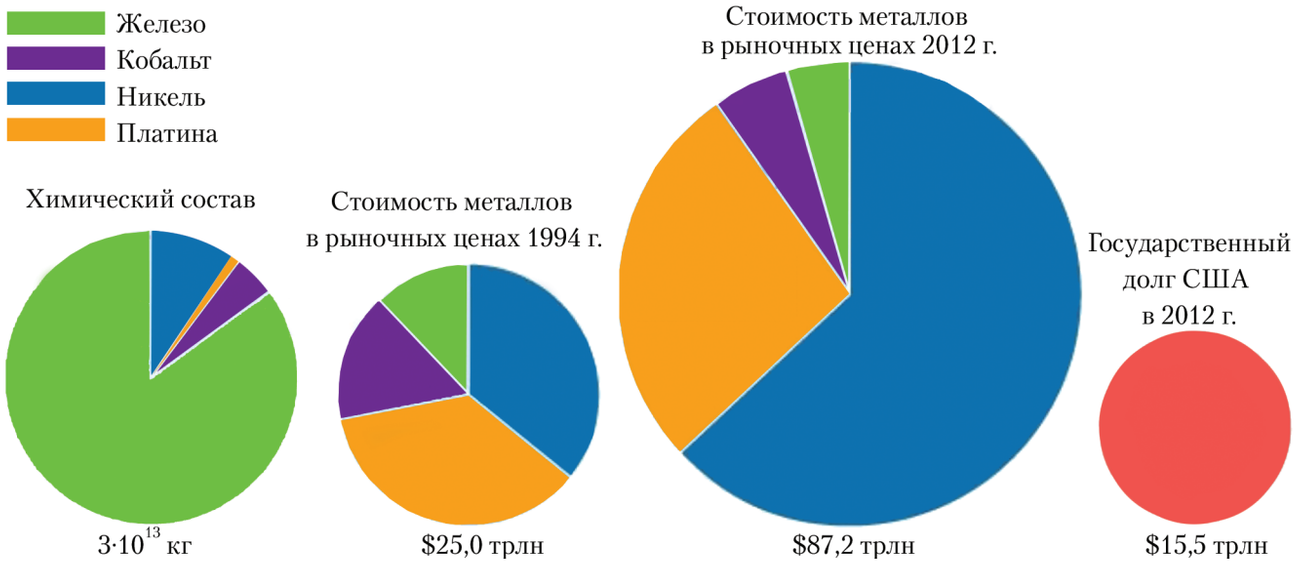



***Рис. 2. Схема анализа экономической эффективности использования ресурсов астероида 1986 DA [9]. Стоимость металлов указана в рыночных ценах 2012 г.***

Однако первыми объектами для разработки могут стать только астероиды с размерами в метровом диапазоне, на утилизацию которых и рассчитана схема, показанная на рис. 1. Тем не менее, специалисты *PRI* считают, что и в этом случае осуществление проекта будет экономически оправданным. В качестве примера приводятся данные о типичных составах астероидов различного типа. Известно, что обычный астероид *S*-типа (каменный астероид) размером около 10 м может содержать металлическую фракцию общей массой 650 т, которая включает около 50 кг редких и редкоземельных металлов. Более перспективный вариант заключается в утилизации вещества астероида *M*-типа (металлического астероида) такого же размера. Если для оценки экономической целесообразности такой операции использовать данные, опубликованные в работе [10], подобный железо-никелевый астероид мог бы содержать до 75 т редких и редкоземельных металлов, прежде всего — платиновой группы, что эквивалентно коммерческой стоимости в ценах 2016 г. примерно $2,8 млрд.

В связи со сказанным, проблема выбора объекта для разработки ресурсов приобретает особое значение. Поэтому в перспективе руководство компании *PRI* для анализа близко подходящих к Земле астероидов планирует широко использовать орбитальные телескопы, смонтированные на малых спутниках массой 30–50 кг, что, очевидно, приведет к уменьшению стоимости всей программы. Первые аппараты такого типа серии *Arkyd* уже подготовлены для тестовых испытаний в космосе. На рис. 3 (на врезке) показан общий вид малого спутника *Arkyd* в орбитальной конфигурации (рисунок *PRI* [11]).

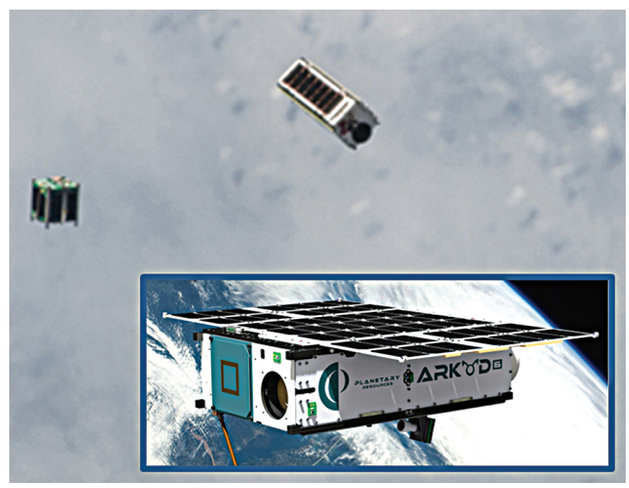



***Рис. 3. Вывод на околоземную орбиту аппарата Arkyd-3 с борта МКС (фото NASA). На врезке показан общий вид аппарата Arkyd в орбитальной конфигурации (фото PRI [11])***

Первый аппарат этой серии — *Arkyd*-3 — был доставлен на борт Международной космической станции (МКС) ракетно-космическим комплексом *Space X CRS*-6 14 апреля 2015 г. Спустя три месяца космический аппарат *Arkyd*-3 через шлюзовое устройство МКС был выведен на околоземную орбиту и начал испытательный полет длительностью 90 дней (рис. 3, фото *NASA* [11]).

В ноябре 2016 г. миноритарным акционером компании *PRI* стало правительство государства Люксембург [12]. Согласно заключенному соглашению, европейский акционер выделяет финансирование в размере €25 млн для осуществления запуска

спутника *Arkyd*-6. Целью этой миссии, намеченной на 2020 г., будет изучение близко подходящих к Земле астероидов, потенциально пригодных для разработки ресурсов.

В 2013 г. в США возникла еще одна частная компания, поставившая своей целью решение научных и технологических задач по поискам и утилизации природных ресурсов на астероидах [13].

В стратегическом отношении компанией *Deep Space Industries* была принята несколько отличающаяся схема первоначальных этапов и дальнейшего технологического развития. Поскольку основной задачей изначально были исследование и разработка ресурсов на астероидах значительного размера, технологически не предполагается использование техники поимки и транспортировки объектов с применением «космического мешка». В связи с этим, выбор потенциальных целей планируется производить контактными методами с помощью соответствующих аппаратов [14].

После предварительного выбора объекта путем его обследования с максимально возможным приближением (рис. 4) окончательный выбор осуществляется по результатам исследований на его поверхности.

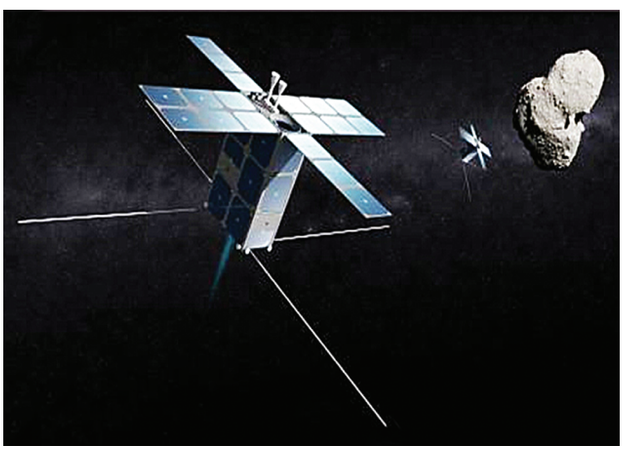


***Рис. 4. Выбор объекта разработки с помощью аппаратов обследования (рисунок Deep Space Industries [14])***

Рядом исследовательских организаций США при руководящей роли Института космических исследований им. У.М. Кека (*Keck Institute for Space Studies — KISS*) по заказу *NASA* был разработан свой проект захвата, транспортировки и утилизации малого астероида [15].

На рис. 5 приводится концептуальная схема момента захвата астероида, рассмотренная в данном проекте. Предполагается, что наиболее рациональным решением проблемы будет разработка малого астероида поперечником около 7 м. Планируемые размеры контейнера составляют 15 м в диаметре и 10 м по длине.

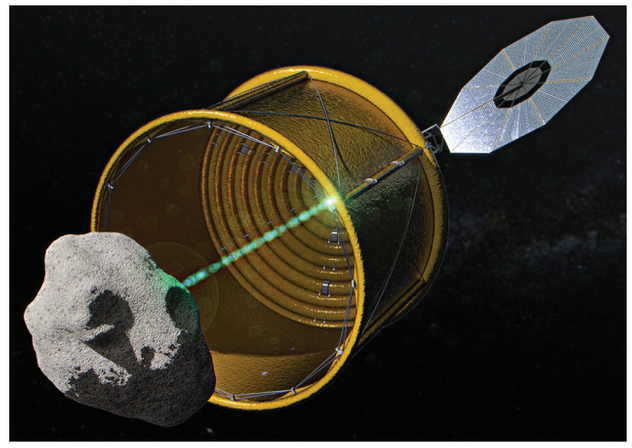


***Рис. 5. Концептуальная схема момента захвата астероида по проекту «NASA–KISS»***

Предполагается, что выведенный на околоземную орбиту ракетой-носителем типа «Атлас-5» космический аппарат будет преодолевать протяженные расстояния до достижения удаленного объекта на двигателях низкой тяги (ионных двигателях), а дальнейшее маневрирование осуществлять с помощью нескольких ксеноновых двигателей.

Согласно планируемому графику осуществления проекта, после выведения на низкую околоземную орбиту в 2025 г. аппарату потребуется еще около четырех лет, чтобы найти выбранный астероид и осуществить его захват. В дальнейшем комплекс вместе с захваченным астероидом должен переместиться на высокую окололунную орбиту, на что потребуется еще 2...6 лет. По предварительным расчетам весь первый этап проекта может продлиться до 10 лет. К этому времени ожидается завершение подготовки пилотируемого космического комплекса, с использованием которого разработка вещества астероида будет осуществляться уже при участии астронавтов.

## Признаки наличия астероидного вещества на лунной поверхности

Как показывает приведенный выше обзор космических проектов, в начале текущего десятилетия общепризнанным направлением было изучение и возможная утилизация ресурсов астероидов. Согласно большинству экспертных заключений, такое решение считалось технологически и экономически вполне эффективным,

несмотря на очевидные сложности операций по захвату и транспортировке объектов последующей разработки. Последнее особенно наглядно проявляется при анализе всех подробностей, изложенных в проекте «*NASA – KISS*». Но одновременно с этими работами стали появляться результаты новых исследований, которые позволяют рассмотреть альтернативный путь добычи редких и редкоземельных металлов в околоземном космосе. Подтверждается предположение, что астероидное вещество, как несомненный источник подобных ресурсов, в достаточном количестве может находиться на лунной поверхности, что позволяет осуществить его утилизацию технологически более простыми методами.

***Содержание в лунном поверхностном веществе редких и редкоземельных элементов.*** Результаты уже первых исследований образцов лунного вещества, доставленных на Землю, реально показали, что поверхностный слой Луны в массе интенсивно обогащается метеоритным веществом. Было установлено, что чистое металлическое железо, обнаруженное в лунных породах, скорее всего, имеет внелунное, метеоритное происхождение и может служить индикатором привнесенных материалов. Согласно предварительным результатам, основанным на данных о химическом анализе образцов, доставленных на Землю космическим кораблем (КК) «Аполлон» и автоматической лунной станцией (АЛС) «Луна», примесь метеоритного вещества в поверхностном слое Луны оценивалась величиной примерно в 1–2% [16].

В процессе дальнейших исследований эти данные были уточнены.

В лунном веществе, доставленном на Землю экипажем КК «Аполлон-12», оказался фрагмент брекчии, обладающий рядом экзотических свойств [17]. Образец 12013 размером ~5 см имел массу 82,3 г (рис. 6, фото *NASA*) [18]. В результате подробного анализа химического состава этого фрагмента выяснилось, что кроме типичных для лунного вещества элементов в данном образце были обнаружены следующие составляющие, относящиеся к числу редкоземельных (по классификации лунных пород — «*KREEP*–породы»):

| | |
|---|---|
| барий (Ba) | до 2 вес. %; |
| ниобий (Nb) | до 2 вес. %; |
| цирконий (Zr) | до 2 200 ppm; |
| хром (Cr) | до 2 300 ppm; |
| германий (Ge) | до 500 ppm. |

***Рис. 6. Образец 12013 размером ~5 см (фото NASA) [18]***

Наличие подобных включений является практически однозначным свидетельством привнесения в лунное вещество астероидных составляющих. Кроме того, исследования, проведенные на основе изотопного анализа, показали, что образец 12013 состоит из чрезвычайно сложной смеси расплавов и обломочных компонентов неопределенного происхождения [19, 20].

При этом, несмотря на то, что образец был найден в Океане Бурь, вещество морских базальтов в данной брекчии отсутствует. Повторное определение возраста отдельных составляющих показало, что наиболее молодые компоненты относятся ко времени 4,16...4,17 млрд лет назад, а более древние фрагменты по возрасту приближаются к эпохе первоначальной лунной дифференциации — около 4,5 млрд лет назад.

Возраст морских базальтов Океана Бурь по многим определениям в среднем составляет 3,1...3,3 млрд лет. Таким образом, исследователи пришли к единодушному мнению, что при своем образовании изучаемый образец претерпел ударный метаморфизм около 4 млрд лет назад в эпоху интенсивной бомбардировки Луны метеоритами и астероидами. В Океан Бурь этот фрагмент брекчии, по-видимому, был заброшен из материковой области во время более позднего ударного события.

Возвращаясь к химическому составу образца 12013, следует обратить внимание на относительно высокое содержание редкого металла ниобия, уникальные свойства которого были описаны выше. Также следует упомянуть, что обычное содержание ниобия в земных рудах промышленного значения обычно составляет 2–4%.

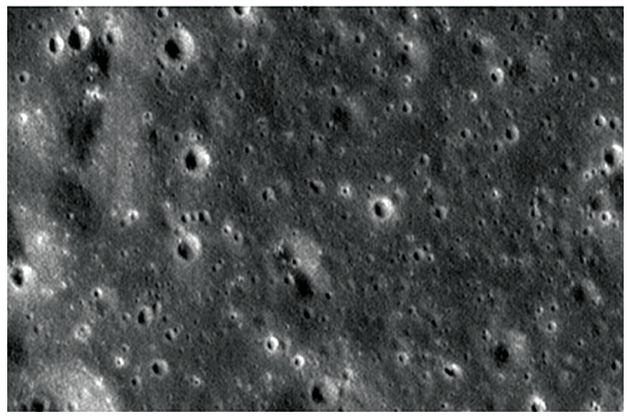
Исходя из приведенных результатов и учитывая сложную историю формирования и перемещения образца 12013, следует обратиться к исследованиям образцов, доставленных на Землю из материковых областей Луны АЛС «Луна-20» (февраль 1972 г.) и КК «Аполлон-16» (апрель 1972 г.). Часть таких исследований была сделана повторно на более высоком современном уровне и дала более точные результаты.

Среди образцов реголита из пробы, доставленной АЛС «Луна-20», были выделены частицы анортозитового типа, в которых размеры металлических включений достигали от десятков до сотен микрон. Судя по данным предварительных исследований, состав этой фракции попадает в типичную метеоритную область с содержанием 5...7% никеля (Ni) и ~0,5% кобальта (Co) [21]. Вместе с тем, исследования фрагментов анортозитов обнаружили присутствие редкоземельных элементов при концентрации в 10 раз большей, чем в типичных метеоритах хондритового состава. При сопоставлении с результатами исследований мелкой фракции образцов, доставленных КК «Аполлон-16», обнаружилось, что в этом случае концентрация редкоземельных элементов в пробе «Луны-20» меньше и составляет 2/3 [22]. В то же время содержание Co, Sc, Cr оказалось выше примерно в полтора-два раза [23].

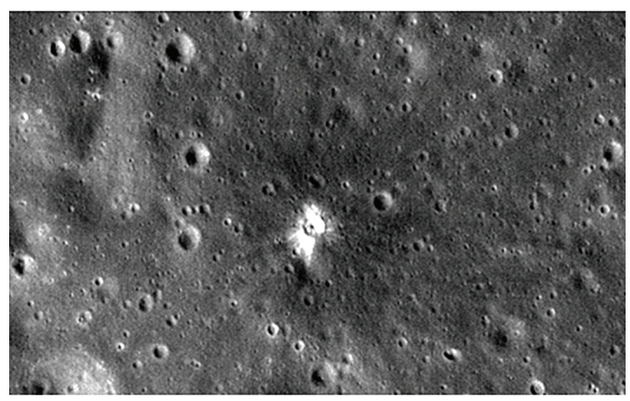
Аналогичные результаты, достоверно показывающие присутствие астероидного вещества на Луне, получены при анализе образцов, доставленных на Землю КК «Аполлон-16». Одним из примеров может служить изучение образца брекчии 60035. Его масса составляет 1,05 кг. Возраст включения анортозитового состава был определен как 4,09±0,1 млрд лет. При анализе этой части образца было обнаружено высокое содержание иридия (Ir), что, по мнению авторов исследования, указывает на достоверное присутствие включений астероидного вещества [24].

Исследования образца анортозитового состава 60015, имевшего массу 5,57 кг, также показали следы метеоритного вещества в виде сидерофилов при относительно повышенном содержании иридия [25, 26]. Похожие результаты были получены и при анализе других образцов материковых пород из числа собранных в процессе экспедиции «Аполлон-16» [27].

***Интенсивность современных падений астероидов и метеоритов на лунную поверхность.*** Реальный мониторинг ударных событий на лунной поверхности, возможность которого появилась в последние годы, показывает, что приток метеоритного (астероидного) вещества происходит постоянно. На крупномасштабных изображениях, получаемых длиннофокусной камерой искусственного спутника Луны (ИСЛ) *LRO* (*Lunar Reconnaissance Orbiter*), регулярно обнаруживаются новые ударные кратеры различных размеров. В качестве примера можно привести сравнение снимков, полученных 02.12.2012 г. (M183689789L) (рис. 7, *а*) и 27.07.2013 г. (M1129645568L) (рис. 7, *б*). Видно, что на изображении, сделанном около восьми месяцев спустя, появился ударный кратер диаметром 18 м [28].



***а)***



***б)***

***Рис. 7. Снимки, показывающие появление нового кратера (фото NASA [28]), снятые 02.12.2012 г. (а) и 27.07.2013 г. (б)***

В исследовании [29] было проанализировано более 14 000 подобных пар изображений, в результате чего обнаружено 222 новых кратера с диаметрами 3...43 м, сформировавшихся за последние семь лет. На рис. 8 приведено полученное территориальное распределение этих объектов на всей лунной поверхности, включая видимое и обратное полушария Луны. Красными точками отмечены два ударных события, которые наблюдались также с Земли.

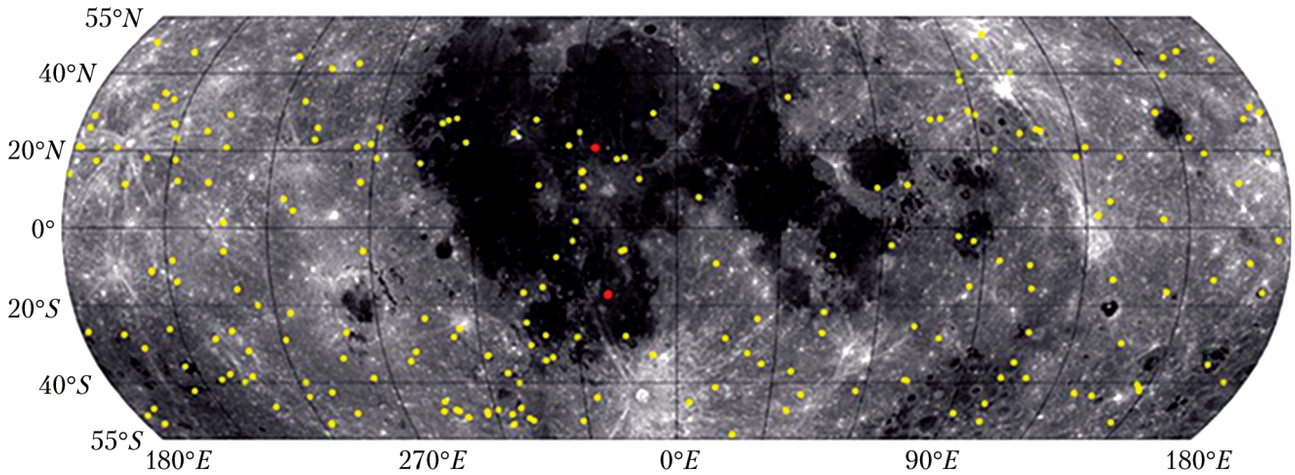



***Рис. 8. Распределение на лунной поверхности 222 новых кратеров, появление которых обнаружено по снимкам, полученным искусственным спутником Луны Lunar Reconnaissance Orbiter (фото NASA [29])***

## Возможности утилизации астероидного вещества, привнесенного на лунную поверхность

При анализе существующих проектов утилизации астероидного вещества в космосе возникают очевидные предпосылки использовать вариант поиска, разработки и доставки на Землю соответствующих материальных ресурсов с Луны. Можно указать на ряд аспектов. Как было показано выше, современные проекты по освоению ресурсов астероидов рассматривают разработку объектов только малых размеров — не более 10 м в поперечнике. На лунной поверхности с большой вероятностью может находиться вещество астероидов любых размеров и массы, выпавших в течение исторически длительного времени. В случае разработки астероидных ресурсов лунного происхождения в значительной степени упрощается технологическая сторона космических миссий, поскольку такие сложные и энергетически затратные этапы, как поиск, захват, транспортировка и помещение объектов на специальные орбиты, отпадают. Не исключено также, что экономически этот путь окажется более эффективным, так как операции по доставке вещества с Луны при помощи как автоматических, так и пилотируемых систем в основных деталях принципиально уже отработаны.

***Падение на лунную поверхность «медленных» астероидов.*** Весьма существенными для решения проблемы использования лунных ресурсов астероидного происхождения оказались новые исследования возможных параметров ударных событий. В результате проведенного на современном уровне моделирования падений астероидов на Луну выяснилось, что при определенных скоростях ударник не испаряется в процессе высокотемпературного взрыва, как считалось ранее, а претерпевает только механическое разрушение, и его вещество в значительной степени сохраняется внутри образовавшегося кратера [30]. Согласно этим оценкам, при падении «медленных» астероидов до 50% массы ударника концентрируется внутри сформированного кратера, остальная же часть раздробленного материала образует близлежащее поле выбросов.

Позднее эти положения были подтверждены и уточнены обобщением результатов, основанных на проведении 14 331 симуляции астероидных падений [31]. На рис. 9 приводится гистограмма распределения ударных событий по скоростям падения ударников, построенная на основе полученных данных.

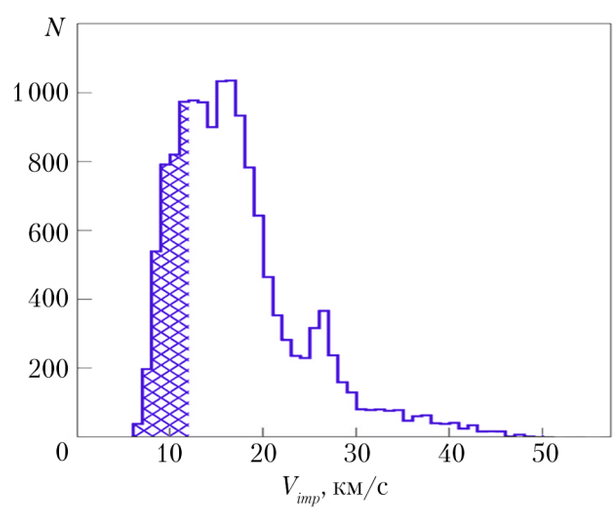



***Рис. 9. Гистограмма распределения ударных событий по скоростям падения ударников***

*Примечание.* $N$ — число ударных событий; $V_{imp}$ — скорость падения ударников.

Заштрихованная область графика соответствует выделенной группе «медленных» астероидов, скорость падения которых не превышает 12 км/с. Согласно этим результатам, материал подобных ударников в значительной степени сохраняется на лунной поверхности в раздробленном виде внутри кратера и в окружающих выбросах.

Статистические оценки показали, что примерно четверть всех лунных кратеров различных размеров образована в результате падения «медленных» ударников.

В качестве примера реального образования, возникшего по всем признакам в результате падения «медленного» астероида, можно привести кратер в области Моря Влажности (*Mare Humorum*), показанный на рис. 10. Кратер был отождествлен на снимке, полученном *КА LRO (LROCNACM*157851844*LE*) в мае 2011 г. [32]. Этот относительно свежий кратер имеет диаметр ~500 м и отличается интенсивным полем фрагментарных выбросов, характер которых показан на врезке в крупном масштабе.

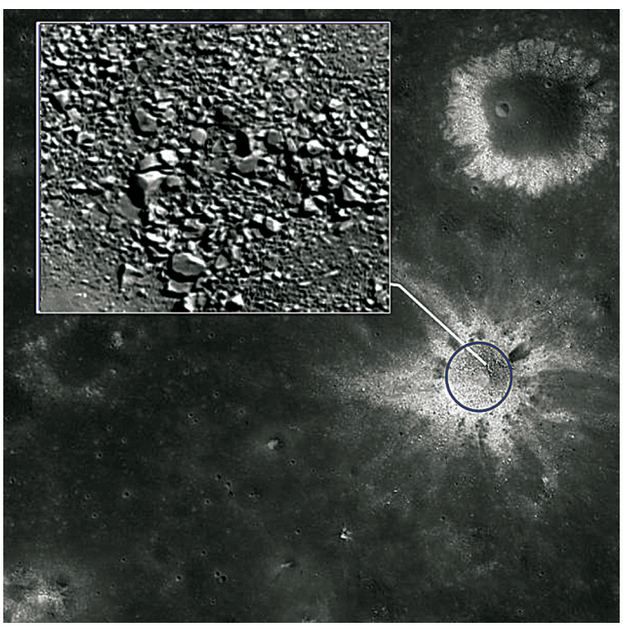


***Рис. 10. Снимок свежего кратера в области Моря Влажности. На врезке – фрагментарные выбросы. Разрешение снимка составляет 0,5 м на пиксель (фото NASA/GSFC/ Arizona State University [32])***

Следующей актуальной задачей станет разработка методики дистанционного определения лунных объектов, содержащих экзогенные включения.

Предварительные исследования в этом направлении были выполнены по результатам лунных космических миссий *Chandrayaan*-1 (Чандраян-1, Индия) и *SELENE/Kaguya* (Кагуйя, Япония).

Исследования, проведенные с помощью комплекса дистанционного зондирования *Moon Mineralogy Mapper* (*M*3), установленного на КА *Chandrayaan*-1, обнаружили новый тип породы, идентифицированный на Луне, в котором доминирует обогащенная магнием шпинель [33]. Присутствие в поверхностном слое шпинелей и оливинов с повышенным содержанием магния также было обнаружено прибором *Spectral Profiler*, установленном на КА *SELENE/Kaguya* [34].

Согласно этим результатам, появляется возможность дистанционно отождествлять остатки ударников различного химического состава внутри кратеров, где можно заметить присутствие донных отложений. Таким образом, обнаружение внутри ударных кратеров таких нетипичных для Луны минералов, как обогащенные магнием шпинели и оливины, может служить надежным указанием на присутствие астероидного вещества. Следовательно, к числу возможных ресурсов Луны авторы названных выше исследований справедливо относят никель, кобальт, платину и редкие металлы астероидного происхождения.

Современная техника дистанционного зондирования, использующая регистрацию различных физических излучений, исходящих от лунной поверхности, с учетом приповерхностных слоев, служащих источниками подобных потоков, позволяет провести подробное изучение с целью выявления локальных отложений экзогенных лунных ресурсов.

***Оценки объемов привнесенного на лунную поверхность астероидного вещества.*** Результаты исследований, изложенные в работах [30, 31], послужили основой для разработки программных продуктов, которые с высокой степенью вероятности позволяют определять предполагаемые параметры ударного события в зависимости от характеристик ударника. Первоначально программные продукты были разработаны для моделирования падений ударников на Землю [35]. Затем те же авторы разработали и внедрили на этой же основе вариант симулятора, работающего в режиме *online* не только для случая падения ударников на Землю, но и для случаев других твердотельных планет [35]. При получении приводимых ниже оценок был использован симулятор [36]. В качестве исходных данных в программу вводились размеры ударника, предполагаемый угол падения, скорость падения, плотность ударника (лед, пористый каменный фрагмент,

монолитный каменный фрагмент, металлический ударник) и плотность поверхностного вещества объекта падения. В рассматриваемых случаях величина угла падения принималась равной 45°, как наиболее вероятная. Скорость падения принималась равной 10 км/с, как наиболее часто встречающаяся для «медленных» астероидов согласно данным рис. 9. Плотность поверхностного вещества для Луны считалась в среднем равной 2,75 г/см$^3$ (плотность верхнего слоя реголита).

Получаемые результаты расчетов содержали следующие данные:

- предполагаемая масса ударника;
- значения диаметра и глубины ударного кратера;
- значения кинетической энергии и энергии удара;
- оценка состояния упавшего тела после удара;
- вероятная частота подобных событий во времени.

Поскольку симулятор [36] позволяет проводить расчеты для ударных событий с участием падающих тел размером более 100 м, для анализа событий с ударниками меньших размеров был использован симулятор [37], позволяющий оперировать любыми размерами объектов, вплоть до микрочастиц.

Таким образом, обнаружение, благодаря наблюдениям по программе ИСЛ *LRO,* свежих ударных кратеров позволяет провести сравнительно точную оценку реального притока астероидного вещества на лунную поверхность за последние семь лет. Как показал анализ, проведенный авторами работ [29, 31], из совокупности 222 кратеров наибольшее число объектов по размерам группируется около медианного значения 10 м. Кроме того, в работе [31] было показано, что четвертая часть этих ударных событий происходила в результате падения «медленных» астероидов, имевших среднестатистическую скорость 10 км/с.

Доступные к настоящему времени определения химического состава сближающихся с Землей астероидов показывают, что наиболее обогащенные металлической фракцией объекты являются астероидами *S*-типа (каменные) и *M*-типа (металлические).

Проведенные с помощью симулятора [37] вычисления показали, что ударный кратер диаметром 10,1 м в лунном поверхностном слое образуется в результате падения со скоростью 10 км/с каменного астероида размером 0,8 м. Масса астероида такого типа согласно расчетам оказалась равной 803,8 кг. Ударный кратер указанного диаметра имеет простую чашеобразную форму с глубиной 2 м. Если экстраполировать данные, полученные в работе [30], на значение скорости падения ударников 10 км/с, то доля астероидного вещества, сохранившегося после удара внутри вновь образованного кратера, составит 22% от массы падающего тела. При типичном соотношении составляющих в астероидах *S*-типа общая масса металлической фракции от массы каменного астероида может быть до 40%, т. е. 321,5 кг. Соответственно, масса силикатной фазы равняется 482,3 кг. Состав металлической фазы согласно расчетным данным можно представить в следующем виде: железо — 270,89 кг; никель — 48,23 кг; кобальт — 2,41 кг; платина и платиноиды — 0,012 кг.

Для получения реальной оценки притока астероидного вещества на лунную поверхность следует учесть, что астероиды *S*-типа в популяции тел, сближающихся с Землей, составляют 17%. С учетом вычленения «медленных» астероидов из этой популяции (25%), окончательное число ударных событий с участием «медленных» астероидов *S*-типа составит 9,4 события за семь лет. Однако, по оценкам, полученным в работе [37], предполагается, что одно подобное падение происходит каждые 25 дней. Разница может возникать из-за неполной изученности распределения лунных кратеров подобных размеров. Следовательно, граничные значения оценки частоты падений за весь рассматриваемый срок наблюдений составят от 9 до 102 событий.

Таким образом, вещество металлической фазы, поступившее на лунную поверхность в результате падения «медленных» астероидов *S*-типа размером около метра, может составлять следующие массы: железо 536,0...6 079,2 кг; никель 95,4...1 081,2 кг; кобальт 4,9...51,0 кг; платина и платиноиды 0,0234...0,2652 кг.

Аналогичные расчеты были проведены для случая падения «медленных» астероидов *M*-типа. Вычисления, проведенные по программе [37], показали, что падавшие тела *M*-типа имели медианные размеры 0,54 м, в результате чего возникали кратеры диаметром 10,1 м и глубиной 2 м. Согласно этим же расчетам, частота рассматриваемых событий составляет одно падение каждые 25 дней.

Общая масса астероида в этом случае составляет 660 кг и имеет полностью

металлический состав: железо — 556,1 кг; никель — 99,1 кг; кобальт — 4,9 кг; платина и платиноиды — 0,025 кг. При том, что околоземные металлические астероиды в среднем составляют 10% от общего количества ударников, расчетное число падений в указанный период времени (семь лет) равно 5,55.

Таким образом, оценка частоты событий с участием астероидов *M*-типа лежит в интервале примерно 6...102. Сохранность поступившего вещества в ударном кратере по-прежнему оценивается величиной 22%.

Окончательные расчеты дают следующие значения массы астероидного вещества, сохранившегося в ударных кратерах рассматриваемого происхождения в виде донных отложений: железо 775,2...12 503,4 кг; никель 138,0...2 228,2 кг; кобальт 6,6...110,2 кг; платина и платиноиды 0,0342...0,5631 кг.

На рис. 11 приводится реальный пример того, как может выглядеть ударный кратер, возникший в результате падения «медленного» метеорита *M*-типа. Снимок сделан с орбиты камерой *NAC* ИСЛ *LRO* в районе Моря Холода (*M*170605553*R*, фото *NASA/GSFC/Arizona State University*) [38].

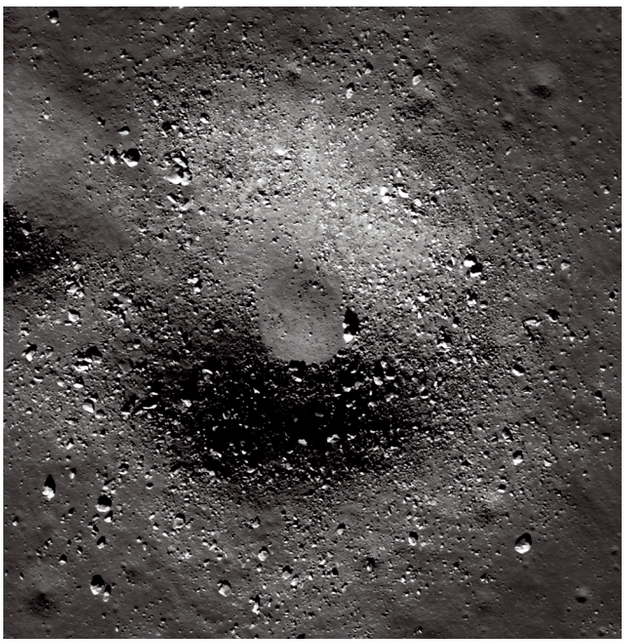


***Рис. 11. Ударный кратер диаметром ~500 м (снимок NASA [38])***

Согласно расчетам с использованием симулятора [37], показанный на рис. 11 кратер мог быть образован «медленным» астероидом *M*-типа размером 28,0 м. Кратер имеет диаметр 505,0 м при глубине 98,5 м. Расчетное значение частоты подобных событий составляет одно падение каждые 910 лет. Особого внимания заслуживает характер поля выбросов и донных отложений. При вероятной массе ударника 107,56 т на лунной поверхности в раздробленном виде должно сохраниться 23,7 т астероидного вещества. Значительная часть этого фрагментированного материала — железо. Но вместе с тем в данном случае вероятно наличие 3,56 т никеля, 0,18 т кобальта и до 0,9 кг платины и платиноидов.

Для оценки практически доступных объемов рассматриваемых ресурсов необходимо привлечь данные по распределению на лунной поверхности кратеров различных размеров. Полученная эмпирическим путем зависимость плотности распределения объектов различного диаметра на единицу площади имеет общий вид степенно́й функции: $N = aD^k$, где $N$ — число объектов, по диаметру бо́льших заданной величины $D$ на постоянную меру площади; $a$ и $k$ — постоянные параметры для отдельных областей Луны и определенных интервалов $D$ [39].

Например, для типичной морской поверхности и популяции кратеров в интервале 10...1 000 м вид распределения можно представить следующей логарифмической зависимостью: $\lg N = 11{,}36 - 2{,}68\,D$. Диаметры кратеров в данном случае выражены в метрах, а площадь относимости составляет $10^6$ км$^2$. Используя данную зависимость с учетом всех ограничений по количеству различного вида ударников, указанных выше, можно определить, что на 1 км$^2$ поверхности будет находиться пять десятиметровых кратеров с остатками вещества от ударников *S*-типа и три кратера с донными отложениями вещества ударников *M*-типа. Следовательно, суммарное количество доступного астероидного вещества на 1 км$^2$ лунной поверхности в типичном случае может составить: никель — до 12,1 т; кобальт — до 585 кг; платина и платиноиды — до 3 кг.

Однако следует учесть, что приведенный пример демонстрирует только теоретическую возможность оценки наличия на лунной поверхности ресурсов астероидного происхождения. В приведенных расчетах принималось во внимание незначительное по массе астероидное вещество, поступившее на Луну в результате выпадения весьма малых тел за ограниченный период времени (семь лет), охватывающий только реально наблюдавшиеся ударные события.

Согласно современным данным *NASA–CNEOS* по распределению астероидов

различных размеров, сближающихся с Землей, наиболее часто встречающиеся тела достигают 1 000 м [40]. Используя для расчетов симулятор [36], можно установить, что астероид *M*-типа размером 1 км при падении со скоростью 10 км/с («медленный» астероид) образует кратер диаметром 20,25 км и глубиной 732 м. При общей массе ударника 4,19 млрд т и при условии, что внутри ударного кратера сохраняется 22% массы упавшего тела, общий объем донных отложений астероидного состава в данном случае может достигать 921,8 млн т. Согласно расчетным пропорциям в системе [41], это означает, что внутри указанного кратера в донных отложениях не исключено присутствие 915,2 млн т железа, 6,6 млн т никеля, 0,33 млн т кобальта и 1 650 т платины и платиноидов.

Оценивая значимость возможного наличия подобных ресурсов в одном лишь ударном кратере Луны, достаточно напомнить, что годовая добыча платины на Земле (точнее, годовые поставки платины на мировой рынок) в последние годы составляет 170–180 т [42].

***Вопросы рентабельности космических миссий по утилизации лунных ресурсов астероидного происхождения.*** По оценке авторов проекта «*NASA – KISS*», предусматривающего непосредственную разработку ресурсов небольшого (размером не более 10 м) астероида, стоимость только первого этапа — захвата и транспортировки объекта на окололунную орбиту — может составить $2,6 млрд [43]. Как было упомянуто выше, подобные расходы можно было бы компенсировать в случае полной утилизации вещества астероида *M*-типа размером 10 м [10]. Однако последующие операции — запуск пилотируемой экспедиции, собственно разработка объекта и доставка полученного материала на Землю — потребуют дополнительных расходов.

Если обратиться к источникам астероидных ресурсов на лунной поверхности, то ожидаемая рентабельность космических миссий оказывается значительно более высокой. При рассмотрении только одного случая — кратера диаметром 20 км — описанного выше, рыночная стоимость в ценах 2017 г. предполагаемых донных отложений платины и платиноидов массой 1 650 т составит $51 млрд. Рыночная стоимость ожидаемых ресурсов никеля и кобальта в том же кратере составит примерно $80 млрд.

Расчеты по симулятору [36] дают частоту падения астероида *M*-типа размером 1 км при скорости соударения 10 км/с как одно событие за 456 901 лет. Если взять период интенсивной метеоритно-астероидной бомбардировки Луны, примерно равный 3,8–3,9 млрд лет, то, согласно расчетам частоты событий, общее число падений «медленных» астероидов данного размера и массы будет составлять 8 536. Как упоминалось выше, из них только 10%, т. е. ~854 события, может приходиться на падение металлических астероидов. Тогда общая масса платины и платиноидов на поверхности Луны в результате падения только ударников с описанными свойствами составит 14,1 млн т. Следует обратить внимание, что указанный объем астероидного вещества представляет только часть возможных донных отложений в лунных кратерах, поскольку в приведенных расчетах не учитывались ударники других типов и размеров. Но также следует учесть, что современные оценки возможных объемов астероидных ресурсов на Луне в различной степени разнятся в зависимости от используемых исходных данных, что требует проведения дополнительных исследований лунной поверхности.

## Выводы

Рассматривая проблемы утилизации астероидного вещества, находящегося на Луне, прежде всего, следует иметь в виду, что в исторически ближайшем будущем использование подобных ресурсов станет неизбежным. Выше были приведены аналитические исследования авторитетных мировых организаций, подтверждающие, что земные запасы редких и редкоземельных элементов интенсивно истощаются. Эти тенденции, в свою очередь, приводят к тому, что развитие высоких технологий на Земле начинает испытывать все более возрастающие трудности. Поэтому поиски и утилизация внеземных ресурсов не только преследуют коммерческие цели, но и являются жизненно необходимыми для дальнейшего прогресса земной цивилизации. Например, по оценкам консалтинговой компании *Industrial Mineral Company of Australia Pty Ltd.*, ежегодный мировой спрос на редкоземельные металлы в 2016 г. оценивался в 160 тыс. т, а к 2020 г. он предположительно вырастет еще на 50%, достигнув 200–240 тыс. т [44].

После долгого перерыва, в связи с завершением проектов «Луна» (СССР)

и «Аполлон» (США), идеи поисков и утилизации лунных природных ресурсов стали опять актуальными в результате получения современных данных первым космическим аппаратом нового поколения «Клементина» (*Clementine*) в 1994 г. [45].

На международном совещании по использованию лунных ресурсов непосредственно на Луне, состоявшемся в 1998 г. в Космическом центре им. Л. Джонсона (г. Хьюстон, США), автор данной статьи выступил с предложениями по использованию дистанционных методов обнаружения залежей необходимых материалов [46]. В дальнейшем эта методика была усовершенствована с целью определения конкретных физико-механических характеристик покровного вещества в различных районах лунной поверхности [47]. Практическое использование дистанционного зондирования лунной поверхности подтвердило, что подобная методика в определенных случаях способна выявлять, например, наличие в поверхностном веществе чистого железа [48], что является, как было показано выше, одним из признаков отложений астероидного материала.

Исторически сложилось так, что в начальной стадии изучения проблем утилизации космических ресурсов на новом уровне знаний и технологий основное внимание специалистов было сосредоточено на проектах освоения сближающихся с Землей астероидов. Несмотря на сложность транспортных операций и жесткие ограничения по размерам пригодных для разработки тел, это направление считалось технологически решаемым и вполне рентабельным.

С появлением новых исследований в отношении наличия астероидного вещества на лунной поверхности стало возможным рассмотреть иные пути решения подобных проблем.

При обсуждении содержания «Федеральной космической программы России на 2016–2025 годы» в 2013–2015 гг. были поставлены и рассмотрены вопросы освоения Луны, включая использование ее природных ресурсов. Содержащиеся в «Федеральной космической программе» проекты «Луна – Ресурс» и «Луна – Грунт» предполагают выполнение начальных стадий по освоению лунных ресурсов, с учетом изучения возможных отложений вещества астероидного происхождения.

Примерно в это же время появились свидетельства изменения стратегических планов других ведущих космических держав. В середине 2016 г. было объявлено, что впервые в истории космических исследований *NASA* США выдало официальное разрешение частной компании *Moon Express, Inc.* (*MEI*) самостоятельно выполнять программу полетов на Луну с целью изучения и утилизации лунных природных ресурсов [49]. В своих комментариях по этому поводу глава компании Н. Йен (*Naveen Jain*) сказал, что в ближайшем будущем *MEI* планирует довести стоимость одного рейса на Луну до $10 млн. При том, что на лунной поверхности, по его словам, могут находиться залежи полезных ресурсов общей стоимостью не менее чем на $16 квадриллионов, освоение Луны может стать весьма доходным бизнесом [50].

В качестве долгосрочной космической программы специалистами по-прежнему рассматривается создание лунной базы [51]. Поскольку одним из направлений деятельности внеземного аванпоста человечества неизбежно станут элементы космической индустриализации, особую важность приобретут вопросы обнаружения и утилизации на лунной поверхности отложений редких и редкоземельных элементов астероидного происхождения.

**Список литературы**


1. Луна — шаг к технологиям освоения Солнечной системы / Под научной редакцией В.П. Легостаева и В.А. Лопоты. М.: РКК «Энергия», 2011. 584 с.
2. *Брюханов Н.А., Легостаев В.П., Лобыкин А.А., Лопота В.А., Сизенцев Г.А., Синявский В.В., Сотников Б.И., Филиппов И.М., Шевченко В.В.* Использование ресурсов Луны для исследования и освоения Солнечной системы в XXI веке // Космическая техника и технологии. 2014. № 1(4). С. 3–14.
3. *Андриевская И.С.* Уникальные свойства редкоземельных металлов и их значение для отечественной промышленности в условиях неопределенности. Режим доступа: *http://csrc.su/articles/48/* (дата обращения 23.11.2017 г.).
4. *Toor A. Global rare earth supply deficit should turn into a surplus by 2013, Goldman Sachs says.* Режим доступа: *https://www.engadget.com/2011/05/05/global-rare-earth-supply-deficit-should-turn-into-a-surplus-by-2/* (дата обращения 05.05.2012 г.).
5. *Saefong M.P. In 20 years, the world may run out of minable gold.* Режим доступа: *http://www.marketwatch.com/story/in-20-*

*years-the-world-may-run-out-of-minable-gold-2015-03-30* (дата обращения 08.08.2017 г.).

6. *Edwards J. Goldman Sachs: space-mining for platinum is 'more realistic than perceived'*. Режим доступа: *http://www.businessinsider.com/goldman-sachs-space-mining-asteroid-platinum-2017-4* (дата обращения 06.04.2017 г.).

7. *Березин А.* В США создана компания для добычи полезных ископаемых в космосе. Режим доступа: *http://ru-universe.livejournal.com/466637.html* (дата обращения 30.04.2012 г.).

8. *Diamandis P.H., Anderson E.C. Asteroids...Alien Planets...Or Your House?* Режим доступа: *http://www.planetaryresources.com/asteroids/#harvesting-water* (дата обращения 08.08.2017 г.).

9. *Clark S. New Moon // New Scientist. 2012. V. 214. Issue 2861. P. 48–51.*

10. *Shaw S. Post Tagged «M-type asteroids». Asteroid mining.* Режим доступа: *http://www.astronomysource.com/tag/m-type-asteroids/* (дата обращения 21.09.2016 г.).

11. *Lewicki C., Diamandis P.H., Anderson E. Planetary resources' first spacecraft successfully deployed, testing asteroid prospecting technology on orbit.* Режим доступа: *http://www.planetaryresources.com/2015/07/planetary-resources-first-spacecraft-deployed/* (дата обращения 15.08.2016 г.).

12. *Lewicki C., Schneider E. Planetary resources and the Government of Luxembourg announce €25 million investment and cooperation agreement.* Режим доступа: *http://www.planetaryresources.com/2016/11* (дата обращения 22.06.2017 г.).

13. *Spector D. The Asteroid nearing Earth could be worth $195 billion — here's the plan to mine the next one.* Режим доступа: *http://www.businessinsider.com/deep-space-industry-asteroid-mining-plan-2013-2/* (дата обращения 15.08.2016 г.).

14. *Brandt-Erichsen D. Deep Space Industries announces first commercial interplanetary mining mission.* Режим доступа: *http://blog.nss.org/deep-space-industries-announces-first-commercial-interplanetary-mining-mission/* (дата обращения 15.08.2016 г.).

15. *Brophy J.R., Culick F., Friedman L. Asteroid retrieval feasibility study. Keck, JPL. 2 April 2012.* Режим доступа: *http://www.kiss.caltech.edu/study/asteroid_final_report.pdf. 51 pp.* (дата обращения 10.07.2017 г.).

16. *Иванов А.В, К.П.Флоренский КП., Стахеев Ю.И.* Метеоритное вещество в поверхностных слоях Луны // Метеоритика. 1974. Вып. 33. С. 1–9.

17. *Meyer C. Lunar Sample Compendium // 41st Lunar and Planetary Science Conference. 2010. P. 1016-1–1016-2.*

18. *Andersen C.A., Hinthorne J.R. U, Th, Pb and REE abundances and 207Pb/206Pb ages of individual minerals in returned lunar material by ion microprobe mass analysis // Earth Planet. Sci. Lett. 1972. Vol. 14. P. 195—200.*

19. *Quick J.E., James O.B., Albee A.L. Petrology and petrogenesis of lunar breccias 12013 // Proc. 12th Lunar Planet. Sci. Conf. 1981. P. 117–172.*

20. *Quick J.E., James O.B., Albee A.L. A reexamination of the Rb-Sr isotopic systematic of lunar breccias 12013 // Proc. 12th Lunar Planet. Sci. Conf. 1981. P. 173–184.*

21. *Виноградов А.П.* Предварительные данные о лунном грунте, доставленном автоматической станцией «Луна-20» // Геохимия. 1972. № 7. С. 763–774.

22. *Лубе М., Бирк Ж.Л., Аллегр Ж.К.* Содержание K, Rb, Sr, Ba и редкоземельных элементов в пробах, доставленных советской автоматической станцией «Луна-20» из материкового района кратера Аполлоний / В сб. Грунт из материкового района Луны. М.: Наука, 1979. С. 437–440.

23. *Хелмке Ф.А., Бланчард Д.П., Ларри Д.В.Д., Хэскин А.* Редкоземельные элементы, элементы-примеси и железо в образцах, доставленных «Луной-20» / В сб. Грунт из материкового района Луны. М.: Наука, 1979. С. 446–450.

24. *Ma M.–S., Schmitt R.A. Chemistry of the matrix, the glass coating and an olivine clast from polymict ANT breccia 60035 // Lunar Sci. XIII. Lunar Planetary institute, Houston. 1982. P. 453–454.*

25. *Laul J.C., Schmitt R.A. Chemical composition of Apollo 15, 16, and 17 samples // Proc. Lunar Sci. Conf. 4th. 1973. P. 1349–1367.*

26. *Taylor S.R., Gorton M.P., Muir P., Nance W., Rudowski R., Ware N. Composition of the Descartes region, lunar highlands. Geochim. Cosmochim. 1973. Acta 37. P. 2665–2683.*

27. *Ebihara M., Wolf R., Warren P.H., Anders E. Trace elements in 59 mostly highland moon rocks // Proc. Lunar Planet. Sci. 22. 1992. P. 417–426.*

28. *Robinson M. Exciting New Images. Lunar Reconnaissance Orbiter Camera.* Режим доступа: *http://www.lroc.sese.asu.edu/posts/770* (дата обращения 18.07.2017 г.).

29. *Speyerer E.J., Povilaitis R.Z., Robinson V.S., Thomas P.C., Wagner R.V. Quantifying crater production and regolith overturn*

*on the Moon with temporal imaging // Nature. 2016. V. 538. Issue 7624. P. 215–218.*

*30. Bland P.A., Artemieva N.A., Collins G.S., Bottke W.F., Bussey D.B.J., Joy K.H. Asteroids on the Moon: projectile survival during low velocity impact // Lunar and Planetary Science XXXIX. 2008. P. 2045-1–2045-2.*

*31. Yue Z., Johnson B.C., Minton D.A., Melosh H.J., Di K., Hu W., Liu Y. Projectile remnants in central peaks of lunar impact craters // Nature Geoscience. 2013. V. 6. P. 435–437.*

*32. Enns D. Crater in Mare Humorum.* Режим доступа: *http://lroc.sese.asu.edu/posts/350* (дата обращения 20.07.2017 г.).

*33. Pieters C.M. and 26 co-authors. Mg-spinel lithology: a new rock type on the lunar farside // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. E00G08. P. 1–14.*

*34. Yamamoto S. and 10 co-authors. Possible mantle origin of olivine around lunar impact basins detected by SELENE // Nature Geoscience. 2010. V. 3. P. 533–536.*

*35. Collins G.S., Melosh H.J., Marcus R.A. Earth impact effects program: a web-based computer program for calculating the regional environmental consequences of a meteoroid impact on Earth // Meteoritics & Planetary Science. 2005. V. 40. № 6. P. 817–840.*

*36. Marcus R.A., Melosh H.J., Collins G.S. Our impact effects calculator.* Режим доступа: *http://down2earth.eu/impact_calculator/* (дата обращения 10.08.2017 г.).

*37. Hamilton D.P. Solar System Collisions.* Режим доступа: *https://janus.astro.umd.edu/cgi-bin/astro/impact* (дата обращения 10.08.2017 г.).

*38. Robinson M. Exciting new images from the LROC team.* Режим доступа: *http://lroc.sese.asu.edu/news/uploads/LROCiotw/M170605553RE_thumb.png* (дата обращения 22.08.2017 г.).

*39. Шевченко В.В.* Современная селенография // М.: Наука, 1980. 288 с.

*40. Chodas P. Center for NEO Studies (CNEOS).* Режим доступа: *https://cneos.jpl.nasa.gov/about/nea_resource.html* (дата обращения 25.08.2017 г.).

*41. Lewis J.S. Mining the sky: untold riches from the asteroids, comets, and planets. Perseus Books Group, 1997. 300 p.*

*42.* Мировой рынок платины (Справочник *Jonson Matthew* 2016 г.). Режим доступа: *http://www.ereport.ru/articles/commod/platin.htm* (дата обращения 22.09.2017 г.).

*43. Hecht J. NASA mulling plans to put an asteroid in high lunar orbit // New Scientist. 2013. V. 217. Issue 2898. P. 4–5.*

*44. Humphries M. Rare Earth elements: the global supply chain // Congressional Research Service 7-5700. 2013. P. 1–27.*

*45. Nozette S. and 33 co-authors. The Clementine mission to the Moon: scientific overview // Science. 1994. V. 266. № 5192. P. 1835–1839.*

*46. Shevchenko V.V. How much indigenous material for construction is available on the Moon? // Workshop on Using In Situ Resources for Construction of Planetary Outposts. Abstracts. Ed. by M.B. Duke. LPI Technical Report Number 98-01. Houston. 1998. P.15.*

*47. Шевченко В.В., Скобелева Т.П., Кварацхелия О.И.* Спектрополяриметрический индекс зрелости лунного грунта // Астрономический вестник. Исследования солнечной системы. 2003. Т. 37. № 3. С. 198–219.

*48. Лу Я., Шевченко В.В.* Повышенное содержание железа в склоновых осыпях некоторых лунных кратеров // Астрономический вестник. Исследования солнечной системы. 2012. Т. 46. № 4. С. 271–281.

*49. Pasztor A. U.S. poised to clear private Moon mission // The Wall Street Journal. June 6, 2016. V. CCLXVII. № 131. P. A1, A7.*

*50. Kelly G. Moon Travel is Getting Cheaper.* Режим доступа: *http://www.foxbusiness.com/2016/08/09* (дата обращения 22.09.2017 г.).

*51. Савиных В.П., Васильев В.П., Капранов Ю.С., Краснорылов И.И., Куфаль Г.Э., Перминов С.В., Шевченко В.В.* К вопросу о создании лунной базы // Известия ВУЗов. Астрономия, гравиметрия и космическая геодезия. 2014. № 2. С. 3–10.

*Статья поступила в редакцию 01.11.2017 г.*