

ПРОБЛЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НА ЛУНЕ

Е. Слюта^{1*}

¹Лаборатория геохимии Луны и планет, Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук, Москва, Российская Федерация

*Ответственный автор: e-mail slyuta@geokhi.ru, тел. +74991371484, факс: +74959382054

PROBLEMS OF RESEARCH AND MINING OF GAS DEPOSITS ON THE MOON

E. Slyuta^{1*}

¹Laboratory of Geochemistry of the Moon and Planets, Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

*Corresponding author: e-mail slyuta@geokhi.ru, tel. +74991371484, fax: +74959382054

ABSTRACT

Purpose. The study of the main types of the most valuable lunar resources, such as water, hydrogen, oxygen and other gases in the lunar regolith, and the identification of the main methods and technical solutions for their exploration and mining.

Methods. Based on the analysis of the data of regional and global geochemical mapping of the Moon by spacecraft, and also on the basis of experimental and theoretical studies of implantation and concentration of volatile components in lunar rock-forming minerals, the basic properties of volatiles in the lunar regolith were revealed.

Findings. Depending on the form of accumulation and preservation of volatile components in the lunar regolith, three main types of gas deposits are identified: implanted, weakly bound and frozen volatiles, which differ in composition, content, regional distribution and reserves.

Originality. A complex comparative analysis of the main types of gas deposits on the Moon was carried out, including composition, main properties, predicted reserves, methods and technical solutions for their research and mining.

Practical implications. The most promising types of the Moon's gas deposits are identified and recommendations are given for the development of technical facilities for research and exploration of these deposits, which are already being implemented in the projects of landing space vehicles and lunar rovers.

Keywords: Moon, implanted volatiles, weakly bound volatiles, frozen volatiles, lunar regolith, lunar soil

1. ВВЕДЕНИЕ

Лунные и в целом взеземные ресурсы можно разделить на две основных категории. К первой категории относятся ресурсы, которые необходимы для промышленного использования на месте. Это солнечная энергия. Это газовые компоненты, необходимые для жизнеобеспечения экипажей пилотируемых экспедиций и обитаемых баз и для использования в различных технологических процессах, например, для выработки дополнительной электроэнергии. Это криогенные компоненты (кислород и водород) для производства ракетного топлива на месте.

В качестве основного строительного материала предполагается использование лунного реголита. Низкая теплопроводность, высокие адгезионные и когезионные свойства, обогащенность стеклом и размерной фракцией частиц в десятки микрон, по-

верхность которых активизирована космическим облучением, позволяет использовать лунный реголит в качестве теплозащитного и радиационно-защитного строительного материала.

К этой же категории ресурсов для местного использования принадлежат металлы (Al, Ti, Fe и др.) и редкоземельные элементы.

Ко второй категории взеземных ресурсов относятся материалы, сырье или элементы, которые могут быть востребованы на Земле, что предусматривает их промышленную добычу и доставку на Землю. Такой материал или элемент, который имеется в недостаточном количестве или вообще отсутствует на Земле, а добыча и доставка на Землю которого может быть оправданной и окупаемой, должен иметь действительно стратегическое значение, как например, гелий-3 для возможного обеспечения энергией Земли в

будущем (Kulcinski et al., 1992; Galimov, 2006). В отдаленной перспективе может представлять интерес добыча и доставка редкоземельных элементов. С точки зрения экономической целесообразности рассматривать добычу и доставку элементов, металлов и материалов, запасы которых на Земле могут быть исчерпаны лишь через столетие, преждевременно.

Развертывание первичной автономной инфраструктуры на лунной поверхности уже на начальном этапе освоения Луны потребует наряду с обеспечением транспортного моста с Землей создания и непрерывного наращивания производственных мощностей по добыче, обогащению и переработке местных ресурсов для использования их на месте. Наиболее ценными лунными ресурсами, потребность в которых будет только возрастать, являются вода, водород, кислород и другие газы и их изотопы, т.е. «газовые месторождения» Луны, проблемам исследования и освоения которых и посвящается данная работа.

2. ЛУННЫЙ РЕГОЛИТ

Все наиболее перспективные лунные ресурсы – летучие газовые компоненты, металлы (Al, Ti, Fe и др.), а также редкоземельные элементы, либо сконцентрированы в рыхлом слое реголита, либо уже находятся в реголите в обогащенном, т.е. фактически уже готовом для их дальнейшего обогащения и выделения состоянии.

Отсутствие плотной атмосферы делает поверхность Луны незащищенной от ударов метеоритов самых разных размеров, вплоть до микрометеоритов. В результате метеоритной бомбардировки, длившейся на протяжении всей геологической истории Луны, на ее поверхности образовался покров рыхлого материала – реголита, который состоит из обломков подстилающих горных пород, фрагментов минералов и вторичных частиц, сформированных при ударно-взрывной переработке вещества: брекчий, агглютинов и частиц стекла. Постоянное воздействие солнечного ветра и космического излучения обогащает частицы и минералы реголита водородом, изотопами гелия, редкими газами, космогенными изотопами, а также способствует образованию восстановленных форм Fe, Ti, Si и др. элементов в поверхностных слоях минеральных частиц. Средняя скорость образования реголита очень мала и составляет около 1.5 мм за 1 млн лет (French, 1977). Примерно половина типичного лунного реголита по весу состоит из частиц, размер которых меньше разрешения человеческого глаза (Slyuta, 2014).

Лунный реголит имеет сложное слоистое строение и собственную стратиграфическую и геохимическую историю, которая может быть прослежена с момента образования подстилающих пород (Рис. 1). Слои представляют собой стратифицированную последовательность отложений выбросов из окрестных ударных кратеров, расположенных на расстояниях от первых метров до нескольких сотен километров в зависимости от размера этих кратеров. Каждый слой может отличаться валовым химическим и минеральным составом, размерами частиц, возрастом экспозиции, степенью зрелости реголита и т. д.

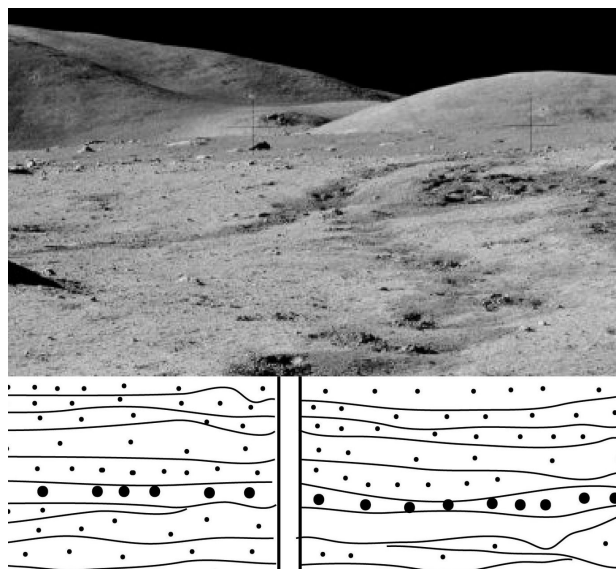


Рисунок 1. Схематический разрез строения рыхлого слоя лунного реголита с буровой скважиной в центре; сверху фотопанорама с места посадки пилотируемой экспедиции «Аполлон-17» (NASA)

Чем крупнее кратер, тем дальше летят выбросы. Соответственно, стратифицированный керн реголита несет информацию о составе и возрасте реголита и подстилающих пород не только в месте бурения, но и в пределах достаточно обширной прилегающей области. Если в окрестностях буровой скважины находятся даже незначительные проявления редких по составу лунных пород, то с большой степенью вероятности эти породы также будут представлены в виде одного из слоев в отобранном керне реголита. Отсутствие атмосферы на Луне и облучение поверхности реголита солнечным ветром и космическими лучами позволяют для восстановления полной истории формирования реголита использовать методы изотопной геохимии для определения как времени экспозиции на лунной поверхности отдельных слоев до их захоронения, так и времени их образования. При этом в самом слое могут присутствовать частицы и минералы лунных пород различного состава и возраста образования.

Рыхлый слой реголита покрывает почти всю поверхность Луны и имеет бимодальный характер с максимумами примерно 5 и 9 м, что соответствует средним значениям мощности реголита для морей и материков (Shkuratov & Bondarenko, 2001). Наблюдается прямая зависимость: чем больше возраст поверхности, тем больше мощность реголита. В морских районах мощность реголита изменяется от 3 до 11 м. В материковых районах разброс мощности реголита гораздо более широкий – от 1 м в высокогорной местности до 18 м и более – в районах плоскогорья с наиболее древним возрастом подстилающих пород.

Таким образом, глубина бурения до 15 м является вполне достаточной почти на всей поверхности Луны и с необходимым запасом обеспечит получение полной стратифицированной колонки реголита с момента образования подстилающих пород.

3. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В ЛУННОМ РЕГОЛИТЕ

Летучие газовые компоненты в зависимости от механизма удержания и формы нахождения в лунном реголите подразделяются на три основных типа – имплантированные, слабосвязанные и замороженные летучие.

Состав имплантированных газов определяется преимущественно благородными газами солнечного ветра. Кроме электронов и протонов (около 95%) в солнечном ветре присутствуют альфа-частицы (ядра гелия, в среднем более 4%) и в небольшом количестве атомы других инертных газов (Ne, Ar, Kr и Xe), а также высокоионизованные ионы кислорода, кремния, серы, железа и др.

Концентрация имплантированных газов солнечного ветра в частицы и минералы лунного реголита зависит от химического и минерального состава частиц, от степени зрелости реголита (степени радиационной дефектности кристаллической решетки минерала) и от размеров частиц, и может изменяться в очень широком диапазоне – до трех порядков и более. Содержание изотопа ^3He в частицах реголита в зависимости от их состава и размеров изменяется от 0.02 до 130 мг г^{-1} , а ^4He от 33 до 360 $\text{г}\cdot\text{г}^{-1}$ (Slyuta, Yakovlev, Voropaev, & Dubrovskii, 2013). Самыми низкими концентрациями благородных газов характеризуются ударные и вулканические стекла. Аналогичные низкие концентрации имплантированного гелия в кристаллических минералах лунного реголита наблюдаются только в плагиоклазе (битовните). Самые высокие концентрации имплантированного гелия наблюдаются в ильмените, который является главным рудным минералом в морских лунных базальтах. Породообразующие минералы лунного реголита оливин и пироксен по содержанию гелия занимают промежуточное положение между стеклами и ильменитом. В целом содержание гелия в стеклах и плагиоклазах лунного реголита примерно в 100 раз меньше среднего содержания гелия в валовом составе реголита, а в ильмените, напротив, в 20 раз больше по сравнению с валовым составом реголита (Slyuta, Yakovlev, Voropaev, & Dubrovskii, 2013).

Избирательное обогащение в зависимости от минерального состава приводит к неоднородному региональному распределению концентрации изотопов гелия и других имплантированных газов в лунном реголите. Области распространения повышенного содержания окислов Ti (5–10%) по данным спектральной съемки (Blewett, Lucey, Hawke, & Jolliff, 1997; Lucey, Blewett, Taylor, & Hawke, 2000) фактически отражают содержание ильменита в реголите и распределение высокотитанистых морских базальтов, которые распространены в Море Спокойствия, в Море Паров, в Море Дождей, в Океане Бурь и в подчиненном значении в Море Влажности и в Море Облаков.

Оцененные прогнозные запасы ^3He в лунном реголите в зависимости от содержания были разделены на 4 категории (Slyuta, Abdrakhimov, & Galimov, 2007). Области распространения высокотитанистых морских базальтов характеризуются наиболее высо-

ким валовым содержанием ^3He (17.4 мг $\cdot\text{г}^{-1}$) и умеренной мощностью реголита (4.4 м). Это преимущественно равнинные области. Прогнозные запасы ^3He в областях распространения высокотитанистых морских базальтов относятся к наиболее высокой категории – I и оцениваются в 65000 тонн на видимой стороне Луны. В целом по всей поверхности Луны прогнозные запасы этой категории оцениваются в 74600 тонн. Прогнозные запасы категории II относятся к областям распространения морских базальтов с умеренным содержанием TiO_2 (3–5%), характеризующихся умеренным содержанием ^3He (8 мг $\cdot\text{г}^{-1}$) и средней мощностью реголита 4.8 м. Прогнозные запасы категории II на видимой стороне Луны оцениваются в 109500 тонн. Это в два раза больше по запасам, чем в категории I, но почти в 4 раза больше по занимаемой площади.

Площади с прогнозными запасами категории III охватывают области распространения низкотитанистых морских базальтов с пониженным содержанием ^3He в реголите (5.7 мг $\cdot\text{г}^{-1}$) и с повышенной мощностью реголита (8.1 м). Прогнозные запасы этой категории оцениваются в 143200 тонн на видимом полушарии Луны. В сумме прогнозные запасы первых трех категорий оцениваются в 317750 тонн на видимом полушарии Луны и располагаются на площади, занимающей около 12% всей площади полушария. Практически все прогнозные запасы первых трех категорий располагаются на территории лунных морей, площадь которых по морским геологическим комплексам оценивается примерно в 13% всей площади Луны (Slyuta, Galimov, & Marov, 2014a).

Четвертая категория прогнозных запасов характеризуется низкими значениями содержания ^3He (3.1 мг $\cdot\text{г}^{-1}$) и повышенной средней мощностью (10.1 м), характерной для материковых районов Луны. Прогнозные запасы этой категории охватывают всю материковую область Луны и оцениваются на всей лунной поверхности в 2150000 тонн. Общие прогнозные запасы ^3He в лунном реголите на всей поверхности Луны оцениваются примерно в 2500000 тонн (Slyuta, Abdrakhimov, & Galimov). На видимой стороне Луны общие запасы ^3He оцениваются в 1276000 тонн.

Состав имплантированных газов определяется не только благородными газами солнечного ветра, но и газами земного ветра, т.е. газами земной атмосферы, которые под действием солнечного ветра ионизировались и во время прохождения Луной хвоста магнитосферы Земли имплантировались в частицы лунного реголита.

По данным возраста экспозиции слоев реголита, в доставленной стратифицированной колонке реголита и по появлению в слоях реголита компоненты земного биогенного кислорода, обедненного ^{16}O , потоки которого были зарегистрированы японским лунным орбитальным космическим аппаратом “Кагуя”, можно определить время появления и распространения жизни на Земле (Ozima, Yin, Podosek, & Miura, 2008; Terada et al., 2017). Изменение концентрации изотопов N (основного компонента ранней атмосферы Земли) и легких элементов (He, Ne, Ar и др.) с учетом возраста экспозиции частиц реголита позволяет оце-

нить время становления геомагнитного поля (магнитосферы) Земли (Ozima, Yin, Podosek, & Miura, 2008). Исследование состава имплантированных газов земного происхождения в частицах реголита до становления магнитосферы Земли позволяет оценить состав первичной земной атмосферы. При наличии грунта с обратной стороны Луны по изменению состава имплантированных газов (отсутствию газов земного происхождения) с учетом возраста экспозиции слоев (частиц) реголита можно оценить время синхронизации вращения Луны относительно Земли (Ozima, Yin, Podosek, & Miura, 2008).

Стратифицированная колонка реголита позволит также исследовать изменения активности и состава солнечного ветра и галактических космических лучей за период с момента образования подстилающих пород, т.е. за 3.5 – 4 млрд лет и более. Развиваемый в Институте геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук (ГЕОХИ РАН) метод термодесорбционной масс-спектрометрии – один из немногих методов, позволяющих исследовать химический и изотопный состав имплантированных летучих и их концентрацию в зависимости от глубины имплантации и энергии активации (Slyuta et al., 2017).

Слабосвязанными называются газы, насыщающие поровое пространство лунного реголита. Содержание и состав слабосвязанных газов в лунном реголите определяется диффузией, которая зависит от температуры поверхности и концентрации насыщения реголита при данной температуре, температурой сублимации и составом замороженных летучих в лунном реголите, составом выделяемых из недр глубинных (вулканогенных) газов, плотностью потока солнечного ветра, который зависит от географической долготы и широты и плотностью потока земного ветра.

Их накопление в лунном реголите в значительной степени зависит от температуры поверхности и не зависит от состава реголита. Содержание этого типа газов существенно возрастает в высоких лунных широтах, характеризующихся низкой дневной температурой и минимальной амплитудой суточного хода температур, и на порядок и более превышает концентрацию имплантированной компоненты (Shkuratov, Starukhina, Kaydash, & Bondarenko, 1999). Этот тип лунных ресурсов по сравнению с имплантированной и замороженной компонентами отличается более однородным распределением, наибольшей доступностью и, по-видимому, наибольшими запасами в полярных областях. Слабосвязанные газы легко выделяются при температурных и механических воздействиях на лунный реголит и требуют разработки специальных методов исследования и добычи. Это один из наименее исследованных типов газов в лунном реголите (Slyuta, 2017).

Замороженные летучие компоненты находятся в открытом поровом пространстве в виде частиц микронного размера (иней) на поверхности частиц реголита. Наличие в реголите массивных отложений водяного льда в виде линз оценивается как маловероятное (Slyuta, Galimov, & Marov, 2014a).

Исследования Луны, проведенные в самое последнее время космическими аппаратами, показали,

что в полярных областях могут содержаться значительные запасы водородсодержащих соединений, к которым относится водяной лед, а также ряд других замороженных и захороненных летучих соединений. Источником воды (водяного льда), присутствующего в лунном реголите, могли быть кометы, астероиды, метеориты, межпланетная пыль (Arnold, 1979), космическое выветривание минералов реголита под воздействием ионов солнечного ветра, в результате которого образуется протонная вода (Slyuta et al., 2017), и наконец, дегазация лунных недр.

Суммарный эффект воздействия сублимации, распыления, ультрафиолетового излучения Лайман-альфа и микрометеоритной бомбардировки не позволяет сохраняться отложениям водяного льда на поверхности реголита (Slyuta, Galimov, & Marov, 2014a). Сохранение водяного льда возможно лишь при захоронении его реголитом. Минимальная мощность сухого слоя реголита, покрывающего захороненные отложения водяного льда, составляет около 40 см и в зависимости от температурных условий на поверхности может изменяться (Feldman, 1998; Lawrence et al., 2006). В силу неравномерности поступления воды из разных источников и неравномерности захоронения частиц льда слоем реголита при падении метеоритов, отложения водяного льда в реголите, по-видимому, должны быть слоистыми или стратифицированными в прямой зависимости от истории формирования слоев реголита. Отложения замороженных летучих в слое реголита на полюсах могут простираться на глубину до 2 м и более. Возраст этого слоя реголита может достигать 2 млрд лет и более. Содержание водяного льда по разным данным оценивается от $150 \text{ г} \cdot \text{г}^{-1}$ (0.015% вес) до 5% вес (Slyuta, Galimov, & Marov, 2014a).

В результате эксперимента LCROSS в облаке выброса по данным наблюдений в NIR и UV диапазонах спектра кроме воды и OH^- был обнаружен обширный состав водородсодержащих летучих (H_2O , H_2S , NH_3 , C_2H_2 , CH_3OH , CH_4 , OH^-) (Sanin et al., 2017). По данным этого же эксперимента содержание воды в реголите кратера Кабеус оценивается в 5.6 ± 2.6 вес %. Предполагается, что в верхнем сухом слое реголита содержится около 50 ppm или примерно 0.045 вес % водяного эквивалента водорода. В целом в полярных областях в реголите в среднем оценивается содержание воды до 0.5 вес %, что эквивалентно 8 литрам в одном кубическом метре реголита (Sanin et al., 2017). В кратере Кабеус концентрация водяного эквивалента водорода в сумме для слабосвязанной и замороженной компонент может достигать $10.9 + 5.1 - 3.3$ вес %, а в кратере Шумейкер – $9.4 + 2.7 - 2.0$ вес %. Отчетливой корреляции между распределением водородсодержащих аномалий и степенью освещенности не наблюдается. Тем не менее, водородсодержащие аномалии с самой высокой концентрацией водорода располагаются, как правило, на дне крупных постоянно затененных депрессий (кратеров). В северной полярной области в кратерах Erlanger (10.9 км, здесь и далее указан диаметр), Fibiger (21.1 км), Plaskett (114.3 км), Whipple (14.5 км), Rozhdestvenskiy (44 км), Milankovic E. (49.3 км) (Sanin et al., 2017). В южной

полярной области в кратерах Cabeus (100.6 км), Shoemaker (51.8 км), Haworth (51.4 км), Scott M. (17.8 км), de Gerlache (32.7 км), Hale Q. (24.1 км), Amundsen (103.4 км), Idel'son I. (28 км).

Если принять содержание водяного льда в холодных ловушках (постоянно затененных кратерах) равным значению в 1.5% (Feldman et al., 2000), то с учетом полученной минимальной площади ловушек в северном и южном полярном регионе по данным (Bussey et al., 2003) минимальные прогнозные запасы льда составят 4.5×10^8 и 3.9×10^8 тонн соответственно. По данным радарной съемки КА “Чандраян-1”, прогнозные запасы водяного льда в северной полярной области на дне 40 кратеров-ловушек диаметром 3 – 12 км оцениваются около 6×10^8 тонн (Spudis et al., 2010).

Как и слабосвязанные, замороженные летучие компоненты также нестабильны при механическом и температурном воздействии. Температура сублимации водяного льда в условиях лунной среды составляет около 110 К. Такие летучие компоненты как CO_2 , CO , NH_3 , N_2 , Ar и др. характеризуются еще более низкой температурой сублимации (Vasavada, Paige, & Wood, 1999). При нагреве реголита до 170 К частицы водяного льда размером до 100 мкм потеряют 10% своей массы в течение часа, а частицы размером до 1 мкм потеряют то же количество в течение 32 секунд (Andreas, 2007). Следует отметить, что по сравнению с предыдущими оценками скорости сублимации водяного льда в зависимости от температуры (Wagner, Saul, & Pruss, 1994; Murphy & Koop, 2005), это самая оптимистическая оценка. Как и в случае со слабосвязанными газами, классические методы исследования и добычи замороженных летучих, связанные с экскавацией, и транспортировкой лунного грунта, неприменимы.

4. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОЦЕНКИ ЗАПАСОВ ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В ЛУННОМ РЕГОЛИТЕ

Имплантированные газы устойчивы при механических и температурных воздействиях в пределах нескольких сотен градусов и могут быть отобраны и доставлены на Землю вместе с лунным грунтом без особых потерь и изучены в земных лабораториях. Благодаря этому свойству этот тип газов является наиболее изученным ресурсом. Для исследования имплантированных летучих необходимо колонковое бурение с отбором стратифицированной колонки реголита, т.е. с сохранением стратификации отдельных слоев. Оптимальная глубина бурения – на всю мощность рыхлого слоя реголита до подстилающей породы, т.е. около 15 м.

Стратифицированный керн реголита отбирается в эластичные пробоотборники, которые помещаются в специальные кассеты для хранения и доставки на Землю. Первая автоматическая буровая установка ЛБ-9 по забору стратифицированного образца реголита на глубину более 2 м успешно отработала на борту советского КА “Луна-24” в 1976 году. Аналогичная задача по доставке стратифицированной ко-

лонки лунного грунта поставлена перед КА “Луна – Грунт” (проект “Луна-28”), который включен в российскую Федеральную космическую программу 2016 – 2025 годов. Кроме посадочного стационарного аппарата буровую установку следующего поколения ЛБ-15 предполагается также устанавливать на тяжелый автоматический луноход “Робот-Геолог” (АЛ – РГ), который по инициативе Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук (ГЕОХИ РАН) (Москва, Российская Федерация) и под руководством Роскосмоса разрабатывается в Центральном научно-исследовательском и опытно-конструкторском институте робототехники и технической кибернетики (ЦНИИ РТК) (Санкт-Петербург, Российская Федерация) для проведения тематической геологической, геохимической и геофизической съемки с отбором грунта с поверхности и неглубоким (до 6 м) бурением нескольких (не менее 5) скважин по протяженному маршруту длиной около 400 км (Slyuta, Galimov, & Marov, 2014b; Slyuta, Vasilev, & Dal'yaev, 2017) (Рис 2).

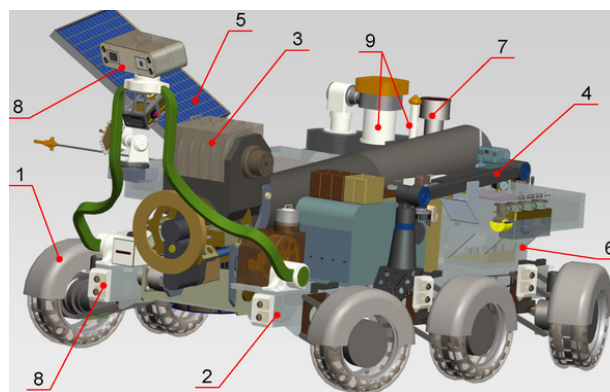


Рисунок 2. Проектный облик лунохода “Робот-Геолог”: 1 – система передвижения; 2 – несущая конструкция; 3 – буровая установка ЛБ-15; 4 – манипулятор; 5 – система энергоснабжения; 6 – система терморегулирования; 7 – навигационный комплекс; 8 – система технического зрения; 9 – системы управления и связи

Для проведения поисково-разведочных работ для оценки содержания, распределения и оконтуривания месторождений слабосвязанных и замороженных летучих в полярных областях Луны также по инициативе ГЕОХИ РАН и под руководством Роскосмоса разрабатывается проект среднего автоматического лунохода “Робот-Разведчик” (АЛ – РР) (“Robot-Prospector”). При проведении поисково-разведочного маршрута для исследования слабосвязанных газов и замороженных летучих отбор образцов лунного реголита не нужен. Отсутствие такой задачи существенно снижает габаритно-весовые характеристики поисково-разведочного АЛ – РР. Это средний тип лунохода с массой 250 – 350 кг и полезной научной нагрузкой с массой 50 – 60 кг. Протяженность маршрута до 50 – 60 км. Проект среднего лунохода “Робот-Разведчик” предполагается реализовать в качестве автоматической межпланетной станции (АМС) “Луна-29”, а проект тяжелого лунохода “Робот-Геолог” – в качестве проекта АМС “Луна-30”.

Комплект основной и вспомогательной научной аппаратуры (КНА), разрабатываемый для АЛ – РР, подразделяется на три основных комплекса: научно-навигационный комплекс (радиомаяк, ТВ-спектрометр, ИК-спектрометр, ТВ-камера рабочего поля), комплекс геохимической разведки (шнековая буровая установка (ШБУ) с масс-спектрометром (М), гамма и нейтронный спектрометр, манипулятор), комплекс геофизической разведки (георадар, глубинный каротажный зонд многоразового использования (ГКЗ), магнитометр-градиентометр, гравиметр). В целом, КНА почти аналогичен комплексу, размещаемому на АЛ – РГ, за исключением более тяжелой колонковой буровой установки на АЛ – РГ и некоторых других приборов.

В качестве основного научного инструмента на АЛ – РР устанавливается многоразовое шнековое буровое устройство (ШБУ) с масс-спектрометром (М) для исследования газов в точках опробования на глубину до 2 м по маршруту лунохода. Прибор предложен и разрабатывается в ГЕОХИ РАН. Буровое устройство состоит из колокола со шнековой буровой установкой, которая включает буровую головку, барабан для подачи и стыковки шнековых буровых штанг, 4 буровых штанги по 0.5 м, и корпуса (Рис. 3).

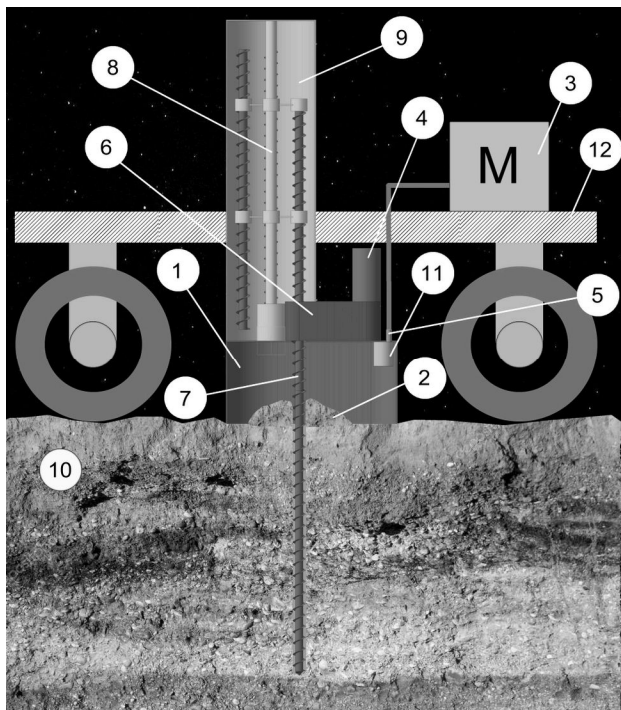


Рисунок 3. Схема устройства шнековой буровой установки (ШБУ) с масс-спектрометром (М): 1 – колокол; 2 – шлам; 3 – масс-спектрометр; 4 – двигатель; 5 – патрубок забора газов; 6 – редуктор; 7 – буровая штанга; 8 – револьверный механизм (барабан); 9 – корпус; 10 – грунт; 11 – пылевой фильтр патрубка забора газов; 12 – шасси лунохода “Робот-Разведчик”

Буровая штанга состоит из трубки диаметром около 1 см со шнеком на наружной поверхности. После опускания буровой установки с колоколом на грунт, шнековый бур заглубляется в лунный грунт на

глубину до 2 м. Во время бурения шлам реголита вместе со слабосвязанными и замороженными летучими подается шнеком под герметичный колокол. В результате механического и температурного воздействия шнека на грунт слабосвязанные газы и замороженные летучие выделяются из шлама реголита, концентрируются под колоколом, и через патрубок приемного устройства поступают в ионизационную камеру масс-спектрометра. Измерения проводятся непрерывно во время бурения на всю глубину скважины, что позволит оценить распределение слабосвязанных и замороженных газов по глубине и исследовать их химический и изотопный состав.

АЛ – РР решает следующие научные и поисково-разведочные задачи:

1. Распределение по глубине, химический и изотопный состав слабосвязанных и замороженных летучих в лунном реголите.

2. Латеральное распределение слабосвязанных и замороженных летучих в пределах исследуемой аномалии водяного эквивалента водорода.

3. Структура “рудных полей” распределения концентрации слабосвязанных и замороженных летучих и их связь с составом лунных пород (реголита), геологическими структурами и геофизическими аномалиями (электромагнитные свойства реголита, магнитные и гравитационные аномалии).

4. Природа источников, формы нахождения и механизмы накопления слабосвязанных и замороженных летучих в лунном реголите в полярных областях.

5. Прогнозные запасы слабосвязанных и замороженных летучих в районе исследования и в целом в полярных областях.

6. Геологический, геохимический и геофизический разрез (структура) рыхлого слоя реголита до подстилающих пород и его мощность (толщина) в точках наблюдений (бурения) и по маршруту лунохода.

7. Геологическое, геохимическое и геофизическое картирование района исследования.

5. ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В ЛУННОМ РЕГОЛИТЕ

Добыча имплантированных газовых компонентов из реголита основана на классических методах экскавации, транспортировки и последующего нагрева значительных объемов лунного грунта. Экскавация и нагрев до 700°C больших объемов грунта требуют значительных энергетических затрат (более 12 МВт на одну установку) (Sviatoslavsky, 1993). Общая масса одной единицы такого полнофункционального (от добычи до разделения и хранения компонентов) горнодобывающего и обогатительного комплекса, включая лунный комбайн третьего поколения Mark III (Galimov, 2006), танкер, криогенный сепаратор с радиатором и стационарную энергетическую установку, превышает 30 т. По предварительным оценкам специалистов ГЕОХИ РАН и Роскосмоса для добычи и обеспечения, например, годовой потребности в криогенных компонентах (кислород, водород) на начальном этапе освоения Луны потребуется доставка на Луну сотен тонн железа; сотни мегаватт элек-

троэнергии, экскавация, перемещение и нагрев миллионов тонн лунного грунта.

Вышерассмотренная технология разработки газовых месторождений на Луне ориентирована только на имплантированный тип газовых ресурсов и не применима для разработки наиболее богатых типов лунных газовых месторождений, содержащих слабосвязанную и замороженную компоненты. Требуется развитие иных методов и технологий разработки газовых месторождений, которые могли бы изменить сам принцип извлечения необходимых газов из лунного реголита. Например, метод селективной экстракции газов из природных и промышленных силикатов с помощью электромагнитного резонанса.

В процессе экспериментальных и аналитических исследований имплантации и концентрации гелия и водорода в породообразующих минералах-аналогах лунного реголита (Slyuta, Yakovlev, Voropaev, & Dubrovskii, 2013; Slyuta et al., 2017) обнаружена возможность такой селективной экстракции газов из природных и промышленных силикатов с помощью электромагнитного резонанса. Было выявлено, что адсорбированные на поверхности нано- и мезопор различных кристаллических фаз силикатов и алюмосиликатов молекулы газов колеблются с частотой до $\sim 10^{12}$ Гц, что попадает в терагерцовый диапазон шкалы электромагнитных колебаний. По предварительным экспериментальным данным, в температурном диапазоне 20 – 120°C для газов от 2 до 44 а.е.м. (от молекулярного водорода до двуокиси углерода) частота колебаний молекул находится в пределах от 6 до 2 ТГц.

Управляемая селективная десорбция заключается в осуществлении резонанса электромагнитных колебаний излучения с колебаниями адсорбированных молекул газа. При настройке терагерцового лазера на определенную частоту колебания данной молекулы при заданной температуре можно получить селективный фотодесорбционный поток выбранного газа. При этом молекулы иных газов, колеблющиеся на других частотах, не будут десорбироваться. Поток фотодесорбции является координатно-ориентированным с направлением лазерного излучения. Наиболее совершенными источниками терагерцового излучения являются квантово-каскадные лазеры, которые отличаются компактностью, малой массой и могут работать при низких температурах. Глубина проникновения лазерного излучения в терагерцовом диапазоне в рыхлом слое реголита может достигать первых метров.

В целом горнодобывающий комплекс на основе селективной экстракции летучих компонентов должен состоять из следующих основных элементов: легкого колесного шасси; терагерцового квантово-каскадного лазера с настраиваемой частотой излучения; электронного блока дистанционного управления; антенны; композитного или пленочного колокола для сбора выделяемого потока газов; электростатического сепаратора для очищения летучих элементов от пыли; каскадного компрессора из нескольких насосов для сжатия газа; нескольких

сменных цистерн для хранения с рабочим давлением 15 МПа или больше; энергетической установки. Примерная общая масса полностью автономного и роботизированного горнодобывающего комплекса может изменяться в интервале от нескольких сотен килограммов до 1 – 2 т в зависимости от величины и производительности комплекса и его задач (разведка или добыча). Необходимая оперативная энергия для всей установки оценивается в пределах первых десятков киловатт. Комплекс при необходимости позволит оперативно переключаться на добычу любого иного газового компонента и изотопа. Сохраняется первичный лунный ландшафт.

Для отработки технологии и подтверждения характеристик оборудования для селективной экстракции газов еще необходимо выполнить значительный объем комплексных исследований условий резонансной десорбции газов из промышленных и природных силикатов. Следует отметить, что это лишь один из возможных перспективных методов, который еще требует своего практического подтверждения.

6. ВЫВОДЫ

Газовые месторождения в лунном реголите в зависимости от формы накопления и сохранения подразделяются на три основных типа – имплантированные, слабосвязанные и замороженные летучие. Выделенные типы газовых месторождений отличаются по составу, содержанию, региональному распределению и запасам летучих компонентов. Имплантированные газы устойчивы при механических и температурных воздействиях в пределах нескольких сотен градусов. Благодаря этому свойству этот тип газов является наиболее изученным ресурсом. Наиболее богатые месторождения этого типа расположены преимущественно в экваториальной области в морских районах. Разработка этого типа месторождений может осуществляться классическими методами, применяемыми в земной горной промышленности, включая экскавацию, транспортировку и нагрев значительных объемов лунного грунта.

Наиболее богатые месторождения слабосвязанных газов и замороженных летучих компонентов сконцентрированы преимущественно в полярных областях Луны. Прогнозные запасы каждого из этих типов месторождений даже по предварительным данным на несколько порядков превышают запасы месторождений имплантированного типа на всей поверхности Луны. В отличие от имплантированной компоненты слабосвязанные и замороженные летучие крайне чувствительны и нестабильны к температурному и механическому воздействию, и требуют разработки специальных методов исследования и технических средств для поисков, разведки и разработки этих, наиболее ценных типов газовых месторождений.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследования поддержаны грантом Российского научного фонда № 17-17-01279.

REFERENCES

- Andreas, E.L. (2007). New Estimates for the Sublimation Rate for Ice on the Moon. *Icarus*, 186(1), 24-30. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2006.08.024>
- Arnold, J.R. (1979). Ice in the Lunar Polar Region. *Journal of Geophysical Research*, (84), 5659-5668. <https://doi.org/10.1029/JB084iB10p05659>
- Blewett, D.T., Lucey, P.G., Hawke, B.R., & Jolliff, B.L. (1997). Clementine Images of the Lunar Sample-Return Stations: Refinement of FeO and TiO₂ Mapping Techniques. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 102(E7), 16319-16325. <https://doi.org/10.1029/97je01505>
- Bussey, D.B.J., Lucey, P.G., Stutel, D., Robinson, M.S., Spudis, P.D., & Edwards, K.D. (2003). Permanent Shadow in Simple Craters Near the Lunar Poles. *Geophysical Research Letters*, 30(6), 1278-1281. <https://doi.org/10.1029/2002gl016180>
- Feldman, W.C. (1998). Fluxes of Fast and Epithermal Neutrons from Lunar Prospector: Evidence for Water Ice at the Lunar Poles. *Science*, 281(5382), 1496-1500. <https://doi.org/10.1126/science.281.5382.1496>
- Feldman, W.C., Lawrence, D.J., Elphic, R.C., Barraclough, B.L., Maurice, S., Genetay, I., & Binder, A.B. (2000). Polar Hydrogen Deposits on the Moon. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 105(E2), 4175-4195. <https://doi.org/10.1029/1999je001129>
- French, B.M. (1977). *The Moon Book*. London: Penguin Books.
- Galimov, E.M. (2006). Proekt "Luna – Geliy-3". *Nauka v Rossii*, (6), 15-23.
- Kulcinski, G.L., Cameron, E.N., Santarius, J.F., Sviatoslavsky, I.N., Wittenberg, L.J., & Schmitt, H.H. (1992). Fusion Energy from the Moon for the Twenty-First Century. In *2d Conference on Lunar Bases and Space Activities of the 21st Century* (pp. 459-474). NASA: Johnson Space Center.
- Lawrence, D.J., Feldman, W.C., Elphic, R.C., Hagerty, J.J., Maurice, S., McKinney, G.W., & Prettyman, T.H. (2006). Improved Modeling of Lunar Prospector Neutron Spectrometer Data: Implications for Hydrogen Deposits at the Lunar Poles. *Journal of Geophysical Research*, 111(E8), 1-19. <https://doi.org/10.1029/2005je002637>
- Lucey, P.G., Blewett, D.T., Taylor, G.J., & Hawke, B.R. (2000). Imaging of Lunar Surface Maturity. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 105(E8), 20377-20386. <https://doi.org/10.1029/1999je001110>
- Murphy, D.M., & Koop, T. (2005). Review of the Vapor Pressures of Ice and Super Cooled Water for Atmospheric Applications. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, (131), 1539-1565. <https://doi.org/10.1256/qj.04.94>
- Ozima, M., Yin, Q.-Z., Podosek, F.A., & Miura, Y.N. (2008). Toward Understanding Early Earth Evolution: Prescription for Approach from Terrestrial Noble Gas and Light Element Records in Lunar Soils. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(46), 17654-17658. <https://doi.org/10.1073/pnas.0806596105>
- Sanin, A.B., Mitrofanov, I.G., & Litvak, M.L., Bakhtina, B.N., Bodnarik, J.G., Boynton, W.V....Vostrukhina, A.A. (2017). Hydrogen Distribution in the Lunar Polar Regions. *Icarus*, (283), 20-30. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2016.06.002>
- Shkuratov, Yu.G., Starukhina, L.V., Kaydash, V.G., & Bondarenko, N.V. (1999). Raspredelenie soderzhaniya ³He po vidimomu polushariyu luny. *Astronomicheskii Vestnik*, 33(5), 466-478.
- Shkuratov, Y., & Bondarenko, N. (2001). Regolith Layer Thickness Mapping of the Moon by Radar and Optical Data. *Icarus*, 149(2), 329-338. <https://doi.org/10.1006/icar.2000.6545>
- Slyuta, E.N., Abdrakhimov, A.M., & Galimov, E.M. (2007). The Estimation of Helium-3 Probable Reserves in Lunar Regolith. *38th Lunar and Planetary Science*, 2175.
- Slyuta, E.N., Yakovlev, O.I., Voropaev, S.A., & Dubrovskii, A.V. (2013). He Implantation and Concentrations in Minerals and Lunar Regolith Particles. *Geochemistry International*, 51(12), 959-967. <https://doi.org/10.1134/s0016702913120094>
- Slyuta, E.N. (2014). Physical and Mechanical Properties of the Lunar Soil (A Review). *Solar System Research*, 48(5), 330-353. <https://doi.org/10.1134/s0038094614050050>
- Slyuta, E.N., Galimov, E.M., & Marov, M.Ya. (2014a). *Problemy selenologii*. V knige "Fundamental'nye kosmicheskie issledovaniya", Vol. 2 "Solnechnaya sistema" (pp. 52-97). Moskva: Fizmatlit.
- Slyuta, E.N., Galimov, E.M., & Marov, M.Ya. (2014b). *Tematicheskaya geologicheskaya s'emka i predvaritel'naya geologicheskaya razvedka (na Lune)*. V knige "Fundamental'nye kosmicheskie issledovaniya", Vol. 2 "Solnechnaya sistema" (pp. 103-128). Moskva: Fizmatlit.
- Slyuta, E.N. (2017). Osnovnye tipy lunnykh resursov i problemy ikh dobychi i obogashcheniya. *Gornyy Zhurnal*, (4), 13-18.
- Slyuta, E.N., Petrov, V.S., Yakovlev, O.I., Voropaev, S.A., Monakhov, I.S., & Prokof'eva, T.V. (2017). Application of Thermodesorption Mass Spectrometry for Studying Proton Water Formation in the Lunar Regolith. *Geochemistry International*, 55(1), 27-37. <https://doi.org/10.1134/s0016702916130188>
- Slyuta, E.N., Vasilev, A.V., & Dalyaev, I.Yu. (2017). Lunokhod "Robot-Geologist": Scientific Tasks and Technical Configuration. *48th Lunar and Planetary Science*, 1929.
- Spudis, P.D., Bussey, D.B.J., Butler, B., Carter, L., Chakraborty, M., Gillis-Davis, J....Ustinov, E. (2010). Results of the Mini-SAR Imaging Radar, Chandrayaan-1 Mission to the Moon. *41st Lunar and Planetary Science*, 1224.
- Sviatoslavsky, I.N. (1993). *The Challenge of Mining He-3 on the Lunar Surface: How All the Parts Fit Together*. Technical Report WCSAR-TR-AR3-9311-2. Madison: Wisconsin Center for Space Automation and Robotics.
- Terada, K., Yokota, S., Saito, Y., Kitamura, N., Asamura, K., & Nishino, M.N. (2017). Biogenic Oxygen from Earth Transported to the Moon by a Wind of Magnetospheric Ions. *Nature Astronomy*, 1(2), 0026. <https://doi.org/10.1038/s41550-016-0026>
- Vasavada, A., Paige, D.A., & Wood, S.E. (1999). Near-Surface Temperatures on Mercury and the Moon and the Stability of Polar Ice Deposits. *Icarus*, 141(2), 179-193. <https://doi.org/10.1006/icar.1999.6175>
- Wagner, W., Saul, A., & Pruss, A. (1994). International Equations for the Pressure Along the Melting and Along the Sublimation Curve of Ordinary Water Substance. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 23(3), 515-527. <https://doi.org/10.1063/1.555947>

ABSTRACT (IN RUSSIAN)

Цель. Изучение основных типов наиболее ценных лунных ресурсов (вода, водород, кислород и другие газы) в лунном реголите для определения основных методов и технических решений их исследования и добычи.

Методика. На основе анализа данных регионального и глобального геохимического картирования Луны космическими аппаратами, а также на основе экспериментальных и теоретических исследований имплантации и концентрации летучих компонентов в лунных породообразующих минералах были выявлены основные свойства летучих в лунном реголите.

Результаты. В зависимости от формы накопления и сохранения летучих компонентов в лунном реголите выделены три основных типа газовых месторождений – имплантированные, слабосвязанные и замороженные летучие, которые отличаются по составу, содержанию, региональному распределению и запасам.

Научная новизна. Проведен комплексный сравнительный анализ основных типов газовых месторождений на Луне, включая состав, основные свойства, прогнозные запасы, методы и технические решения их исследования и разработки.

Практическая значимость. Определены наиболее перспективные типы газовых месторождений на Луне и даны рекомендации по разработке технических средств для исследований и разведки этих месторождений, которые уже реализуются в проектах посадочных космических аппаратов и луноходов.

Ключевые слова: Луна, имплантированные летучие, слабосвязанные летучие, замороженные летучие, лунный реголит, лунный грунт

ABSTRACT (IN UKRAINIAN)

Мета. Вивчення основних типів найбільш цінних ресурсів Місяця (вода, водень, кисень і інші гази) в місячному реголіті для визначення основних методів і технічних рішень їх дослідження і видобутку.

Методика. На основі аналізу даних регіонального та глобального геохімічного картування Місяця космічними аппаратами, а також на основі експериментальних і теоретичних досліджень імплантації й концентрації летких компонентів у місячних породоутворюючих мінералах були виявлені основні властивості летких в місячному реголіті.

Результати. Залежно від форми накопичення та збереження летких компонентів у місячному реголіті виділено три основних типи газових родовищ – імплантовані, слабозв'язані та заморожені леткі, які відрізняються за складом, вмістом, регіональним розподілом і запасами.

Наукова новизна. Проведено комплексний порівняльний аналіз основних типів газових родовищ на Місяці, включаючи склад, основні властивості, прогнозні запаси, методи і технічні рішення їх дослідження та розробки.

Практична значимість. Визначено найбільш перспективні типи газових родовищ на Місяці та надано рекомендації щодо розробки технічних засобів для досліджень і розвідки цих родовищ, які вже реалізуються у проектах посадочних космічних апаратів і місяцеходів.

Ключові слова: Місяць, імплантовані леткі, слабозв'язані леткі, заморожені леткі, місячний реголіт, місячний грунт

ARTICLE INFO

Received: 4 October 2017

Accepted: 13 December 2017

Available online: 15 December 2017

ABOUT AUTHORS

Evgeniy Slyuta, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Head of the Laboratory of Geochemistry of the Moon and Planets, Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of the Russian Academy of Sciences, 19 Kosygina St, 119334, Moscow, Russian Federation. E-mail: slyuta@geokhi.ru