

К ВОПРОСУ ОБ ОБРАЗОВАНИИ ВОДЫ В ЛУННОМ РЕГОЛИТЕ

© 2019 г. А. Ю. Дубинский¹, С. И. Попель^{1, 2, 3, *}

¹Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия

²Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Россия

³Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”, г. Москва, Россия

*popel@iki.rssi.ru

Поступила в редакцию 19.06.2017 г.

После доработки 03.01.2018 г.

Принята к публикации 30.03.2018 г.

Показана возможность высвобождения из кристаллической решетки диоксида кремния в лунном реголите атомов кислорода как частей молекул гидроксида серебра. Гидроксид серебра, в свою очередь, может относительно легко вступать в реакцию с водородом, что приводит к образованию воды и серебра. Тем самым показана возможность образования молекул воды, включенных в приповерхностный лунный грунт. Присутствие молекул воды в лунном грунте может повлиять на фотоэлектрические свойства лунного реголита и параметры плазменно-пылевой системы над Луной.

DOI: 10.1134/S0023420619020043

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время происходит определенный ренессанс исследований Луны. О своих планах исследования Луны в XXI веке заявили КНР, США, Индия, Европейский Союз. В России готовятся миссии *Луна-25*, *Луна-26*, *Луна-27*, *Luna Sample Return* и т.д. [1, 2]. Разработана стратегическая концепция национальной программы исследования и начального этапа освоения Луны, согласно которой ближайшей стратегической задачей отечественной исследовательской космонавтики 21-го века должно стать создание российского плацдарма на поверхности Луны для обеспечения условий создания в будущем Российской Лунной Станции.

Имеется предположение, основанное на результатах недавних исследований [3], проведенных Lunar Reconnaissance Orbiter, что вблизи полюсов Луны существует “вечная мерзлота” с относительно высоким содержанием водяного льда (до 5% по массе). При этом считается, что водяной лед обеспечит систему жизнеобеспечения будущей Лунной Станции, и также, что из него может производиться водородно-кислородное топливо для полетов в дальний космос.

В действительности, исследования [3] по детектированию потоков нейтронов, прошедших через участки лунной поверхности в южном полушарии Луны, показали присутствие в приповерхностной зоне Луны в области широт, превышающих 70°, областей, обогащенных водородом. Возможно, исследование [3] указывает на при-

сутствие льда в приповерхностных областях Луны, а возможно существование приповерхностных областей водорода обусловлено электронами и протонами солнечного ветра, которые, ударяясь о Луну, поглощаются (имплантируются) ее поверхностью, где они образуют нейтральные атомы и молекулы водорода или химические соединения, содержащие водород, например, относящиеся к гидроксильным группам [4]. Данный имплантированный водород может концентрироваться на поверхности Луны. Механизм этого процесса следующий. Протоны солнечного ветра поглощаются в частицах лунного реголита на глубинах до 10^{-5} см. В конце пробега протонов происходит их химическое связывание с атомами, составляющими лунный реголит, в частности, с атомами кислорода; при этом десятки процентов атомов кислорода в участках лунного грунта, взаимодействующих с протонами солнечного ветра, оказываются связанными в гидроксильные группы ОН. Этот имплантированный водород в результате диффузии выходит на поверхность Луны. Десорбция связанного таким образом водорода при температурах, меньших 400 К, характерных для поверхности Луны, происходит очень медленно. В результате за время порядка нескольких тысяч лет на поверхности Луны могут достигаться достаточно большие поверхностные концентрации водородосодержащих веществ (вплоть до величин порядка 10^{17} см⁻²) [4].

Что касается воды, работы [5–8] свидетельствуют о ее небольших количествах в лунном

грунте. Образование воды при этом за счет протонов солнечного ветра все же остается сомнительным, поскольку для этого требуется, чтобы в том самом месте, где находится гидроксильная группа, остановился протон, увязнув в толще реголитовой матрицы, и при этом разорвал бы именно ту связь, которая удерживает ОН-группу с кристаллом силиката, а также присоединился бы именно к кислороду с образованием молекулы воды. Что касается свободной воды на поверхности Луны, то температурный режим на ее поверхности не позволяет сохраняться воде как на открытых участках поверхности, так даже и в неглубоких лунных кратерах. Даже лед при ночных температурах (~150 К) и низком давлении водяного пара над поверхностью Луны должен испаряться. По этой причине молекулы воды скорее всего существуют в материи реголита в виде включенных (инкорпорированных) молекул или небольших кластеров без выхода на поверхность, где их бы ожидало скорейшее испарение [9]. Преимущественную долю в химическом составе реголита составляет диоксид кремния. Таким образом, существенным для понимания процессов, происходящих в лунном реголите, является определение механизма образования в нем включенной в кристаллическую решетку SiO_2 воды.

Энергия связи в кварце весьма велика, и если необходимо высвободить ОН-группу, то иначе как попаданием в эту связь второго протона этого не сделать — тепловой энергии для разрыва этой связи не хватит. Сравнительно стабильное “выдавливание” кислорода из кристалла SiO_2 возможно, в частности, тогда, когда место атома кислорода занимает сходный с ним по свойствам элемент шестой группы. В данном случае им может быть атом серы, который имеет сходное строение внешней электронной оболочки, хотя и обладает при этом несколько большим радиусом атома, чем кислород. При этом, атом серы среди сходных по свойствам элементов шестой группы,

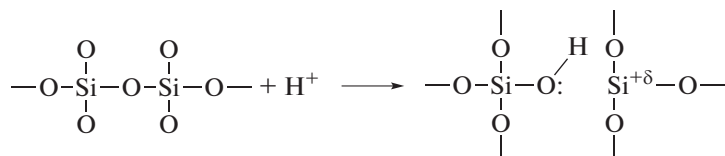
которые могли бы заместить атом кислорода, имеет наименьший размер. Для элемента большего размера, чем сера, было бы существенно сложнее заместить атом кислорода в кристаллической решетке SiO_2 . Далее, если рассматривать соединения, в которых присутствует сера на Луне, существенный интерес с точки зрения формирования молекул воды предстает сульфид серебра. Серебро, как показал, например, эксперимент LCROSS [10], присутствует в лунной породе. Атом серебра, хоть и крупнее по размерам, но, как оказывается при рассмотрении электрохимического ряда активности веществ, пассивнее водорода и позволяет себя вытеснить из гидроксида, что, в конечном итоге, приводит к образованию молекулы воды при контакте протона солнечного ветра с гидроксидом серебра.

Сульфид серебра обнаружен (см. рис. 1, 2) в виде включений изометричных или угловых микромасштабных частиц (иногда их агрегатов) в полевоом шпате из реголита Моря Кризисов, собранного автоматической станцией *Луна-24* [11, 12]. Присутствие сульфида серебра на Луне вполне объяснимо и связано с заметной ролью, которую играли летучие компоненты магм в глубинных, изолированных от вакуума, лунных магматических процессах на ранних этапах развития спутника Земли [13]. Целью настоящей работы является описание возможного механизма образования воды, учитывающего присутствие в лунном грунте сульфида серебра.

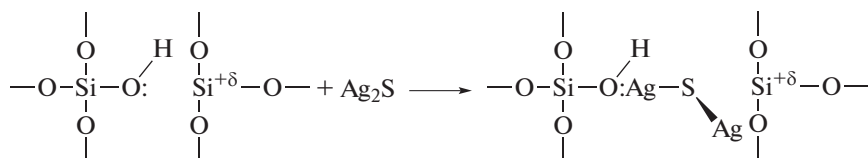
2. МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ МОЛЕКУЛ ВОДЫ

Молекулы воды могут образовываться вследствие реализации следующего механизма обмена серой и кислородом в тех точках реголита, где непосредственно контактируют сульфид серебра и диоксид кремния.

(а) Когда в эту точку попадает протон солнечного ветра, происходит разрыв связи $\text{Si}-\text{O}$, а водород образует ОН-группу, наблюдаемую в эксперименте:



(б) Затем происходит сближение атомов серы и кремния, в свою очередь, атом серебра сближается с атомом кислорода с образованием промежуточного комплекса:



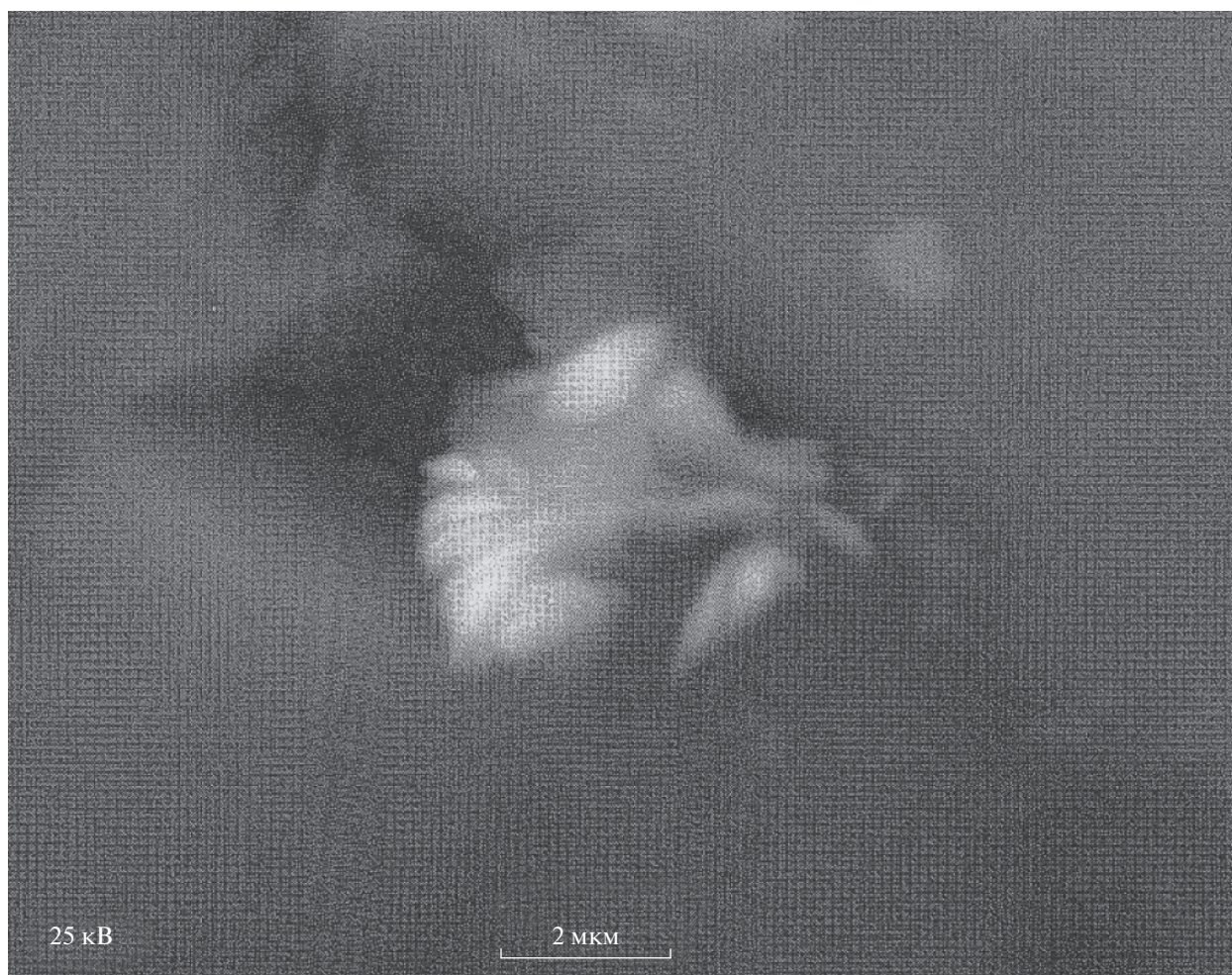


Рис. 1. Изображение частицы, содержащей сульфид серебра, из реголита Моря Кризисов, собранного автоматической станцией *Луна-24*, полученное с помощью электронного микроскопа [12].

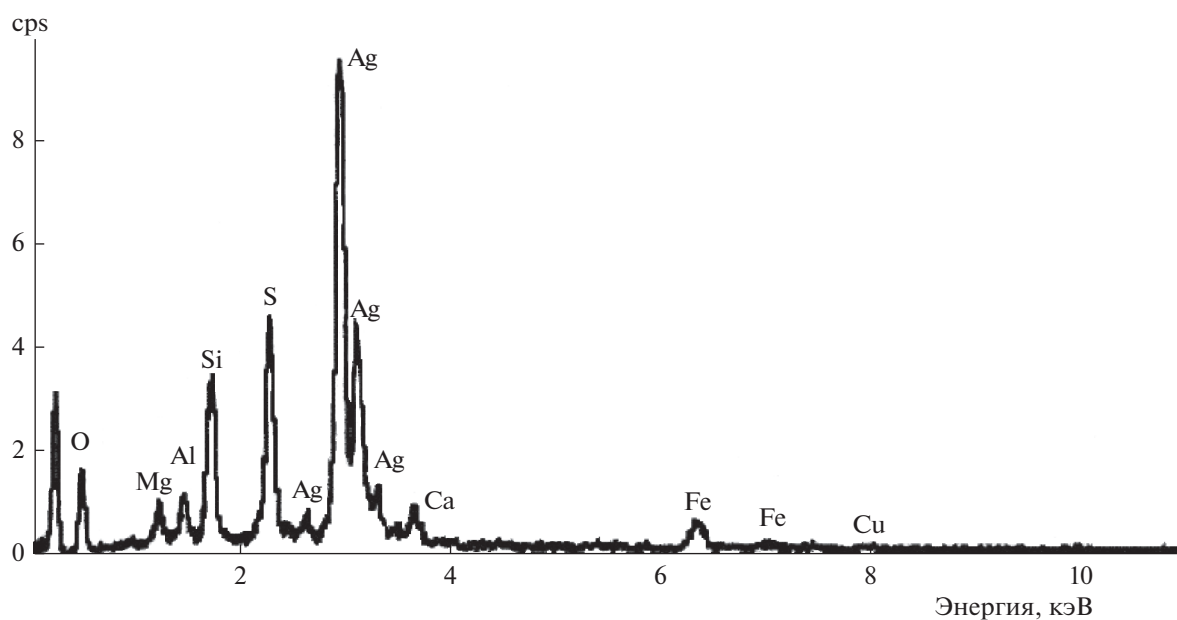
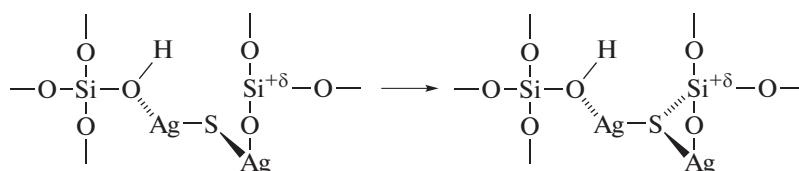
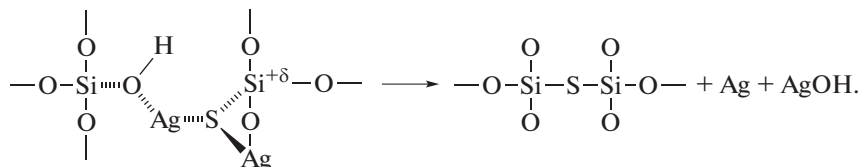


Рис. 2. Химический состав частицы, представленной на рис. 1, полученный на основе энергодисперсионного рентгеновского анализа [12].

(в) После чего образуется единый промежуточный комплекс за счет ковалентно-водородных связей, и происходит разрыв связи Ag—S:



(г) В результате отделяется гидроксид серебра, и, наконец, происходит отрыв атома серебра.



Гидроксид серебра, в свою очередь, может относительно легко вступать в реакцию с водородом, что приводит к образованию воды и серебра. Тем самым существует возможность образования молекул воды, включенных в приповерхностный лунный грунт.

В формуле (б) присутствует Ag_2S . Его содержание в лунном реголите неизвестно. Однако, поскольку частички сульфида серебра размером от одного до нескольких микрон обнаружены в образцах лунного грунта [13], а характерный размер частиц лунного реголита составляет несколько десятков микрометров (см., например, [14]), можно ожидать, что в некоторых участках лунного реголита содержание Ag_2S может достигать величин порядка 1% от общего объема. Присутствие атома водорода в формуле (г) указывает на возможность присутствия в реголите самородного серебра. Отметим, что о существовании в лунном грунте микромасштабных частиц самородного серебра свидетельствуют данные [15].

Скорость описанного выше процесса лимитируется следующими факторами.

(а) Разрыв связи Si—O возможен только в течение лунного дня, поскольку для него требуется поток протонов солнечного ветра, который отсутствует в период лунной ночи. В течение лунного дня энергия протонов солнечного ветра оказывается достаточной для разрыва связи Si—O.

(б) Известно, что лунный реголит состоит из обломков лунных пород и минералов, стекол, литифицированных брекчий, фрагментов метеоритов и т.д. размером от нано- и микромасштабных пылевых частиц, которые преобладают в распределении по размерам, до объектов, имеющих несколько метров в поперечнике. Для осуществления описанных выше реакций важное значение имеет диффузия сульфида серебра в область частицы лунного реголита. Если принять характерный размер частицы равным 1 мкм, то время диффузии составляет порядка 500 с, что существенно

меньше продолжительности лунного дня (около 14 земных суток). Таким образом, контакт сульфида серебра с зерном реголита приводит к сравнительно быстрому проникновению Ag_2S в пределы силикатной решетки.

(в) Указанные реакции происходят в слое реголита, обращенном к Солнцу и имеющем толщину порядка 10^{-5} см [4], что обусловлено необходимостью достижения протонами солнечного ветра зоны их контакта с сульфидом серебра (для осуществления разрыва связи Si—O). Оценка, основанная на учете характерных энергий связи Ag—S и Si—S, позволяет определить вероятность обмена атома кислорода на атом серы и дает величину порядка 10^{-5} .

Что касается количества воды, образующейся в рамках представленного выше механизма, можно привести следующую оценку. Верхний слой лунной поверхности толщиной в несколько сантиметров представляет собой реголит, эволюционирующий в результате ударов метеороидов (см., например, [14]). Типичный размер частицы лунного реголита составляет несколько десятков микрометров. Вследствие ударов метеороидов (в том числе и микрометеороидов) частицы реголита все время перемешиваются. Поскольку протоны солнечного ветра поглощаются в частицах лунного реголита на глубинах до 10^{-5} см = 0.1 мкм, описанные выше химические процессы происходят лишь в тонком приповерхностном слое частицы толщиной порядка 0.1 мкм. Из-за того, что поток метеороидов на лунную поверхность присутствует всегда, можно предположить, что за достаточно долгое время большая часть частиц реголита оказывается подвергнутой воздействию протонов солнечного ветра, и в приповерхностном слое каждой из этих частиц происходят соответствующие химические процессы. В конечном итоге, молекулы Ag_2S в приповерхностном слое (толщиной порядка 0.1 мкм) каждой из частиц реголита,

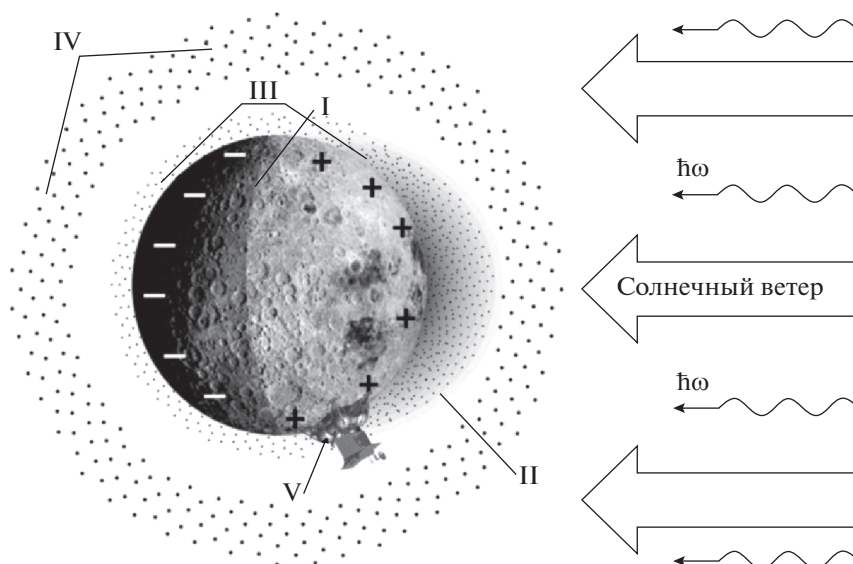


Рис. 3. Основные элементы, характеризующие плазменно-пылевую систему над лунной поверхностью: терминатор (I), фотоэлектроны (II), приповерхностная пыль (III), пыль на больших высотах (IV), фотоны солнечного излучения ($h\omega$), солнечный ветер. Показан также спускаемый аппарат (V) будущей лунной миссии на высоких широтах в Южной полушере.

где присутствовали эти молекулы, замещаются молекулами воды. Таким образом, можно предполагать, что молекулы воды, образованные в результате реализации описанного в данной работе механизма, присутствуют лишь в приповерхностном (толщиной порядка 0.1 мкм) слое частицы реголита. Соответственно, количество воды в лунном реголите по отношению к количеству сульфида серебра можно оценить как отношение объема указанного приповерхностного слоя частицы к объему типичной частицы реголита, имеющей размер в несколько десятков микрометров. Учитывая, что в некоторых участках лунного реголита содержание Ag_2S может достигать величин порядка 1%, находим, что в этих же участках доля воды, образуемой за счет описанного здесь механизма, может превышать 10⁻⁶%.

3. ВОДА В ЛУННОМ ГРУНТЕ И ПЛАЗМЕННО-ПЫЛЕВАЯ СИСТЕМА

В настоящее время фактически считается общепринятым [1, 2, 16], что пыль над лунной поверхностью является составной частью плазменно-пылевой системы (рис. 3). Поверхность Луны заряжается под действием электромагнитного излучения Солнца, плазмы солнечного ветра, плазмы хвоста магнитосферы Земли. При взаимодействии с излучением лунные породы испускают электроны благодаря фотоэффекту, что приводит к формированию над поверхностью слоя фотоэлектронов. Фотоэлектроны поставляются и пылевыми частицами, парящими над поверхностью Луны (они тоже поглощают солнечный свет).

Пылевые частицы, находящиеся на поверхности Луны или в приповерхностном слое, не только испускают, но и поглощают фотоэлектроны, а также фотоны солнечного излучения, электроны и ионы солнечного ветра; если же Луна находится в хвосте магнитосферы Земли, то — электроны и ионы плазмы магнитосферы. Все эти процессы приводят к зарядке пылевых частиц, их взаимодействию с заряженной поверхностью Луны, подъему и движению пыли.

Свойства пылевой плазмы над поверхностью Луны будут изучаться в рамках будущих российских космических миссий *Луна-25* и *Луна-27*. На посадочных модулях станций *Луна-25* и *Луна-27* предполагается разместить соответствующую аппаратуру [1, 2, 16]. Посадка спускаемых аппаратов *Луна-25* и *Луна-27* планируется в области высоких широт в Южной полушере Луны, т.е. именно там, где весьма возможно повышенное содержание водорода. Присутствие водорода в лунном реголите может по-разному влиять на фотоэлектрические свойства лунного реголита и параметры плазменно-пылевой системы над Луной. Действительно, ожидается [16], что пылевые частицы, парящие над участками, обогащенными водородом, имеют большие размеры (вплоть до ~250 нм), большие заряды, достигают больших высот и т.д., чем в ситуации, когда пыль парит над областями типичного (не обогащенного водородом) лунного реголита. Однако, если в реголите присутствуют молекулы воды, то, его работа выхода может увеличиться, поскольку работа выхода льда, 8.7 эВ, а работа выхода типичного реголита — 5.5 эВ. Соответственно, можно ожидать, что

присутствие воды в лунном реголите, наоборот, ослабит свойства плазменно-пылевой системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, показана возможность высвобождения из кристаллической решетки диоксида кремния в лунном реголите атомов кислорода как частей молекул гидроксида серебра. Гидроксид серебра, в свою очередь, может относительно легко вступать в реакцию с водородом, что приводит к образованию воды и серебра. Тем самым показана возможность образования молекул воды, включенных в приповерхностный лунный грунт. Доля воды, образуемой за счет данного механизма, в веществе лунного реголита на некоторых участках может превышать $10^{-6}\%$. Присутствие молекул воды в приповерхностном лунном грунте оказывает существенное влияние на фотоэлектрические свойства лунного реголита и параметры плазменно-пылевой системы над Луной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Popel S.I., Zelenyi L.M.* Future Lunar Missions and Investigation of Dusty Plasma Processes on the Moon // *J. Plasma Phys.* 2013. V. 79. № 4. P. 405.
2. *Попель С.И.* Пыль и пылевая плазма в Солнечной системе // *Природа.* 2015. № 9. С. 48.
3. *Mitrofanov I.G., Sanin A.B., Boynton W.V. et al.* Hydrogen Mapping of the Lunar South Pole Using the LRO Neutron Detector Experiment LEND // *Science.* 2010. V. 330. P. 483.
4. *Starukhina L.* Water detection on atmosphereless celestial bodies: Alternative explanations of the observations // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. № E7. P. 14701.
5. *Chen Y., Zhang Y., Liu Y. et al.* Water, fluorine, and sulfur concentrations in the lunar mantle // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2015. V. 427. P. 37.
6. *Hauri E.H., Saal A.E., Rutherford M.J., Van Orman J.A.* Water in the Moon's interior: Truth and consequences // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2015. V. 409. P. 252.
7. *McCubbin F.M., Vander Kaaden K.E., Tartèse R. et al.* Magmatic volatiles (H, C, N, F, S, Cl) in the lunar mantle, crust, and regolith: Abundances, distributions, processes, and reservoirs // *Am. Mineral.* 2015. V. 100. P. 1668.
8. *Barnes J.J., Kring D.A., Tartèse R. et al.* An asteroidal origin for water in the Moon // *Nature Communications.* 2016. V. 7. P. 11684.
9. *Старухина Л.В.* К вопросу о происхождении избытка водорода на лунных полюсах // *Астрономический вестник.* 2000. Т. 34. № 3. С. 233.
10. *Schultz P.H., Hermalyn B., Colaprete A. et al.* The LCROSS Cratering Experiment // *Science.* 2010. V. 330. P. 468.
11. *Богатилов О.А., Горшков А.И., Мохов А.В. и др.* Первая находка самородного молибдена, сульфида серебра и твердого раствора железа и олова в лунном грунте // *Геохимия.* 2001. № 6. С. 665.
12. *Богатилов О.А., Горшков А.И., Мохов А.В. и др.* Новые находки рудных минералов в лунном грунте Моря Кризисов // *Докл. РАН.* 2001. Т. 378. № 2. С. 230–232.
13. *Мохов А.В., Карташев П.М., Богатилов О.А.* Луна под микроскопом: новые данные по минералогии Луны: атлас. М.: Наука, 2007.
14. *Голубь А.П., Дольников Г.Г., Захаров А.В. и др.* Плазменно-пылевая система в приповерхностном слое освещенной части Луны // *Письма в ЖЭТФ.* 2012. Т. 95. № 4. С. 198–204.
15. *Богатилов О.А., Мохов А.В., Карташев П.М. и др.* Микрочастицы рудных минералов, найденные в лунном реголите из Моря Изобилия: (Cu, Au, Ag) 4Zn, Ag, Au, Sn, Pb, Sb, Re, MoS₂, CdS, AuS, RhI₃ // *Докл. РАН.* 2004. Т. 395. № 6. С. 803.
16. *Попель С.И., Копнин С.И., Голубь А.П. и др.* Пылевая плазма у поверхности Луны // *Астрономический вестник.* 2013. Т. 47. № 6. С. 455.