

УДК 523.3

ГЕОХИМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ УДАРНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ПОЛЯРНОГО РЕГОЛИТА НА ЛУНЕ

© 2022 г. А. Т. Базилевский^{a, *}, В. А. Дорофеева^a, Юань Ли^b, ЛиГанг Фанг^b

^aИнститут геохимии и аналитической химии РАН, Москва, Россия

^bСучжоуский профессиональный университет, Сучжоу, Китай

*e-mail: atbas@geokhi.ru

Поступила в редакцию 11.04.2022 г.

После доработки 16.06.2022 г.

Принята к публикации 03.07.2022 г.

В работе рассматриваются геохимические эффекты ударной переработки полярного реголита Луны. В нем присутствует примесь льда воды, что может (должно?) создавать условия для возможных химических реакций. Пока достаточно надежно обнаружен один геохимический эффект — образование нехарактерного для относительно низких селенографических широт гематита Fe_2O_3 . В работе выполнен термодинамический анализ условий, необходимых для образования гематита. Показано, что для этого требуется присутствие свободного кислорода, который, как вариант, может накапливаться при диссипации в открытый космос водорода, образующегося при разложении воды. Конкретный механизм, или механизмы, образования гематита требуют дальнейшего изучения. Весьма вероятно, что ударная переработка полярного реголита приводит также к гидратации силикатных стекол и к образованию тяжелых углеводородов. Диссипация в открытый космос, по-видимому, образующегося в этих процессах свободного водорода должна приводить к увеличению содержания дейтерия в остающемся водороде. Возможно, лед H_2O полярного реголита содержит значительное количество тяжелой воды. Будущие исследования в полярных областях Луны, особенно с доставкой образцов на Землю, должны подтвердить или опровергнуть эти выводы и предположения.

Ключевые слова: полярные регионы Луны, ударные кратеры, реголит, летучие компоненты, гематит

DOI: 10.31857/S0320930X22060032, **EDN:** EKGCSXB

ВВЕДЕНИЕ

Реголит в полярных областях Луны содержит водяной лед и другие замороженные летучие, что представляет большой интерес как для фундаментальной лунной науки, так и для практических нужд, таких как ресурсы для жизнеобеспечения будущих лунных баз и топливо для космических полетов. Поэтому планы космических исследований ряда стран предусматривают полеты в полярные районы Луны, прежде всего в южнополярный район, где кроме исследований замороженных летучих есть возможность изучать вал древнейшего и крупнейшего из известных ударного бассейна Южный полюс — Эйткен (см., например, Митрофанов, Зеленый, 2019; Head и др., 2021; Ivanov и др., 2015; 2018). Роскосмос планирует во второй половине 2022 г. запустить КА Луна-25, который должен совершить посадку в окрестностях Южного полюса (Дьячкова и др., 2021; Митрофанов и др., 2021). На его борту девять научных приборов, но главная задача этого полета — отработка новой системы посадки в полярном районе. Примерно через три года плани-

руется запуск КА Луна-27, который тоже должен совершить посадку в районе Южного полюса с задачей более детального изучения реголита и лунной экзосферы. А затем аппарат Луна-28 должен доставить на Землю образцы полярного реголита (Ефанов, Долгополов, 2016).

Изучение Южного полюса Луны планирует также Китай — миссии Chang'e-6, -7, -8 (Ху и др., 2020). На это же частично нацелена и американская программа Artemis (Arthemis Plan, 2020; см. также <https://www.nasa.gov/specials/artemis/>). В рамках этой программы в конце 2023 г. планируется запуск лунохода VIPER (Volatiles Investigating Polar Exploration Rover), который должен заниматься поисками льда воды и других возможных ресурсов в южнополярном районе Луны (<https://www.nasa.gov/viper/overview>). Кроме того, NASA объявило конкурс по подготовке разработки запасов водяного льда на Южном полюсе Луны (NASA's Break the Ice Challenge). Европейское космическое агентство тоже прорабатывает возможность исследований в полярных областях Луны (Carpenter et al., 2015; Carpenter, Fisackerly, 2017).

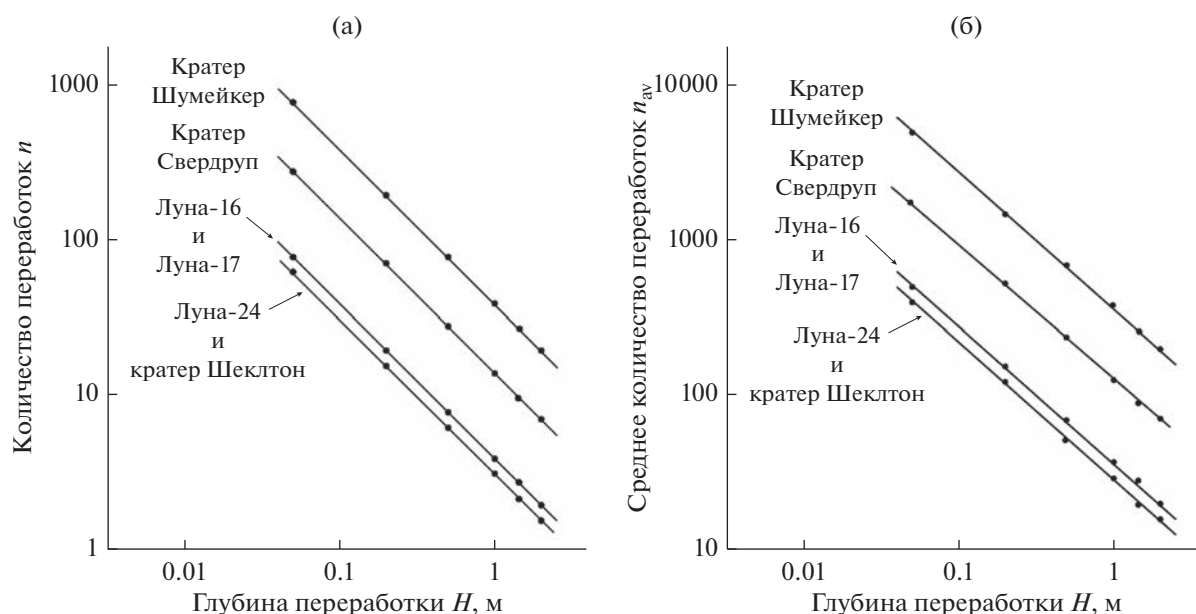


Рис. 1. (а) Количество переработок до глубины $>H$; (б) среднее количество переработок до глубины $<H$.

В работе Базилевский и др. (2022) рассмотрен механический аспект ударной переработки лунного реголита применительно к некоторым постоянно затененным участкам в южной полярной области Луны и для сравнения — к находящимся в низких широтах местах посадки КА Луна-16, Луна-17 и Луна-24. Оценена средняя толщина слоя реголита в рассматриваемых местах и количество “переработок” на глубину от 5 см до 2 м (рис. 1).

Из графиков, представленных на рис. 1, видно, что даже в случае сравнительно молодых участков поверхности (например, в кратере Шеклтон) количество “перерабатывающих” метеоритных ударов на глубину 1–2 м и менее очень велико. Ударники, бомбардирующие лунную поверхность, имеют скорости от ~ 2.5 до ~ 70 км/с при средней скорости ~ 17 км/с (см., например, Le Feuvre, Wiczorek, 2008; Melosh, 2011; Werner, Ivanov, 2015). Такие удары должны приводить к очень сильному нагреву вещества мишени в месте удара и вещества ударника. Наземные телескопические наблюдения по проекту NELIOTA в Национальной обсерватории Афин привели к обнаружению на поверхности Луны 112 световых вспышек, что позволило оценить массы ударников и максимальные температуры этих вспышек (Avdellidou, Vaubaillon, 2019; Avdellidou и др., 2021). Оказалось, что эти ударники имели сантиметровой–дециметровый диапазон диаметров, а яркостная температура вспышек находится в пределах от 1000 до 7000 К при средней температуре ~ 2700 К. Эта очень высокая температура достигается в точке удара и быстро высвечивается, но ка-

кие-то реакции между компонентами вещества ударника и мишени могут состояться, хотя основные химические и физико-химические взаимодействия должны происходить при более низких температурах и в течение сравнительно долгого времени. Из-за высокой пористости реголита и потому низкой теплопроводности эти локальные тепловые события происходят в относительно тонком приповерхностном слое, в пределах рассматриваемых нами глубин переработки реголита. В случае каждого удара такие высокие температуры реализуются в объемах, сопоставимых с объемами ударников, то есть небольших, но с течением времени объемы подвергшегося такому нагреву вещества становятся значительными, а объемы вещества, подвергшегося более низкому нагреву, должны быть еще более значительными.

Эффекты “сухой” ударной переработки лунного реголита известны по результатам изучения образцов, доставленных на Землю миссиями Apollo и Луна из районов, находящихся на низких широтах. Мы знаем, что в зрелом реголите содержатся десятки процентов ударного, в основном, силикатного расплава (см., например, McKay и др., 1991). Для образования такого расплава необходимы температуры 1200–1700 К, что даже ниже температур, оцененных в проекте NELIOTA. В случае полярного реголита Луны, содержащего примесь льда H_2O и других замороженных летучих, эти летучие испаряются и могут (должны?) вовлекаться в химическое взаимодействие с нелетучими компонентами реголита. Напомним, что эксперимент LCROSS показал присутствие в реголите днища южнополярного кратера Кабео

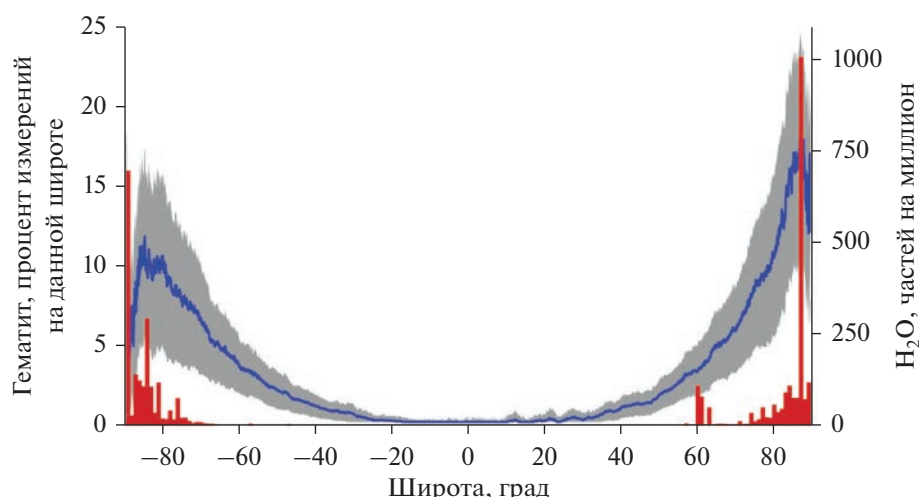


Рис. 2. Красное — частота определений гематита в интервалах 1° по широте. Голубое — содержания H_2O по результатам измерений прибором M3 (по данным рис. S2 в работе Li и др. (2020) с изменениями). Серое — область ошибок.

кроме H_2O еще (в порядке убывания) — H_2S , NH_3 , SO_2 , C_2H_4 , CO_2 , CH_3OH , CH_4 , OH (Colaprete др., 2010).

Некоторое представление о характере такого взаимодействия могут дать результаты экспериментов Gerasimov и др. (2002). Используя легкогазовую пушку, а также моделируя удары лазерными импульсами, авторы этой работы изучали роль воды в процессах ударного испарения и последующей конденсации. Присутствие воды в системе обеспечивалось либо использованием образцов мишени, содержащих структурно связанную воду (например, серпентина), либо проведением экспериментов в атмосфере, содержащей пар воды. Было найдено, что железо частично окисляется ($\text{Fe}^0 \Rightarrow \text{FeO}$). В веществе конденсата методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии обнаружены признаки присутствия водосодержащих силикатных структур, а также углеводов с массовыми номерами до 700. Это результаты экспериментов, которые могут указывать на характер геохимического преобразования при ударной переработке полярного реголита. А что показывают наблюдения за поверхностью Луны?

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Из результатов наблюдений за поверхностью Луны на геохимический эффект ударной переработки полярного реголита пока, вероятно, указывают только результаты измерений со спектрометром Moon Mineralogy Mapper (M3) с борта индийского спутника Луны Chandrayaan-1 (Li и др., 2020). С помощью этого прибора выполнена съемка поверхности Луны в диапазоне $0.46\text{--}2.98$ мкм с пространственным разрешением от 140 до 280 м (Green и др., 2011). Li и др. (2020) обнаружили в

спектрах поверхности на высоких селенографических широтах поглощение вблизи 0.85 и 0.66 мкм, характерное для гематита Fe_2O_3 . Известно, что в преобладающем большинстве случаев железо в лунных породах и реголите представлено в форме Fe^{+2} , а незначительная часть — в восстановленной форме, в том числе в виде металла. Кроме того, поверхность Луны из-за отсутствия атмосферы постоянно подвергается воздействию солнечного ветра, представляющего собой в основном поток протонов, и под его воздействием окисленные породы поверхности должны восстанавливаться. Поэтому обнаружение фазы, содержащей железо в высшей степени окисления (Fe^{+3}) было неожиданным и требует объяснения. График частоты встречаемости определений гематита по данным прибора M3 в зависимости от широты показан на рис. 2.

Как видно на рис. 2, гематит на поверхности Луны встречается на широтах выше 60° на севере и на юге. На этом же рисунке показано распределение по поверхности содержаний H_2O , тоже по данным прибора M3. Это содержания в верхних 1–2 мм лунного грунта.

Li и др. (2020) считают, что окисление лунного железа на поверхности реголита вызвано реакцией с кислородом в хвосте земной магнитосферы в присутствии H_2O при нагреве ударами межпланетной пыли. Возможно, сначала происходит окисление, одновременное с гидратацией, и образуется FeOOH , который, обезвоживаясь, переходит в гематит. Судя по тому, что Li и др. (2020) на своем рисунке показывают распределение H_2O по данным прибора M3, они имеют в виду вовлечение в процесс именно этой поверхностной воды. Следует, однако, отметить, что широтное распределение гематита лучше коррелирует с рас-

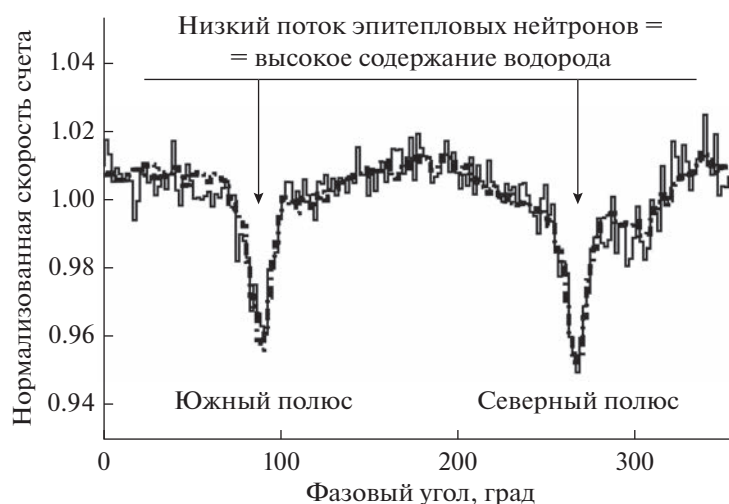


Рис. 3. Вариации потока эпитепловых нейтронов по широте на поверхности Луны, измеренные с прибором LEND (по данным рис. 12 в работе Litvak и др. (2012) с изменениями).

пределением H_2O по данным прибора LEND (рис. 3), чем с измерениями с прибором M3 (рис. 2). По данным M3 содержания H_2O плавно увеличиваются от очень низких на экваторе к высоким в полярных областях, тогда как по данным LEND содержания H_2O тоже плавно увеличиваются от очень низких на экваторе к более высоким в сторону полюсов, а на 60° – 70° северной и южной широты они резко возрастают. И именно в этом интервале широт появляются и резко усиливаются спектральные признаки присутствия гематита.

Dong и др. (2021) провели магнитогидродинамические расчеты и модернизировали модель Li и др. (2020). Они учитывали, что у Луны в период 4.2–2.5 млрд лет назад, по-видимому, было довольно сильное магнитное поле, благодаря чему эффективность воздействия O^+ верхней атмосферы Земли значительно увеличивалась. Впрочем, за время 2.5 млрд и более лет примесь гематита из реголита полярных областей должна была быть привнесена и в области низких широт. А в доставленных оттуда образцах гематит не обнаружен, хотя за столь длительное время он мог быть восстановлен фотонами солнечного ветра или захоронен в субповерхностных слоях, или то и другое вместе.

Ниже приводятся термодинамические расчеты, рассматривающие условия для возможного образования гематита на Луне в современную эпоху.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

В ходе этого анализа мы рассмотрели возможность образования гематита в современных условиях, поэтому были проанализированы вариации состава содержаний компонентов в облаке пара, образующегося при ударе космического тела о поверхность Луны. В качестве модельного состава поверхности Луны выбран состав материковой коры из работы Демидовой и др. (2007) (их табл. 5). Тогда модельный состав лунного материкового реголита достаточно точно можно представить как смесь 0.18 молей пироксена состава $(\text{Fe}_{0.32}\text{Mg}_{0.68})\text{SiO}_3$ и 0.28 молей анортита $(\text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8])$ с небольшой примесью рутила (TiO_2) . В качестве ударника был выбран углистый хондрит группы CM, состав которого может быть представлен как 0.11 моля серпентина, 0.042 моля пирита, 0.02 моля SiO_2 , 0.039 моля магнетита, 0.04 моля $\text{MgCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ и 0.07 моля $\text{CaCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, а также 0.08 моля легких органических соединений общей формулы C_nH_n (Lodders, Fegley, Jr., 1998). Считаем, что масса ударника и масса вовлеченного в процесс испарения вещества коры Луны равны. Тогда итоговый модельный состав имеет вид (таблица).

Чтобы выяснить влияние температуры и общего давления на состав системы, мы рассчитали ее равновесный состав при разных общих давлениях ($P_{\text{общ}}$) и некоторые результаты представлены на рис. 4. Расчеты проводились методом минимизации свободной энергии Гиббса для замкнутой

Исходный модельный состав ударного пара

Элемент	Si	Al	Fe	Mg	Ca	O	H	S	C
Моль	1.19	0.56	0.436	0.563	0.35	5.486	1.4	0.084	0.19

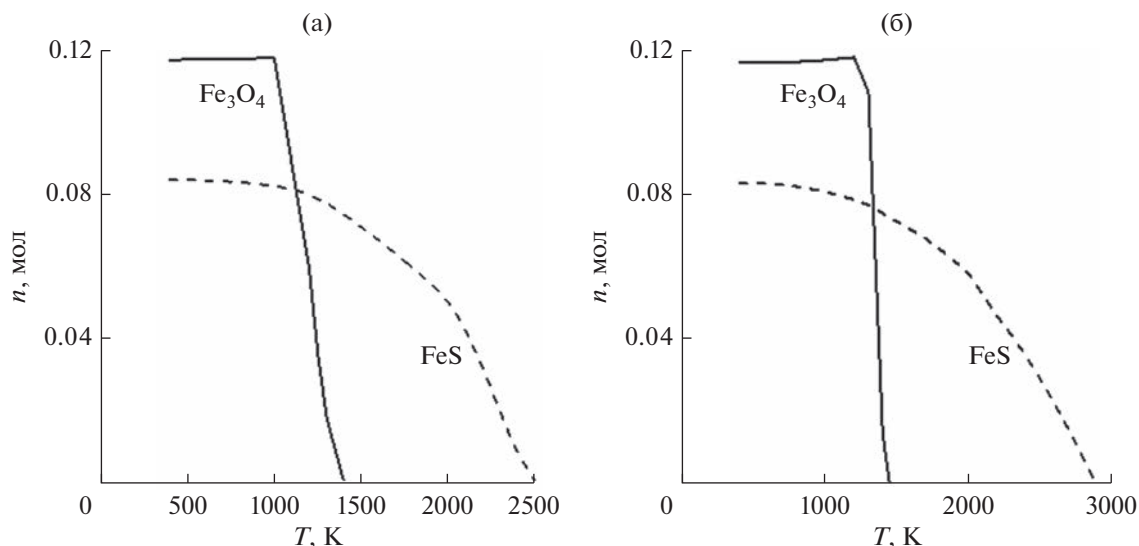


Рис. 4. Равновесные составы твердых железосодержащих фаз (в молях) системы, отвечающей данным таблицы при различных температурах (T). $P_{\text{общ}} = 1$ кбар (а) и $P_{\text{общ}} = 100$ кбар (б).

системы при наличии ограничений в виде равенств, описывающих баланс масс по каждому из элементов, а также неравенств, отражающих неотрицательность содержаний любого компонента рассматриваемой равновесной химической системы. Термодинамическая информация заимствована главным образом из работ (Глушко др., 1978–2004).

Из полученных результатов видно, что даже при наличии значительного количества воды, привносимого в систему материалом ударника состава СМ-хондритов, гематит не должен образовываться. Около 20% суммы содержаний Fe при высоких температурах окисляется серой (что обусловлено соотношением мольных количеств S и Fe), образуя фазу $\text{FeS}_{\text{тв}}$. С понижением температуры оставшаяся часть железа образует магнетит (Fe_3O_4), в котором лишь два атома Fe находятся в степени окисления +3. Подобные результаты были получены и для низких давлений.

Таким образом, присутствие воды, даже в относительно больших количествах (~ 1.6 моля H_2O на 1 моль Fe), при нагреве вплоть до ~ 3000 K не должно приводить к полному окислению железа до трехвалентного состояния и образования гематита. Очевидно, что помимо воды, в системе необходимо присутствие свободного кислорода, как это уже отмечалось выше.

В рамках рассматриваемой нами модели, источником кислорода может быть только вода, которая диссоциирует при высоких температурах, образуя свободный кислород, но, чтобы при низких T , когда образуется гематит, он не смог вновь соединиться с водородом, образовав воду, нужно этот водород из системы удалить. Таким образом,

возникают две задачи. Первая — сколько водорода минимально нужно удалить из системы, чтобы образовалась фаза гематита, и вторая — какой механизм может отвечать за это удаление.

Расчеты показывают, что водорода требуется удалить достаточно много. Применительно к системе, состав которой отвечает таблице, как показали наши расчеты, необходимо удалить не менее 75% от общего содержания водорода в системе. Один из результатов таких расчетов показан на рис. 5.

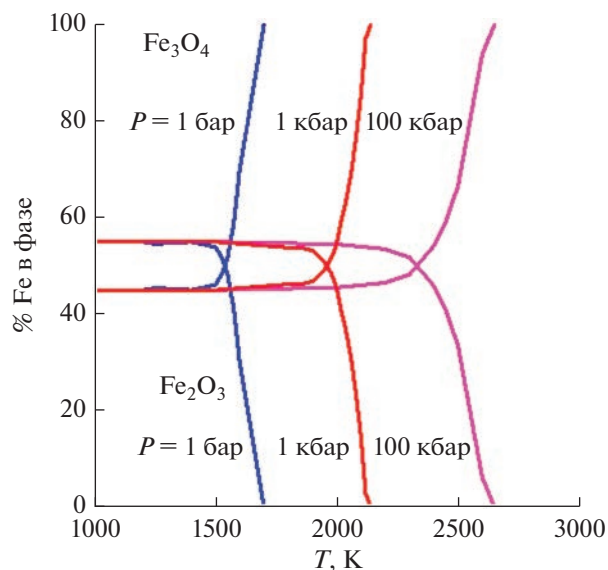


Рис. 5. Равновесное распределение железа по фазам в системе, отвечающей таблице, при условии, что из нее удалено $\sim 85\%$ H в зависимости от T и P .

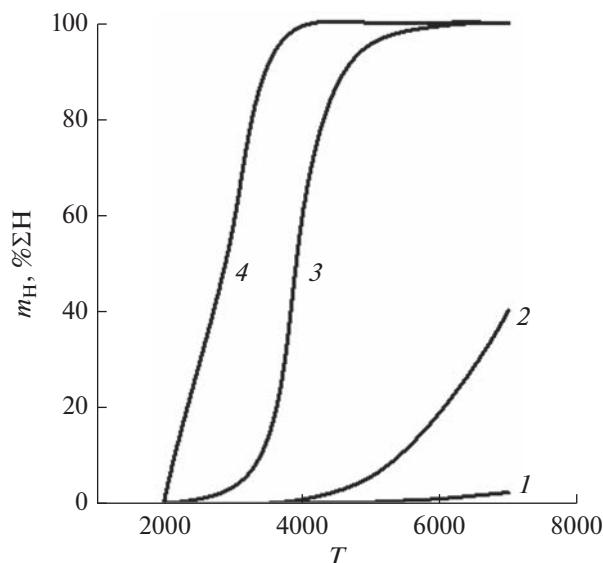


Рис. 6. Процент атомарного водорода от его общего содержания в системе, образовавшегося при диссоциации воды, в зависимости от температуры и общего давления. 1 – $P_{\text{общ}} = 100$ кбар; 2 – $P_{\text{общ}} = 1$ кбар; 3 – $P_{\text{общ}} = 1$ бар; 4 – $P_{\text{общ}} = 10^{-2}$ бар.

На рис. 5 видно, что удаление из исходной системы $\sim 85\%$ водорода приводит к тому, что при остывании образующегося в результате удара облака взрыва возникают две железосодержащие фазы – гематит и магнетит, – причем, начиная с определенной температуры ($T_{\text{стаб}}$), масса железа в гематите примерно на 10% больше, чем в магнетите. $T_{\text{стаб}}$ тем ниже, чем ниже общее давление в системе.

Что касается второй задачи – какой механизм может быть ответственным за удаление из облака взрыва значительной доли водорода, – то можно предположить, что этим механизмом может быть диссипация в открытый космос, которая будет тем интенсивнее, чем выше температура в облаке взрыва. Атомарный водород имеет минимальную из всех компонентов системы массу, а его содержание относительно общей массы водорода ($\% \Sigma H$) в достаточно широком интервале T и P весьма велико, что можно видеть из результатов, представленных на рис. 6. На этом рисунке видно, что при давлениях в системе < 1 кбар доля атомарного водорода будет превышать 50% от его общего содержания в интервале $T = 7000\text{--}4000$ К, а при $P_{\text{общ}} \leq 1$ бар при $T = 5000\text{--}4000$ К в системе будет находиться до 90% атомарного водорода от его общего содержания в системе.

Очень высокие температуры, которые наблюдались на поверхности Луны в работах по упомянутому проекту NELIOTA, – от 1000 до 7000 К при средней температуре ~ 2700 К (Avdellidou,

Vaubailon, 2019; Avdellidou и др., 2021) – это начальные, максимальные температуры в месте удара. Конечно, температура в облаке взрыва быстро падает, но при этом какая-то доля атомарного водорода имеет шансы диссипировать, что может (должно?) обеспечить накопление свободного кислорода, ответственного за образование гематита. По-видимому, возможны и другие механизмы образования гематита, например, с участием жидкой воды. Так расчеты Stopar и др. (2018) показывают, что в некоторых случаях при остывании облака взрыва может образоваться жидкая вода, и в постоянно затененных участках на глубине более 35 см она может существовать десятки лет. Эти авторы полагают, что в таких условиях возможны гидротермальные изменения и наиболее вероятны реакции с металлическим железом, фосфатами (апатит) и силикатными стеклами. Однако, очевидно, что чисто гидротермальные изменения без участия кислорода никогда не приведут к образованию гематита. Поэтому в работе Stopar и др. (2018) такая возможность не рассматривается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как следует из приведенного выше описания и анализа, ударная переработка полярного реголита приводит по крайней мере к одному заметному геохимическому эффекту – образованию нехарактерного для относительно низких селенографических широт гематита Fe_2O_3 . Конкретный механизм или механизмы его образования требуют дальнейшего изучения. Весьма вероятно, что ударная переработка полярного реголита приводит также к гидратации силикатных стекол и к образованию тяжелых углеводородов (Gerasimov и др., 2002; Stopar и др., 2018). Диссипация в открытый космос, по-видимому, образующегося в этих процессах свободного водорода должна приводить к увеличению содержания дейтерия в остающемся водороде. Возможно, лед H_2O полярного реголита содержит значительное количество тяжелой воды. Будущие исследования в полярных областях Луны, особенно с доставкой образцов на Землю, должны подтвердить или опровергнуть эти выводы и предположения.

Авторы признательны Б.А. Иванову, О.И. Яковлеву, М.В. Герасимову и Carle Pieters за помощь в этой работе.

Работа была финансово поддержана грантом Российского научного фонда № 21-17-00035: Оценка темпов экзогенного обновления поверхности Луны (для А.Т. Базилевского) и грантом Департамента образования Цзянсу, проект № 20KJD160001 (для Юань Ли).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Базилевский А.Т., Креславский М.А., Дорофеева В.А., Ли Юань, Фанг ЛиГанг. Ударная переработка реголита в полярных регионах Луны // Астрон. вестн. 2022. Т. 56. № 3. С. 1–9. (Basilevsky A.T., Kreslavsky M.A., Dorofeeva V.A., Li Yun, Fang LiGang. Impact-caused regolith reworking within polar regions of the Moon // Sol. Syst. Res. 2022. V. 56. № 3. P. 155–163. <https://doi.org/10.1134/S0038094622030017>) <https://doi.org/10.31857/S0320930X2203001X>
- Глушко В.П., Гурвич Л.В., Вейц И.В., Медведев В.А., Хачкурузов Г.А. и др. (1–4 том). Иорши В.С., Аристова Н.М., Бергман Г.А., Горохов Л.Н., Гусаров А.В. и др. (5–6 том). Справочник “Термодинамические свойства индивидуальных веществ” в 6 томах. Изд. “Наука”, Москва, 1978–2004 гг.
- Демидова С.И., Назаров М.А., Лоренц К.А., Курат Г., Брандштеттер Ф., Нтафлос Т. Химический состав лунных метеоритов и вещества лунной коры // Петрология. 2007. Т. 15. № 4. 416–437.
- Дьячкова М.В., Митрофанов И.Г., Санин А.Б., Литвак М.Л., Третьяков В.И. Характеристика мест посадки космического аппарата Луна-25 // Астрон. вестн. 2021. Т. 55. № 6. С. 522–541. (Djachkova M.V., Mitrofanov I.G., Sanin A.B., Litvak M.L., Tretyakov V.I. Characterization of the Luna-25 landing sites // Sol. Syst. Res. 2021. V. 55. Iss. 6. P. 509–528. <https://doi.org/10.1134/S0038094621060034>) <https://doi.org/10.31857/S0320930X21060037>
- Ефанов В.В., Долгополов В.П. Луна. От исследования к освоению (к 50-летию космических аппаратов “Луна-9” и “Луна-10”) // Вестн. НПО им. С.А. Лавочкина. 2016. Т. 4 (34). С. 3–8.
- Митрофанов И.Г., Зеленый Л.М. Об освоении Луны. Планы и ближайшие перспективы // Земля и Вселенная. 2019. № 4. С. 16–37.
- Митрофанов И.Г., Зеленый Л.М., Третьяков В.И., Калашников Д.В. Луна-25: первая полярная миссия на Луну // Астрон. вестн. 2021. Т. 55. № 6. С. 497–508. doi: (Mitrofanov I.G., Zelenyi L.M., Kalashnikov D.V. Luna-25: The first polar mission to the Moon // Sol. Syst. Res. 2021. V. 55. Iss. 6. 485–495. <https://doi.org/10.1134/S0038094621060095>) <https://doi.org/10.31857/S0320930X21060098>
- Arthemis Plan. NASA’s Lunar Exploration Program Overview. September 2020. 73 p.
- Avdellidou C., Munaibari E., Larson R., Vaubaillon J., Delbo M., Hayne P., Wiczorek M., Sheward D., Cook A. Impacts on the Moon: Analysis methods and size distribution of impactors // Planet. and Space Sci. 2021. V. 200. id. 105201. P. 1–22.
- Avdellidou C., Vaubaillon J. Temperatures of lunar impact flashes: Mass and size distribution of small impactors hitting the Moon // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 2019. V. 484. P. 5212–5222.
- Colaprete A., Schultz P., Heldmann J., Wooden D., Shirley M., and 12 co-authors. Detection of water in the LCROSS ejecta plume // Science. 2010. V. 330. P. 463–468.
- Dong C., Green J.L., Wang L., Draper D.S., Lingam M., Liu N., Boardsen S.A. Moon’s polar ice and hematite: A consequence of ancient lunar dynamo // 52nd Lunar and Planet. Sci. Conf. 2021. Abstract 1790.
- Gerasimov M.V., Dikov Yu.P., Yakovlev O.I., Wlotzka F. Experimental investigation of the role of water in impact vaporization chemistry // Deep-Sea Res. 2002. V. 49. P. 995–1009.
- Green R.O., Pieters C., Mouroulis P., Eastwood M., Boardman J., and 49 co-authors. The Moon Mineralogy Mapper (M3) imaging spectrometer for lunar science: Instrument description, calibration, on-orbit measurements, science data calibration and on-orbit validation // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. E00G19.
- Head J., Pieters C., Scott D., Ivanov M., Krasilnikov S., and 8 co-authors. Geologic context for lunar south circum-polar region exploration: Implications for goals, site selection and operations strategy // Twelfth Moscow Solar System Symp. 2021. Abstract 12MS3-MN-03.
- Ivanov M.A., Hiesinger H., Abdrakhimov A.M., Basilevsky A.T., Head J.W., Pasckert J.-H., Bauch K., van der Bogert C.H., Gläser P., Kohanov A. Landing site selection for Luna-Glob mission in crater Boguslawsky // Planet. and Space Sci. 2015. V. 117. P. 45–63.
- Ivanov M.A., Abdrakhimov A.M., Basilevsky A.T., Demidov N.E., Guseva E.N., Head J.W., Hiesinger H., Kohanov A.A., Krasilnikov S.S. Geological characterization of the three high-priority landing sites for the Luna-Glob mission // Planet. and Space Sci. 2018. V. 162. P. 190–206.
- Le Feuvre M., Wiczorek M.A. Nonuniform cratering of the terrestrial planets // Icarus. 2008. V. 197. P. 291–306.
- Li S., Lucey P.G., Fraeman A.A., Poppe A.R., Sun V.Z., Hurley D.M., Schultz P.H. Widespread hematite at high latitudes on the Moon // Sci. Adv. 2020. V. 6. Iss. 36. doi: [org/10.1126/sciadv. aba1940](https://doi.org/10.1126/sciadv.aba1940)
- Litvak M.L., Mitrofanov I.G., Sanin A., Malakhov A., Boynton W.V., and 15 co-authors. Global maps of lunar neutron fluxes from the LEND instrument // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. E00H22.
- Lodders K., Fegley B., Jr. The Planetary Scientist’s Companion. New York. Oxford: Oxford Univ. Press, 1998. 371 p.
- McKay D.S., Heiken G., Basu A., Blanford G., Simon S., Reedy R., French B.M., Papike J. The lunar regolith // Lunar Source Book. Cambridge Univ. Press, 1991. P. 285–356.
- Melosh H.J. Planetary Surface Processes. Cambridge Univ. Press, 2011. 500 p.
- Stopar J.D., Jolliff B.L., Speyerer E.J., Asphaug E.I., Robinson M.S. Potential impact-induced water-solid reactions on the Moon // Planet. and Space Sci. 2018. V. 162. P. 157–169.
- Werner S.C., Ivanov B.A. Exogenic dynamics, cratering, and surface ages // Treatise on Geophysics. Second Edition. 2015. P. 327–365.
- Xu Lin, Pei Zhaoyu, Zou Yongliao, Wang Chi. China’s Lunar and Deep Space Exploration Program for the next decade (2020–2030) // Chinese J. Space Sci. 2020. V. 40. № 5. P. 615–617.