

ИМПЛАНТАЦИЯ ГЕЛИЯ И ЕГО КОНЦЕНТРАЦИЯ В МИНЕРАЛАХ И ЧАСТИЦАХ ЛУННОГО РЕГОЛИТА

© 2013 г. Е. Н. Слюта*, О. И. Яковлев*, С. А. Воропаев*, А. В. Дубровский**

*Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН,
119991 ГСП-1 Москва, ул. Косыгина, 19
e-mail: slyuta@geokhi.ru

**Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН,
119991 Москва, Ленинский просп., 49

Поступила в редакцию 24.10.2011 г.
Принята к печати 10.05.2012 г.

Солнечно-ветровая эрозия пород на поверхности Луны и имплантация частиц солнечного ветра в минералы лунного реголита являются одними из основных процессов космического выветривания. В результате последнего процесса происходит накопление инертных газов в минеральных частицах лунного реголита. Приведенный в статье обзор опубликованных данных показывает, что в зависимости от состава и структуры частиц вариации концентрации имплантированного гелия в разных минералах составляют три-четыре порядка. Толщина радиационно-индуцированной аморфной пленки на минералах в большей степени зависит от дозы ионов, чем от их энергии. Самым низким коэффициентом имплантации гелия характеризуются частицы с аморфной структурой (стекло). Очень низкий коэффициент имплантации также был получен в эксперименте по имплантации гелия в стекло (обсидиан).

Ключевые слова: реголит Луны, космическое выветривание, ионизирующее облучение, имплантация гелия, имплантация протонов.

DOI: 10.7868/S0016752513120091

ВВЕДЕНИЕ

Солнечный ветер образуется при газодинамическом расширении солнечной короны в межпланетное пространство и представляет собой непрерывный поток полностью ионизованной плазмы, состоящей в основном из электронов и протонов примерно одинаковой плотности [1–3]. 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. С удалением от Солнца скорость солнечного ветра возрастает, а плотность его потока уменьшается. На орбите Земли его скорость равна 400–500 км с⁻¹. Концентрация протонов (или электронов) составляет 10–20 частиц в кубическом сантиметре, а их температура равна примерно 100000 К. Физические характеристики солнечного ветра вблизи орбиты Земли зависят от многих параметров и меняются в зависимости от уровня солнечной активности и конкретной ситуации на Солнце. В соответствии с гидродинамической моделью распространения

солнечного ветра [1, 4] скорость любых ионов одна и та же. Энергия ионов зависит от массы ядра и описывается единицами Wp /нуклон (эВ/нуклон), где Wp энергия протонов. Соответственно, при одинаковой скорости ионов кинетическая энергия ядер гелия в 4 раза больше энергии протонов. Обычная энергия протонов на расстоянии земной орбиты от Солнца меняется в пределах 0.3–3 кэВ, достигая во время солнечных вспышек 100 кэВ и более.

Облучение компонентами солнечного ветра и имплантация ионов солнечного ветра в минералы лунного реголита являются одними из основных процессов космического выветривания вещества поверхности Луны. Лунный реголит состоит из фрагментов первичных, коренных пород и вторичных частиц, сформированных в процессе метеоритной бомбардировки – брекчий, агглютинатов, частиц стекла. Основными пороодообразующими минералами лунных пород и, соответственно, реголита, являются плагиоклаз (анортит, битовнит), оливин, ортопироксен и клинопироксен. В качестве главного рудного минерала обычно присутствует ильменит, содержание которого в реголите

морских базальтов может достигать 20%. В значительном количестве в реголите присутствует стекло преимущественно ударного происхождения. Химический состав реголита определяется в основном составом коренных пород конкретного района Луны, а также привнесом вещества из других районов и добавлением метеоритного вещества (до 1–2 мас. %). Реголит может быть обеднен летучими компонентами в результате ударного плавления и селективного испарения вещества. 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 составляет примерно 1.5 мм за 1 млн лет [5]. Средняя мощность рыхлого реголита в морских районах Луны составляет около 5 м, в материковых районах около 9 м.

В зависимости от механизма удержания инертных газов солнечного ветра в лунном реголите выделяется два основных типа газов — насыщающие поровое пространство между частицами лунного реголита (слабо связанные) и атомы, имплантированные в частицы лунного реголита. Содержание слабосвязанных инертных газов в лунном реголите определяется двумя параметрами — дегазацией, которая зависит от температуры поверхности и концентрации насыщения реголита при данной температуре, и плотностью потока солнечного ветра, который зависит от географической долготы и широты. Разница между максимальным и минимальным значением плотности потока на поверхности Луны незначительна и составляет около половины порядка [6]. Слабосвязанные газы легко выделяются при температурных и механических воздействиях на лунный реголит и их накопление в лунном реголите в значительной степени зависит от температуры поверхности и не зависит от состава реголита. Содержание этого типа газов должно существенно возрастать в высоких широтах, характеризующихся низкой дневной температурой и минимальной амплитудой суточного хода температур.

В отличие от слабосвязанных газов концентрация имплантированных газов зависит от химического и минерального состава частиц, от степени зрелости реголита (степени радиационной дефектности кристаллической решетки минерала) и от размеров частиц [7–9]. Поток заряженных частиц солнечного ветра не только разрушает кристаллическую структуру, но и изменяет химический состав поверхностного слоя минералов [10]. В зависимости от состава и структуры частиц реголита концентрация имплантированного гелия в ударном или вулканическом стекле и в главных пороодообразующих минералах может варь-

ровать до трех порядков и более. Известно, что более выраженные и более многочисленные дефекты кристаллической решетки связывают (адсорбируют) внедренные атомы гелия значительно эффективнее и сильнее, чем дефекты аморфной ионной сетки (аморфного стекла) [11]. Количество и разнообразие типов дефектов кристаллической решетки минерала зависит от химического состава минерала и его кристаллической структуры. Энергия связи захваченного атома гелия в таких ловушках-вакансиях кристаллической решетки достигает 1 эВ и более и зависит от типа дефекта, занимаемого химически нейтральным атомом гелия [12]. Также наблюдается зависимость температуры выделения имплантированного гелия из оливина и ильменита в зависимости от величины пузырей имплантированного газа в минералах. Из маленьких пузырьков газ выделяется при температурах 400–600°C, а из больших при температурах 800–1200°C [13]. Предполагается, что радиационно-индуцированное разрушение кристаллической решетки минерала и аморфизация поверхности кристаллов может блокировать образование и развитие радиационных дефектов в кристаллической решетке минерала, что, соответственно, должно приводить к снижению концентрации имплантированных благородных газов в кристаллической фазе. Таким образом, исследование концентрации захваченных газов в зависимости от состава и структуры минералов связано, прежде всего, с исследованием аморфизации поверхности кристаллической фазы минералов в зависимости от состава и глубины имплантации ионов солнечного ветра (протоны, альфа-частицы), от энергии частиц и дозы ионизирующего облучения, и наконец, от состава и структуры минералов. Следует отметить, что до настоящего времени весь этот комплекс вопросов, определяющий задачу данного исследования, почти не изучался. Поэтому в данной работе в качестве одной из важнейших составляющих приведен литературный обзор по данной проблеме. В статье также приведены базовые теоретические расчеты и рассмотрены методики и результаты первого эксперимента по имплантации гелия, основной задачей которого на данном этапе была отработка необходимой методики облучения, анализа и обработки результатов.

Избирательное обогащение ионами солнечного ветра в зависимости от минералогического состава приводит к неоднородному региональному распределению концентрации изотопов гелия и других инертных газов в лунном реголите. Особый интерес к содержанию гелия в реголите Луны был инициирован работами Л. Виттенберга и др. [14], Дж. Калсинского и др. [15] и Э.М. Галимова [16] в связи с использованием изотопа ^3He в термоядерной энергетике. Изучение основных закономерностей в распределении имплантирован-

ных благородных газов и, в частности, изотопов гелия, а также оценка их концентрации и запасов [17–20], является самостоятельной и отдельной задачей, которая в данной работе не рассматривается.

КОНЦЕНТРАЦИЯ ИМПЛАНТИРОВАННОГО ГЕЛИЯ В СТЕКЛАХ И В ГЛАВНЫХ ПОРОДООБРАЗУЮЩИХ И РУДНЫХ МИНЕРАЛАХ ЛУННОГО РЕГОЛИТА

Содержание имплантированного гелия в значительной степени зависит от состава и структуры минеральных частиц реголита и может изменяться в очень широком диапазоне — до трех порядков и более. Самыми низкими концентрациями благородных газов характеризуются ударные и вулканические стекла. Например, в зеленых стеклянных шариках с места посадки “Аполлон-15” концентрация гелия-3 находится в пределах $0.02\text{--}0.3\text{ мг т}^{-1}$ (в среднем по всем размерным фракциям около 0.2 мг т^{-1}), а гелия-4 в пределах $7\text{--}605\text{ мг т}^{-1}$ (в среднем по всем размерным фракциям $100\text{--}200\text{ мг т}^{-1}$) [21–23]. Это примерно в 100 раз меньше, чем содержание этих же изотопов в валовом составе реголита.

Аналогичные низкие концентрации имплантированного гелия в кристаллических минералах лунного реголита наблюдаются только в плагиоклазе (битовните), в котором содержание ^3He в зависимости от размерной фракции меняется в пределах от 0.02 до 0.2 мг т^{-1} , а ^4He от 33 до 500 мг т^{-1} [23, 24]. Для всех кристаллических минералов лунного реголита, включая плагиоклаз, наблюдается сильная обратная пропорциональная зависимость концентрации гелия от размера частиц — чем меньше размер, тем больше концентрация [7, 9, 23]. Данная закономерность легко объяснима: с уменьшением размера частиц увеличивается отношение площади поверхности к объему частицы. Для зеленых стекол, напротив, наблюдается, хотя и не столь выраженная, но прямая пропорциональная зависимость — чем меньше размер частиц, тем меньше концентрация гелия [21, 23]. По-видимому, такая зависимость может быть связана с увеличением количества включений породообразующих и рудных минералов в частицах стекол большего размера. Например, в так называемых магнитных стеклах, отличающихся большим количеством таких включений, концентрация гелия значительно возрастает по сравнению с относительно чистыми зелеными стеклянными шариками [24].

Самые высокие концентрации имплантированного гелия наблюдаются в ильмените, который является главным рудным минералом в морских лунных базальтах и содержание которого колеблется от $0.5\text{--}1\%$ (низкотитанистые базальты) до $10\text{--}20\%$ (высокотитанистые базальты). Мето-

дом последовательного травления поверхности частиц ильменита было установлено, что практически почти весь захваченный гелий и другие благородные газы концентрируются в поверхностном слое толщиной 200 нм [8]. В зернах ильменита размером $10\text{--}14\text{ мкм}$ содержание ^3He может достигать 130 мг т^{-1} , а ^4He — 360 г т^{-1} [9]. Содержание изотопов гелия в валовом составе реголита в этой же размерной фракции в месте посадки “Аполлон-12” составляет 12 мг т^{-1} и 30 г т^{-1} соответственно. Содержание ^3He в общем валовом составе реголита без разделения на размерные фракции почти в два раза меньше и составляет 7.1 мг т^{-1} , а ^4He — 16.5 г т^{-1} .

Содержание ^3He в оливине с размером зерен $25\text{--}42\text{ мкм}$ составляет 2.9 мг т^{-1} , а ^4He — 6.24 г т^{-1} [22]. В смешанной фракции зерен оливина и пироксена с размером зерен $25\text{--}42\text{ мкм}$ содержание изотопов гелия аналогичное — 2.9 мг т^{-1} и 6.2 г т^{-1} соответственно [23]. Тем не менее, чистая фракция пироксена с примерно аналогичным размером зерен $30\text{--}48\text{ мкм}$ содержит имплантированного гелия в два раза больше (5.7 мг т^{-1} ^3He и 13.4 г т^{-1} ^4He), чем оливин [24].

Таким образом, если содержание гелия в стеклах и плагиоклазах лунного реголита примерно в 100 раз меньше среднего содержания гелия в валовом составе реголита, то содержание гелия в ильмените, напротив, примерно в $10\text{--}12$ раз больше, чем содержание гелия в валовом составе реголита аналогичной размерной фракции и в 20 раз больше по сравнению с валовым составом реголита без разделения на фракции. Породообразующие минералы лунного реголита оливин и пироксен по содержанию гелия занимают промежуточное положение между стеклами и ильменитом. Очевидно, что при равных условиях облучения, в которых зерна ильменита находились вместе с другими минералами реголита, эту разницу в концентрации можно объяснить только зависимостью механизмов захвата имплантированных инертных газов от состава минерала и его структуры, а именно, от разнообразия и количества дефектов-ловушек кристаллической решетки минерала.

АМОРФИЗАЦИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ФАЗЫ МИНЕРАЛОВ И ГЛУБИНА ИМПЛАНТАЦИИ H^+ И $^4\text{He}^+$

При облучении минералов протонами и ионами солнечного ветра происходит разрушение кристаллической структуры минерала и на его поверхности образуется аморфная пленка [25]. При этом наблюдается два основных типа аморфной пленки. Достаточно широко распространены пленки, которые образовались в результате конденсации испаренного вещества лунных пород при микрометеоритных и метеоритных ударах [25]. Это подтверждается экспериментальными

исследованиями, результаты которых во многом согласуются с наблюдаемыми данными [26]. Но большинство аморфных пленок на частицах реголита, по-видимому, образовалось в результате облучения ионами солнечного ветра [25, 27]. Обычная толщина радиационной аморфной пленки не превышает 100–200 нм. Часто тонкие конденсатные пленки наблюдаются поверх более толстых радиационно-индуцированных пленок [28]. Если состав конденсатной пленки не зависит от состава минерала и обычно представлен несовместимыми с минералом-хозяином элементами, то радиационная аморфная пленка, хотя и с определенными изменениями, наследует основной состав минерала-хозяина. Например, в составе аморфной радиационной пленки с высоким содержанием радиационных треков ($\sim 1 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$) на поверхности лунного плагиоклаза (анортита) присутствовали все основные элементы минерала хозяина (Ca, Al, Si и O), но в другой относительной концентрации [25]. Состав аморфной радиационной пленки оказался обедненным Al примерно на 50%, а Ca на 80%. При этом наблюдался избыток кислорода, достигавший 12%. Состав радиационно-индуцированной аморфной пленки на кристаллах кристобалита в отличие от других порообразующих и рудных минералов практически не отличается от кристаллической фазы минерала-хозяина [25]. Отношение Si/O сохраняется таким же, как и в кристаллической фазе, и избытка кислорода, как в плагиоклазе, не наблюдается.

При облучении зерен ильменита солнечным ветром на поверхности кристалла в отличие от силикатов и алюмосиликатов образуется слой не с аморфной, а с микрокристаллической структурой [27], в которой сохраняются и продолжают развиваться радиационные дефекты кристаллической решетки. Аморфизация кристаллической структуры ильменита начинается при энергиях ионов около 120 кэВ [29], что примерно на порядок выше, чем для силикатов и алюмосиликатов [30]. В отличие от порообразующих силикатных минералов диэлектриков, ильменит отличается электропроводящими свойствами, так как является полупроводником с дырочной проводимостью. Предполагается, что именно электропроводящие свойства минерала при взаимодействии с заряженными частицами солнечного ветра позволяют сохранять свою кристаллическую структуру [6]. Как и в радиационно-индуцированных аморфных пленках силикатов и алюмосиликатов, состав радиационно-индуцированной микрокристаллической пленки ильменита также изменяется. В нижней части слоя, на границе с неизменной фазой минерала, наблюдается некоторое обеднение железом, а в верхней части, напротив, значительное его обогащение по сравнению с минералом-хозяином [29]. При этом железо в слое находится преимущественно уже в

восстановленном металлическом состоянии. Титан в микрокристаллическом слое также меняет свою валентность с Ti^{+4} до Ti^{+3} и Ti^{+2} . Наблюдается также резкое (в 2–3 раза) уменьшение отношений O/Fe и O/Ti, что говорит о существенной потере кислорода в радиационной пленке ильменита в результате его «распыления» (так называемый sputtering-процесс) при разрушении ионами связей кристаллической решетки. В отличие от ильменита состав радиационно-индуцированной аморфной пленки на поверхности ортопироксена характеризуется излишками кислорода (около 15%) [25]. При этом соотношение Si/O в пленке сохраняется таким же, как и в кристаллической фазе.

Для изучения степени аморфизации поверхности кристаллов минералов (кварца и анортита) в зависимости от компоненты солнечного ветра (протоны, ядра гелия), а также от энергии и дозы облучения были проведены расчеты с помощью программы SRIM2010 [31]. Минералы кварц и анортит были отобраны для сравнительного анализа не случайно. Кварц в модификации кристобалита и тридимита, как и анортит, также присутствует в лунном реголите, хотя и в очень незначительном количестве в качестве аксессуарного минерала. По сравнению с другими силикатами и алюмосиликатами кварц отличается самым простым составом и структурой, что очень важно для сравнительного анализа. А с учетом доступности химически чистых синтетических образцов кварца для экспериментов минерал является практически незаменимым исходным образцом не только для отработки методики эксперимента, но и для сравнительного теоретического и экспериментального анализа относительно других порообразующих минералов (силикатов и алюмосиликатов) лунного реголита. Анортит, напротив, является одним из самых распространенных порообразующих минералов лунной материковой коры, в отдельных образцах которой содержание минерала может достигать 99%.

Как показано на рис. 1, по данным проведенных расчетов глубина имплантации зависит от энергии облучения, от массы облучающих заряженных частиц и от состава мишени. Основными физическими величинами, характеризующими прохождение заряженных частиц, являются потери энергии $-dE/dx$ на единицу пути и полный пробег ионов в веществе. Основные потери энергии происходят за счет ионизации и возбуждения электронов атомов вещества мишени. Ионизационные потери энергии частиц описываются формулой Бора [32]:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{2\pi z^3 e^4 n M}{Em} \ln \frac{2mE}{\hbar \omega M},$$

где m — масса электрона, z — заряд иона, e — заряд электрона, n — концентрация электронов в веще-

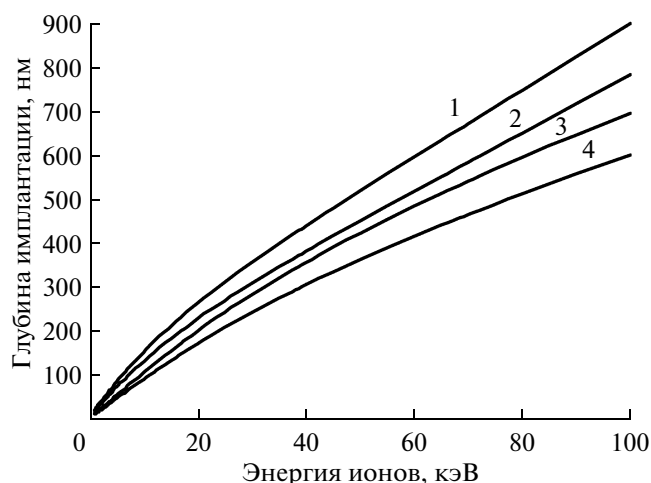


Рис. 1. Зависимость глубины имплантации протонов и ионов гелия в кварц и анортит от энергии ионов, рассчитанная по программе SRIM2010 [31]. 1 — имплантация протонов в кварц; 2 — имплантация протонов в анортит; 3 — имплантация ядер гелия в кварц; 4 — имплантация ядер гелия в анортит.

стве мишени, E — энергия ионов, M — масса ионов, $\hbar$ — постоянная Планка, ω — средняя частота обращения электронов вещества по их атомных орбитам. Можно видеть, что в соответствии с зависимостью Бора, чем больше энергия ионов, тем меньше потери E и, напротив, чем больше масса иона M , тем больше потери E и, соответственно, меньше пробег иона (глубина имплантации). Кроме того, чем “сложнее” состав минерала-мишени (молекулярный вес и плотность минерала), тем выше концентрация электронов и тем больше потери энергии.

Если глубина имплантации протонов и ионов гелия определяется, прежде всего, их энергией, то глубина и степень аморфизации гораздо в большей степени зависит от плотности потока или дозы ионов. Например, если при дозе протонов 1×10^{15} атом см^{-2} глубина имплантации опережает развитие и глубину аморфизации, то при дозе облучения около 1.6×10^{17} атом см^{-2} имплантация протонов фактически локализуется внутри уже хорошо развитого аморфного слоя [30]. Полная (100%) аморфизация поверхности кварца развивается при дозах, превышающих 8×10^{16} атом см^{-2} . Уже при дозе 1.6×10^{17} атом см^{-2} толщина аморфного слоя на поверхности *кварца* достигает 100 нм [30]. Максимальная экспериментальная доза, при которой происходит насыщение поверхности образцов кварца протонами H^+ , оценивается как 5×10^{16} атом см^{-2} [33]. Наблюдаемая концентрация насыщения ^4He на поверхности зерен лунного реголита соответствует интегральному потоку солнечного ветра 7×10^{17} атом см^{-2} [7]. Такая доза облучения накоп-

ливается за время экспозиции около 300 лет при современной интенсивности потока солнечного ветра. Возраст экспозиции лунного реголита по данным индекса зрелости лунного реголита оценивается в 200 млн лет [34]. Иногда возраст экспозиции лунного реголита превышает это значение почти в два раза. Например, средний возраст экспозиции слоев реголита, захороненных на глубине более 62 см в месте посадки “Аполлон-17” в долине Таурус-Литров, оценивается в $550 \pm \pm 60$ млн лет [35]. Таким образом, доза облучения минералов и частиц реголита протонами превышает дозу насыщения. Это означает, что все связанные с имплантацией протонов умеренных энергий (в пределах нескольких кэВ) химические и физические процессы космического выветривания реголитовых частиц анортита и кварца будут происходить внутри сформированной на поверхности кристалла радиационно-индуцированной аморфной пленки, не достигая кристаллической структуры минерала.

В отличие от облучения протонами, толщина аморфного слоя при облучении ядрами гелия даже при высокой дозе всегда совпадает с максимальной глубиной имплантации He^+ [30]. Соответственно, основная концентрация ионов He^+ , в том числе и изотопа $^3\text{He}^+$, и в анортите и в кварце должна накапливаться в переходной зоне между аморфной и кристаллической фазой минерала. Следует также отметить, что хотя глубина имплантации протонов больше, чем ядер гелия, толщина аморфного слоя при облучении гелием оказалась примерно в два раза больше, чем при облучении протонами [30]. Это объясняется тем, что сечение неупругого взаимодействия гелия с атомами решетки примерно в 2 раза больше, чем аналогичное сечение для протонов при той же скорости. Это подтверждается и другими экспериментальными данными. Например, при облучении оливина протонами с энергией 1 кэВ толщина образованной аморфной пленки составляла около 25 нм, а при облучении оливина ионами гелия с энергией 4 кэВ (при той же скорости кинетическая энергия ионов гелия в солнечном ветре в 4 раза больше) толщина пленки уже равнялась 50 нм [36].

ЗАДАЧИ, МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ИМПЛАНТАЦИИ ГЕЛИЯ

Одна из основных задач эксперимента на данном этапе наших исследований заключалась в разработке методики определения сравнительного коэффициента имплантации (захвата) ионов в земных аналогах породообразующих и рудных минералах Луны. В качестве материала мишеней в первой серии экспериментов был выбран обсидиан — порода (стекло) с аморфной структурой. Как было рассмотрено выше, стекло в лунном реголите

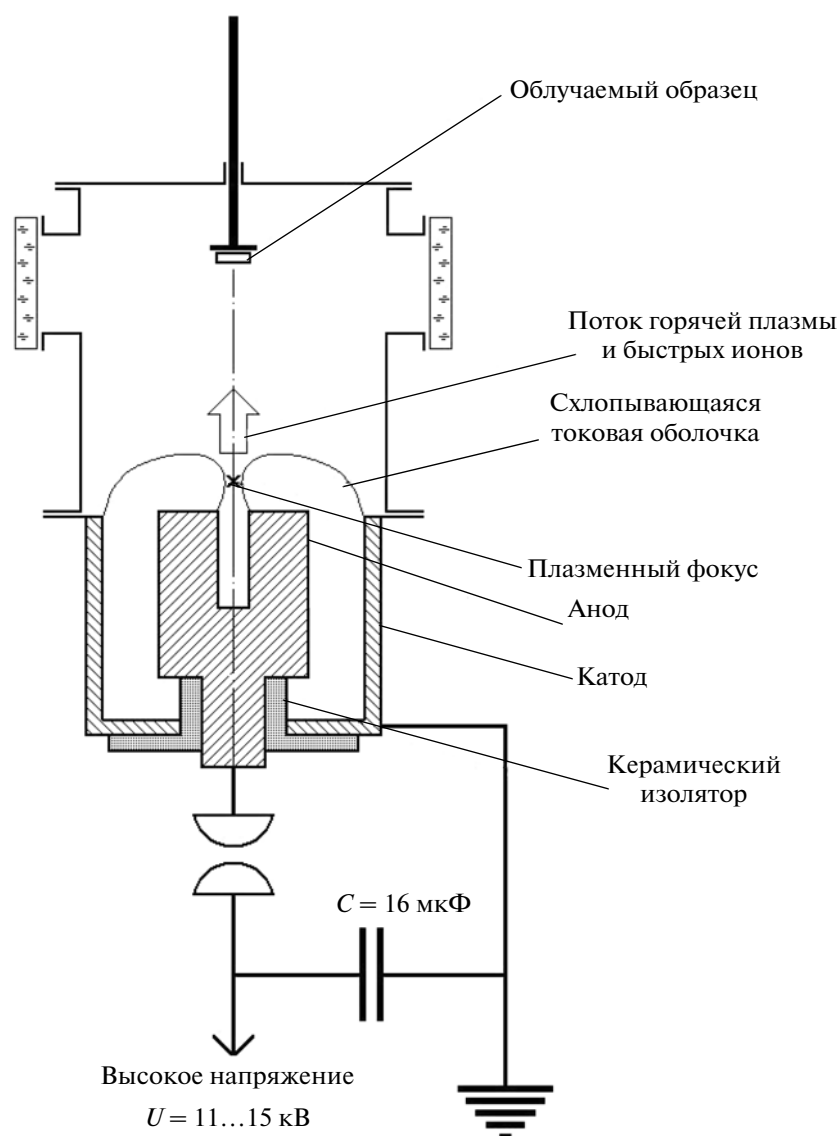


Рис. 2. Принципиальная схема экспериментальной установки ПФ-5М.

характеризуется самой минимальной концентрацией имплантированного гелия и, соответственно, самым низким коэффициентом имплантации, который зависит, прежде всего, от аморфной структуры стекла, а не от его состава. Поэтому не имеет значения, что земной обсидиан отличается по составу от лунных стекол, главное, что он аналогичен им по своей аморфной структуре. Образцы выпиливались в форме кубиков размером $5 \times 5 \times 5 \text{ мм}$. Всего было подготовлено 7 образцов.

Эксперименты по облучению образцов проводились на установке “плазменный фокус” ПФ-5М (ИМЕТ РАН) энергосодержанием в 5 кДж с использованием гелия в качестве рабочего газа. Эта установка представляет собой двухэлектрод-

ный электроразрядный прибор, в котором наблюдается явление “нецилиндрический Z-пинч” [37]. Принципиальная схема установки ПФ-5М представлены на рис. 2. Характерной особенностью установок данного типа является образование в процессе высоковольтного разряда вблизи анода вакуумной камеры сгустка плотной ($\leq 10^{19}$ частиц см^{-3}) горячей ($\leq 1 \text{ кэВ}$) плазмы, который движется в сторону катода со скоростью порядка 10^7 см с^{-1} и со средней кинетической энергией ионов (в нашем случае ионов гелия) $\sim 1 \text{ кэВ}$. По мере продвижения плазмы вдоль оси разрядной камеры ее температура снижается, а плотность — уменьшается. При этом практически сохраняется продольный размер

Результаты измерений количества имплантированного гелия в поверхностном слое образцов обсидиана

№ образца	Число импульсов облучения	Время экспозиции (t), мкс	Масса, г	Концентрация ^4He , 10^{11} атом г^{-1}	Концентрация ^4He , 10^{11} атом см^{-2}
1	Необлученный образец	0	0.406	5 ± 0.85	8 ± 1.1
2	10	0.3	0.412	5.9 ± 1.0	9.6 ± 1.4
3	20	0.6	0.490	7.35 ± 0.95	14 ± 1.4
4	30	0.9	0.439	6.95 ± 1.4	12 ± 1.9
5	40	1.2	0.473	12.3 ± 1.3	23.2 ± 2
11	9	0.27	0.411	10.4 ± 1.0	17.2 ± 1.4
12	20	0.6	0.403	4.9 ± 1.5	8 ± 2

Примечание: образцы № 11 и 12 с полированной гранью.

сгустка (~ 1 см) и его скорость. Таким образом, поверхность образца, расположенного на пути плазменного сгустка, подвергается кратковременному импульсному воздействию горячей плазмы (для установки ПФ-5М время импульса — 0.03 мкс), причем величина энергии взаимодействия плазмы с поверхностью мишени сильно зависит от расстояния, пройденного сгустком с момента его образования. В эксперименте расстояние от анода установки до мишени было увеличено (оно составило 30 см), а зарядное напряжение — уменьшено до величины 11 кВ, что соответствует ее энергосодержанию в 970 Дж. При таких параметрах облучения образцов гелиевой плазмой температура тонкого поверхностного слоя мишени не превышала 100°C , что примерно соответствует условиям воздействия на мишень солнечного ветра на расстоянии земной орбиты.

Образцы обсидиана закреплялись в держателе внутри вакуумной камеры установки ПФ-5М так, что основному облучению подвергалась грань, направленная на анод плазменной установки. Таким образом, площадь облучения S соответствовала площади одной грани образца и равнялась 0.25 см^2 . Количество импульсов облучения варьировалось от 0 (необлученный, контрольный образец) до 40. Максимальное суммарное время облучения составляло $t = 1.2$ мкс. Один образец в качестве контрольного облучению не подвергался. Остальные 6 образцов подверглись облучению с различным количеством импульсов (от 9 до 40) и временем экспозиции (от 0.27 до 1.2 мкс).

Анализ количества имплантированного гелия в образцах проводился на двулучевом магнитном резонансном масс-спектрометре [38, 39] в режиме низкого разрешения в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе (г. Санкт-Петербург). Облученные образцы помещались в сбрасывающее устройство металлической вакуумной низкофоновой экстракционной установки, включенной в линию с масс-спектрометром. Система содержит блок поглотителей (геттеров), нейтральных к ге-

лию и активных к химически активным компонентам, которые выделяются из образцов вместе с гелием. Температура экстракции, при которой образцы обсидиана плавилась, составляла 1200°C , а время нагрева образцов — 30 минут.

Гелий, выделявшийся в объеме экстрактора из образца при его нагревании, имеет разную природу. Это имплантированный гелий, захваченный обсидианом при облучении его в плазменной установке, и фоновый гелий, представленный тремя разными источниками: а) “память” экстрактора от проведенных ранее опытов; б) гелий, образовавшийся в обсидиане из-за распада природного урана и тория; в) гелий, захваченный из окружающей среды при формировании обсидиана [40]. Поскольку все кубические образцы для облучения выпиливались из одного куска обсидиана, то можно считать, что концентрация фонового гелия является примерно постоянной во всех образцах и равна концентрации гелия, измеренного в контрольном образце, который не облучался (таблица). Изменение концентрации гелия в зависимости от времени экспозиции может быть представлено в виде [40]

$$\text{He}_{\text{общ}} = \text{He}_{\text{фон}} + \text{He}_{\text{импл}} t, \quad (1)$$

где $\text{He}_{\text{общ}}$ — концентрация гелия в образце, $\text{He}_{\text{фон}}$ — концентрация фонового гелия (атом см^{-2}), $\text{He}_{\text{импл}}$ — плотность потока имплантированного гелия (атом $\text{см}^{-2} \text{ мкс}^{-1}$), t — время экспозиции (мкс). Анализ корреляционной зависимости, показанной на рис. 3, позволил установить параметры уравнения (1) линии регрессии: $\text{He}_{\text{фон}} = (7.4 \pm 0.94) \times 10^{11}$ атом см^{-2} и $\text{He}_{\text{импл}} = (10 \pm 1.6) \times 10^{11}$ атом $\text{см}^{-2} \text{ мкс}^{-1}$. Таким образом, плотность потока имплантированного гелия ($\text{He}_{\text{импл}}$) составила 1×10^{12} атом $\text{см}^{-2} \text{ мкс}^{-1}$ с ошибкой около 15%. Влияние полировки поверхности одной грани кубика (образцы № 11 и 12, таблица) достоверно установить не удалось из-за малого числа измерений. Соответственно, без учета влияния полировки поверхности на коэффициент имплантации

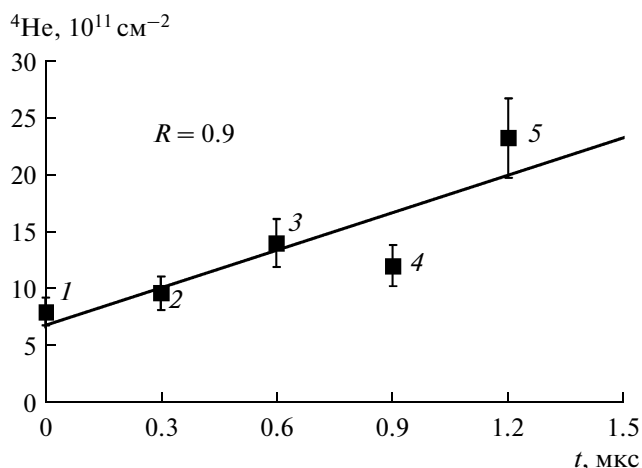


Рис. 3. Зависимость концентрации имплантированного гелия в образцах от времени экспозиции. Цифрами указаны номера образцов. Значения концентрации гелия в образцах № 11 и 12 с полированной гранью на рисунке не показаны. R — коэффициент корреляции.

смешивать эти измерения нельзя. Если формально учесть образцы с полированной гранью (образцы № 11 и 12), то величины коэффициентов в выражении (1) практически не меняются. При этом коэффициент корреляции R несколько уменьшается.

Коэффициент имплантации гелия (K) в образцы может быть получен из отношения потока имплантированного гелия $\text{He}_{\text{импл}}$ (1) к падающему (облучающему) потоку гелия, составившему в проводимом эксперименте 3.3×10^{16} атом $\text{см}^{-2} \text{ мкс}^{-1}$:

$$K = \frac{10^{12}}{3.3 \times 10^{16}} = 3 \times 10^{-5}.$$

Коэффициент имплантации гелия (K) в обсидиан при энергии ионов $E \approx 1$ кэВ и температуре образца около 100°C оказался равным 3×10^{-5} . Полученный очень низкий коэффициент имплантации в аморфный материал (обсидиановое стекло) хорошо согласуется с наблюдаемыми низкими концентрациями гелия в стеклах лунного реголита. Полученная количественная оценка коэффициента имплантации необходима как для оценки воспроизводимости результатов в дальнейшем, так и для сравнения с коэффициентами имплантации в других лунных минералах в будущих экспериментах. Следует также отметить, что относительно “мягкие” параметры облучения материала, близкие к параметрам солнечного ветра на расстоянии земной орбиты, оказались вполне достаточными для имплантации в аморфный материал количества гелия, доступного для анализа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Облучение плазмой и имплантация ионов солнечного ветра в минералы лунного реголита является одним из основных процессов геохимического выветривания пород и минералов лунного реголита. Глубина имплантации ионов зависит от энергии облучения, от массы облучающих заряженных частиц и от состава мишени. Глубина и степень аморфизации поверхности кристалла минерала зависит в большей степени от плотности потока (дозы) ионов, чем от энергии облучения. При невысокой дозе облучения глубина имплантации протонов опережает развитие и глубину аморфизации, а при плотности потока, приближающегося к величине дозы насыщения, имплантация протонов фактически локализуется внутри уже хорошо развитого аморфного слоя. Поскольку интегральная доза облучения минералов и частиц лунного реголита протонами, как правило, превышает дозу насыщения, то все связанные с имплантацией протонов химические и физические процессы космического выветривания частиц анортита и кварца в лунном реголите будут происходить внутри сформированной радиационно-индуцированной аморфной пленки на поверхности кристалла, не достигая кристаллической структуры минерала. В отличие от облучения протонами, толщина аморфного слоя при облучении ядрами гелия даже при высокой дозе всегда совпадает с максимальной глубиной имплантации He^+ . Таким образом, основная концентрация гелия, в том числе и изотопа $^3\text{He}^+$, и в анортите и в кварце даже при высокой дозе будет продолжать накапливаться в переходной зоне между аморфной и кристаллической фазой минерала.

Содержание гелия в стеклах и плагиоклазах лунного реголита примерно в 100 раз меньше среднего содержания гелия в валовом составе реголита. Содержание гелия в ильмените, напротив, в 10–12 раз больше, чем содержание гелия в валовом составе реголита аналогичной размерной фракции и в 20 раз больше по сравнению с валовым составом реголита без разделения на фракции. Породообразующие минералы лунного реголита оливин и пироксен по содержанию гелия занимают промежуточное положение между стеклами и ильменитом. При этом пироксен по сравнению с оливином содержит имплантированного гелия примерно в два раза больше.

Полученный очень низкий коэффициент имплантации в аморфный материал (обсидиановое стекло) хорошо согласуется с наблюдаемыми низкими концентрациями гелия в стеклах лунного реголита. Полученная количественная оценка коэффициента имплантации необходима как для оценки воспроизводимости результатов в дальнейшем, так и для сравнения с коэффициентами

имплантации в других лунных минералах в будущих экспериментах. Относительно “мягкие” параметры облучения материала, близкие к параметрам солнечного ветра на расстоянии земной орбиты, оказались вполне достаточными для имплантации в стекло необходимой концентрации гелия, доступной для анализа.

Авторы благодарны Э.М. Галимову за постоянное внимание и поддержку данной работы, Л.И. Иванову и В.Н. Пименову (ИМЕТ РАН) за поддержку в проведении эксперимента, а также Ануфриеву Г.С. и Болтенкову Б.С. (ФТИ РАН) за проведение анализа гелия в образцах обсидиана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Parker E.N.* Dynamics of the interplanetary gas and magnetic fields // *Astrophys. J.* 1958. V. 128. P. 664–676.
2. *Parker E.N.* The Solar Wind. New York, McGraw-Hill. 1961. 157 p.
3. *Паркер Е.Н.* Динамические процессы в межпланетной среде. М.: Мир, 1965. 175 с.
4. *Коваленко В.А.* Солнечный ветер. М.: Наука, 1983. 272 с.
5. *French B.M.* The Moon book. Harmondsworth, Middlesex, England. Penguin Books. 1977. 287 p.
6. *Шкуратов Ю.Г., Старухина Л.В., Кайдаш В.Г., Бондаренко Н.В.* Распределение содержания ^3He по видимому полушарию луны // *Астрономический Вестник*. 1999. Т. 33. № 5. С. 466–478.
7. *Eberhardt P., Geiss J., Graf H., Grogler N., Krahenbuhl U., Schwaller H., Schwarzmuller J., Stettler A.* Trapped solar wind noble gases, exposure age and K/Ar-age in Apollo 11 lunar fine material // *Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf.* 1970. P. 1037–1070.
8. *Eberhardt P., Geiss J., Graf H., Grogler N., Krahenbuhl U., Schwaller H., Schwarzmuller J., Stettler A.* Trapped Solar Wind Noble Gases, Kr81/Kr Exposure Ages and K/Ar Ages in Apollo 11 // *Lunar Material. Science*. 1970. V. 167. P. 558–560.
9. *Eberhardt P., Geiss J., Graft H., Groegler N., Mendia M.D., Moergeli, M., Schwaller H., Guggisberg S., Stettler A., Krähenbühl U., von Gunten H.R.* Trapped solar wind noble gases in Apollo 12 lunar fines 12001 and Apollo 11 breccia 10046 // *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf.* 3rd. 1972. V. 2. P. 1821–1856.
10. *Pieters C.M., Fischer E.M., Rode O., Basu A.* Optical effects of space weathering: The role of the finest fraction // *J. Geophys. Res.* 1993. V. 98. P. 20817–20824.
11. *Шерцер Б.* Развитие рельефа на поверхности вследствие имплантации ионов газов / В сб.: Распыление твердых тел ионной бомбардировкой. Вып. II. Ред. Бериш Р. М.: Мир, 1986. С. 360–469.
12. *Harris-Kuhlman K.R.* Trapping and diffusion of Helium in lunar materials. Ph.D. thesis. Fusion Technol. Inst., Wisconsin. 1998. 267 p.
13. *Futagami T., Ozima M., Nagai S., Aoki Y.* Experiments on thermal release of implanted noble gases from minerals and their implications for noble gases in lunar soil grains // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1993. V. 57. № 13. P. 3177–3194.
14. *Wittenberg L.J., Santarius J.F., Kulcinski G.L.* Lunar source of He-3 for commercial fusion power // *Fusion Technology*. 1986. V. 10. P. 167–190.
15. *Kulcinski G.L., Cameron E.N., Santarius J.F., Sviatoslavsky I.N., Wittenberg L.J., Schmitt H.H.* Fusion energy from the Moon for the twenty-first century / 2^d Conference on Lunar Bases and Space Activities of the 21st Century, NASA, Johnson Space Center. 1992. V. 2. P. 459–474.
16. *Галимов Э.М.* Проект “Луна – гелий-3”. Наука в России. 2006. № 6. С. 15–23.
17. *Тейлор Л., Калсинский Дж.* Лунный гелий-3 в термоядерной энергетике – Персидский залив XXI века // *Астрон. Вестник*. 1999. Т. 33. № 5. С. 386–394.
18. *Галимов Э.М., Ануфриев Г.С.* He-3 в лунном реголите по глубине колонки, отобранной автоматической станцией Луна-2 // *Геохимия*. 2007. Т. 214. № 3. С. 1–3.
19. *Slyuta E.N., Abdrahimov A.M., Galimov E.M.* The estimation of helium-3 probable reserves in lunar regolith // *Lunar Planet. Sci. Conf.* 38th. 2007. Abstr. #2175.
20. *Slyuta E.N., Abdrahimov A.M., Galimov E.M.* Does helium-3 abundance decrease in dependence on depth at Mare Crisium? *Lunar Planet. Sci. Conf.* 39th. 2008. Abstr. #1054.
21. *Lakatos S., Heymann D.* Green spherules from Apollo 15: Inferences about their origin from inert gas measurements // *The Moon* 7. 1973. P. 132–148.
22. *Frick U., Baur H., Funk H., Phinney D., Schäfer C., Schultz L., Signer P.* Diffusion properties of light noble gases in lunar fines // *Proc. Lunar Sci. Conf.* 4th. 1973. V. 2. P. 1987–2002.
23. *Frick U., Baur H., Ducati H., Funk H., Phinney D., Signer P.* On the origin of helium, neon, and argon isotopes in sieved mineral separates from an Apollo 15 soil // *Proc. Lunar Sci. Conf.* 6th. 1975. P. 2097–2129.
24. *Baur H., Frick U., Funk H., Schultz L., Signer P.* Thermal release of helium, neon, and argon from lunar fines and minerals // *Proc. Lunar Sci. Conf.* 3rd. 1972. V. 2. P. 1947–1966.
25. *Keller L.P., McKay D.S.* The nature and origin of rims on lunar soil grains // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1997. V. 61. № 11. P. 2331–2341.
26. *Яковлев О.И., Герасимов М.В., Диков Ю.П.* Оценка температурных условий образования НАСП- и GASP-стекло лунного реголита // *Геохимия*. 2011. № 3. С. 227–238.
27. *Bernatowicz T.J., Nichols R.H.Jr., Hohenberg C.M.* Origin of Amorphous Rims on Lunar Soil Grains // *Lunar Planet. Sci. Conf.* 25th. 1994. P. 105–106.
28. *Christoffersen R., Keller L.P., McKay D.S.* Microstructure, chemistry, and origin of grain rims on ilmenite from lunar soil finest fraction // *Meteoritics and Planetary Science*. 1996. V. 31. P. 835–848.
29. *Christoffersen R., Keller L.P., Dukes C., Rahman Z., Baragiola R.* Experimental investigation of space radiation processing in lunar soil ilmenite: Combining perspectives from surface science and transmission elec-

- tron microscopy // Lunar Planet. Sci. Conf. 41th. 2010. Abstr. #1532.
30. *Slyuta E.N., Shilobreeva S.N., Kashkarov L.L., Kalinina G.V., Voropaev S.A.* Amorphization depth of anorthite and quartz in dependence on H⁺ and He⁺ ion energy and irradiation dose // Lunar and Planet. Sci. Conf. 42nd. 2011. Abstr. #1127.
31. *Ziegler J.F., Biersack J.P., Littmark U.* The Stopping and Range of Ions in Solids. Pergamon Press, New York. 2009. 357 p.
32. *Широков Ю.М., Юдин И.П.* Ядерная Физика. М.: Наука, 1980. 672 с.
33. *Мокрушин А.Д., Агафонов Ю.А., Зиненко В.И., Пустовит А.Н.* Распределение имплантированного водорода в аморфной двуокиси кремния α -SiO₂ // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2004. № 12. С. 5–8.
34. *Morris R.V.* Surface and near-surface exposure ages of lunar soils: Exposure ages based on the fine-grained metal and cosmogenic ²¹Ne // Lunar Planet. Sci. Conf. 8th. 1977. P. 685–687.
35. *Eberhardt P., Eugster O., Geiss J., Graf H., Grogler N., Guggisberg S., Jungck M., Maurer P., Morgeli M., Stettler A.* Solar Wind and Cosmic Radiation History of Taurus-Littrow Regolith // Proc. Lunar Sci. Conf 5th. 1974. P. 197–199.
36. *Bradley J. P., Dukes C., Baragiola R., McFadden L., Johnson R.E., Brownlee D.E.* Radiation processing and the origins of interplanetary dust // Lunar Planet. Sci. Conf. 27th. 1996. P. 149–150.
37. *Dubrovsky A.V., Gribkov V.A.* Installations based on high efficiency high rep rate miniature DPF chambers for material science. Nukleonika. 2000. 45. 3: P. 159–162.
38. *Ануфриев Г.С., Бронштейн А.М., Гудкова И.В., Ефис Ю.Н., Иванов И.А., Кleshkov Е.М., Кострин М.С., Мамырин Б.А., Рафальсон А.Э., Рутгайзер Ю.С., Соколов Б.Р., Семенов В.В.* Магнитный резонансный масс-спектрометр с системой управления и обработки информации МИ9303 / В сб.: Научное приборостроение. Л.: Наука, 1987. С. 101–104.
39. *Ануфриев Г.С., Болтенков Б.С., Рябинков А.И.* Масс-спектры высокого разрешения остаточного газа в металлической вакуумной системе // ЖТФ. 2006. Т. 76. № 3. С. 105–114.
40. *Ануфриев Г.С., Болтенков Б.С., Дубровский А.В., Пименов В.Н., Слюта Е.Н., Яковлев О.И.* Моделирование процесса имплантации гелия в аналоги минералов лунного реголита // Электрон. науч.-информ. журнал “Вестник Отделения наук о Земле РАН”. № 1(27)*2009. М.: ИФЗ РАН, 2009. <http://onznnews.wdcb.ru/publications/asemprg/planet-5.pdf>.