

УДК 523.62-726; 523.98

ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ СОЛНЕЧНЫХ КОРПУСКУЛЯРНЫХ ПОТОКОВ ПО ОБРАЗЦАМ ЛУННОГО ГРУНТА

© 2013 Г. С. Ануфриев*

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 194021 Россия

Поступила в редакцию 23 апреля 2012 года; принята в печать 26 апреля 2013 года

Проведено датирование колонки лунного грунта, доставленного автоматической станцией “Луна-16” в сентябре 1970 года из Моря Изобилия. Применена разработанная нами методика оценки возраста грунта с использованием кинетического параметра — скорости аккумуляции реголита. Возраст грунта “Луна-16” примерно 90 млн лет. Изотопное отношение $^3\text{He}/^4\text{He}$ в колонке несколько выше, чем в колонке грунта, доставленной станцией “Луна-24”. Концентрация гелия в тонкой фракции грунта (около 100 мкм) заметно выше и близка к величине максимальной концентрации в колонке грунта “Луны-24”. Эти различия вероятнее всего связаны с вариациями солнечных корпускулярных потоков. По измерениям концентрации изотопов гелия в образцах колонок лунного грунта оценены величины древних солнечных потоков протонов и гелия и их вариации на интервале времени до 600 млн лет. Показано, что за это время было два сильных всплеска потока гелия: порядка 80 и 470 млн лет тому назад. Существование первого всплеска ранее предполагалось по палеодендрохронологическим данным.

Ключевые слова: Луна—солнечный ветер—Солнце: активность

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследование колонки грунта, доставленного станцией “Луна-24” [1, 2] показало, что различные ее слои имеют возраст от 150 до 600 млн лет. В интервале возрастов порядка 400–600 млн лет был обнаружен всплеск концентрации солнечного гелия. Ранее по дендрохронологическим данным [3] было высказано предположение о существовании второго пика гелиевой концентрации в интервале возрастов 0–145 млн лет. Проведенная датировка 145 млн лет относится к самому молодому образцу реголита [1] колонки “Луна-24”, находящемуся в 70 см от поверхностного слоя (0 см) на Луне. Длина колонки грунта, доставленного станцией “Луна-16” (0–35 см), такова, что его возраст, вероятно, лежит внутри этого временного диапазона и, таким образом, её исследование позволяет проверить существование этого предполагаемого пика концентрации гелия.

2. МЕТОД ДАТИРОВКИ ОБРАЗЦОВ

Для расшифровки информации о солнечных корпускулярных потоках, накопленных лунным грунтом (реголитом), необходимо знание возраста грунта. Однако способы определения скорости накопления реголита не разработаны. Здесь мы

используем предложенный автором [1] количественный метод определения скорости накопления реголита на основе формального рассмотрения реголита в качестве осадочной (обломочной) породы, находящейся в стадии постоянного накопления. В этом случае в предположении накопления реголита в природных условиях, близкого к равномерному, и отсутствия миграции космогенных изотопов по лунным образцам можно показать [4], что скорость накопления a (аккумуляции) реголита определяется потоком $F(I)$ определенного изотопа-трассера, его концентрацией I и плотностью материала ρ . В случае постоянства потока $F(I)$ и условия ненарушенности структуры изучаемой породы можно получить

$$a = \frac{F(I)}{\rho \times I}. \quad (\text{A1})$$

В качестве изотопа-трассера целесообразно выбрать какой-нибудь космогенный изотоп, образующийся в реголите при воздействии на него галактических космических лучей (ГКЛ). Часто из набора различных космогенных изотопов [5, 6] предпочтение отдается космогенному неону $^{21}\text{Ne}_c$. Космогенные изотопы образуются под действием космических лучей в ядерных реакциях с атомами мишени. Расход атомов мишени при образовании [5, 6] космогенных изотопов ничтожен (около

*E-mail: anufriev.mass1@mail.ioffe.ru

Таблица 1. Результаты исследования изотопных составов гелия и неона в образцах грунта колонки “Луны-16”

L , см	${}^4\text{He}$, cm^3/g	${}^{20}\text{Ne} \times 10^2$, cm^3/g	$({}^3\text{He}/{}^4\text{He}) \times 10^4$	${}^{22}\text{Ne} \times 10^4$, cm^3/g	${}^{21}\text{Ne} \times 10^6$, cm^3/g	${}^{21}\text{Ne}_c \times 10^6$, cm^3/g	a , $\text{cm}/10^6 \text{ years}$	t_n , 10^6 years
0–8(+)	0.18	0.31	3.7	2.8	9.4	0.38	0.22	36
8–15(*)	0.175	0.33	3.535	2.6	8.8	0.43	0.20	35
15–28(+)	0.22	0.19	3.7	1.5	4.9	0.06	1.4	9
28–33(*)	0.187	0.35	3.75	2.8	9.2	0.17	0.49	10

$10^{-8} \text{ cm}^3/\text{г}$ за миллион лет). Это позволяет условно считать, что не космические лучи внедряются в реголит, а внедряется поток космогенных изотопов. По метеоритным данным известна производительность (скорость образования) космогенных изотопов $P(I)$ космическими лучами, размерность которой $\text{cm}^3/\text{г} \cdot 10^6 \text{ лет}$. Отметим, что примененная и широко используемая размерность концентрации газа (например, Ne) в научной литературе обычно приводится в объёмных единицах, в предположении стандартной температуры (20°C) и стандартного давления (760 мм Hg). Из функции производительности можно получить плотность условного потока этого изотопа на площадь в 1 cm^2 :

$$F(I) = P(I)\rho h, \quad (\text{A2})$$

где h — толщина слоя реголита, в котором генерируются космогенные изотопы под действием космических лучей. При получении величины скорости образования космогенных изотопов пользуются метеоритными данными и модельными расчетами [5, 7], позволяющими определить количество космогенных изотопов, образующихся при облучении в толще мишени. Используя (A2) получим из (A1) для скорости накопления соотношение:

$$a = \frac{P(I)}{I} \times h. \quad (\text{A3})$$

Величина h может быть определена из модельных экспериментов и расчетов, сообщенных в работе [7]. Мы воспользуемся такой линейной аппроксимацией этих результатов, при которой сохраняется равенство величины производительности космогенного неона ${}^{21}\text{Ne}_c$ с величиной, которая определяется нелинейной зависимостью из [7]. Для грунта “Луны-24” получено $h = 70 \text{ см}$.

В среднем химический состав реголита “Луны-16” из Моря Изобилия отличается от химического состава реголита “Луны-24” из Моря Кризисов таким образом [6, 8], что несколько уменьшается скорость образования космогенного неона: $P({}^{21}\text{Ne}_c) = 0.12 \times 10^{-8} \text{ cm}^3/\text{г} \times 10^6 \text{ лет}$ при той же эффективной глубине $h = 70 \text{ см}$ накопления

космогенных изотопов. При применении модели “толстых” образцов (более 70 см) [1] к определению возраста “нетолстой” 35-сантиметровой колонки лунного грунта [6] возможны ошибки. В частности, из механизма генерации космогенных изотопов следует, что концентрация ${}^{21}\text{Ne}_c$ должна монотонно убывать в направлении от нижней зоны колонки (33 см) к верхней (0 см), чего не наблюдается (Таблица 1). Сказывается конкурирующий эффект — резкое замедление скорости роста верхнего слоя. В частности, концентрация ${}^{21}\text{Ne}_c$ в верхнем слое (зона 0–8 см, Таблица 1) должна быть примерно в два раза ниже [7], чем концентрация в нижерасположенном слое (зона 8–15 см, Таблица 1), а измеренные концентрации фактически равны. Учитывая конкуренцию упомянутых процессов, можно использовать в качестве первого приближения расчета возраста всего образца величину, полученную суммированием возрастов образцов всех зон, определенных для каждой зоны (n) по формуле

$$t_n = \frac{h_n}{a}, \quad (\text{A4})$$

где h_n — толщина образца. Результаты расчета приведены в Таблице 1. Возраст колонки в этом случае равен 90 млн лет.

В экспериментах с лунными образцами измеряется валовая концентрация неона, преобладающую часть которого составляет солнечный неон и некоторую часть — космогенный неон. В рамках двухкомпонентной модели неона (солнечный и космогенный) определение концентрации [5, 6] космогенного неона можно сделать по формуле:

$${}^{21}\text{Ne}_c = \frac{\left(\frac{{}^{22}\text{Ne}}{{}^{21}\text{Ne}}\right)_{\text{tr}} \times {}^{21}\text{Ne}_{\text{ms}} - {}^{22}\text{Ne}_{\text{ms}}}{\left(\frac{{}^{22}\text{Ne}}{{}^{21}\text{Ne}}\right)_{\text{tr}} - \left(\frac{{}^{22}\text{Ne}}{{}^{21}\text{Ne}}\right)_{\text{c}}}, \quad (\text{A5})$$

где нижние индексы обозначают: tr — солнечные (захваченные), ms — измеренные в опыте, c — космогенные величины. Солнечное отношение изотопов неона, согласно [9], равно 31, а космогенное [5]

равно 1.1. Таким образом, выражение (А5) позволяет найти количество $^{21}\text{Ne}_c$ в каждом лунном образце.

3. МАТЕРИАЛЫ

Колонка лунного грунта, доставленная станцией “Луна-16” из Моря Изобилия, была разбита по длине на четыре зоны: 0–8 см, 8–15 см, 15–28 см, 28–33 см. Подробные исследования лунного грунта представлены в [6]. В отдельных “зернах” образца и в тонкой фракции были исследованы [6, 8, 10] изотопные составы инертных газов. Мы воспользуемся изотопными данными из [8, 11], полученными при исследовании тонкой фракции менее 0.083 мм, примерно такой же крупности [1, 2], как в исследованных образцах “Луны-24”. Изотопы гелия и неона выделялись в вакуумных экстракционных установках путем нагрева образцов до 1400–1600°C, очищались от выделявшихся одновременно химически активных газов и регистрировались на масс-спектрометрах, включенных “в линию” с экстракционной установкой. Ошибки измерений составляли около 10%. Результаты изотопного анализа гелия и неона для всех четырех зон колонки приведены в Таблице 1.

В первом столбце Таблицы 1 указаны длины исследованных зон колонки. Знаком (+) отмечены измерения, в которых сделана поправка на величину фонового гелия; знаком (*) отмечены средние величины из двух измерений. Во 2, 3, 5 и 6 столбцах указана концентрация соответствующих изотопов, в 4 столбце — отношение концентраций изотопов гелия. В 7 столбце приведена расчетная концентрация изотопа неона, в 8 — скорость накопления реголита и в 9 — возраст зон колонки.

Концентрация гелия в различных образцах лунного грунта и возраст образцов представлены в Таблице 2. Первая и последняя строчки относятся к грунту “Луны-24”, остальные к зонам колонки “Луны-16”.

Вариации концентрации гелия с изменением возраста исследованных образцов показаны на Рис. 1.

Двумя крайними точками обозначена величина рассчитанной современной гелиевой концентрации, согласно [12], и концентрация гелия в самом “молодом” образце “Луны-24”, согласно данным [1, 2]. Как можно видеть из Рис. 1, превышение концентрации гелия над средним уровнем в образцах грунта “Луны-16” уверенно превышает ошибки измерений. Результат объединения измерений по двум колонкам лунного грунта (“Луна-16” и “Луна-24”) показан на Рис. 2.

На нем видно наличие двух больших всплесков концентрации гелия в лунных образцах порядка

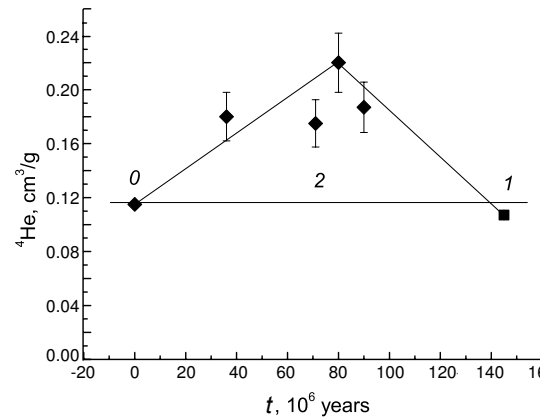


Рис. 1. Изменение концентрации гелия в образцах грунта “Луны-16” с изменением возраста образцов. Прямая, соединяющая крайние точки, показывает ожидаемый средний уровень концентрации гелия при отсутствии всплесков солнечных потоков.

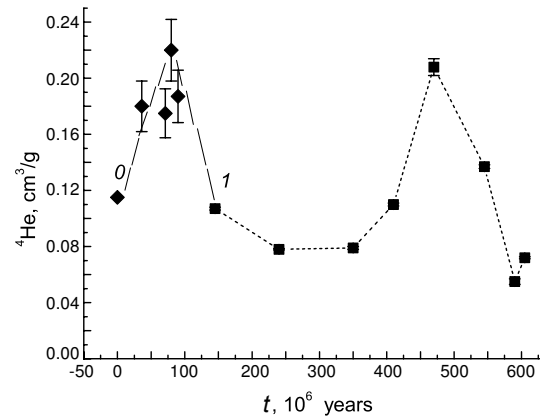


Рис. 2. Изменение концентрации гелия на интервале времени примерно 600 млн лет по образцам грунта “Луны-16” и “Луны-24” (точка 0 — современная концентрация).

80 и 470 млн лет назад, разнесенных во времени примерно на 400 млн лет. Как показано впервые в работе [1], по изменению концентраций гелия в лунном грунте можно получить информацию о вариациях солнечных потоков гелия и протонов. Для этой цели в качестве “опорных” величин потоков можно использовать величину современных потоков гелия и протонов по данным миссий Genesis, ACE, Apollo [12–15]. В среднем потоки равны: $F(\text{H})_m = 2.6 \times 10^8 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$; $F(\text{He})_m = 13 \times 10^6 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ и отношение потоков: $F(\text{He})_m / F(\text{H})_m = n_1 = 0.05$. Возможно, что такие величины потоков были и на более длительных интервалах времени. Приведенные величины практически равны общепринятым [16].

В предположении линейной связи между кон-

Таблица 2. Возраст и концентрация гелия в образцах лунного грунта

t , 10^6 years	${}^4\text{He}$, cm^3/g	Zone or reference
0	0.115	[12]
36	0.18 ± 0.018	0–8 cm
71	0.175 ± 0.0175	8–15 cm
80	0.22 ± 0.022	15–28 cm
90	0.187 ± 0.0187	28–33 cm
145	0.101 ± 0.001	[1, 2]

центрацией и потоком гелия можно получить

$$F(\text{He})_i = F(\text{He})_m \frac{\text{He}_i}{\text{He}_m}, \quad (\text{A6})$$

где $\text{He}_m = 0.115 \text{ cm}^3/\text{g}$ — средняя концентрация гелия по данным исследований “Луны-16” и “Луны-24”. Здесь He_i — величина концентрации гелия в лунных образцах ($i = 1, 2, 3, \dots$), $F(\text{He}_i)$ — соответствующие потоки гелия. Подставляя величины, получим связь $F(\text{He}_i) = (113 \times 10^6 \times \text{He}_i) \text{ cm}^{-2} \text{ c}^{-1}$. Эти выражения полностью решают задачу нахождения вариаций валовых потоков гелия. Предполагая, что полученные результаты о потоках гелия [12–15] справедливы для более длительных интервалов времени, можно найти вариации потока водорода — основного компонента солнечного ветра — из соотношения

$$F(\text{H}_i) = F(\text{He}_i)n_1, \quad (\text{A7})$$

где, как показано выше, $n_1 = 0.05$. Однако этот вариант определения вариаций потока протонов, приводящий к примерно четырехкратному изменению этого потока, не подтверждается современными наблюдениями. В экспериментах и моделях не обнаруживается такое мощное и длительное изменение потока протонов.

Опираясь на существующую экспериментальную и теоретическую базу [12–15], предположим, что причина обнаруженных больших гелиевых вариаций обусловлена количеством и интенсивностью корональных выбросов массы (СМЕ). Согласно существующим данным [17, 18], содержание гелия в СМЕ доходит до 30%, то есть существенно больше, чем средние значения (около 5%) в медленном (IS) и быстром (СН) солнечном ветре [13]. Высокое содержание гелия послужило [14, 15] важным признаком (среди других), позволяющим отличить потоки, созданные выбросами корональной массы от других

типов солнечных корпускулярных потоков [14, 15]. Для последующего определения вариаций потока протонов нам понадобится знание компонентов потока гелия, определенных в работах [13–15, 19], и дополнительные предположения. Дальнейшее разделение состава общего потока гелия на компоненты сделано с учетом обнаруженного в работе [1] большого всплеска концентрации гелия (примерно в два раза относительно среднего). Это приводит к необходимости учесть присутствие в этом процессе корональных выбросов массы, относительно богатых гелием: до 30% [17, 18] против обычных 5% [19]. Полагаем, кроме того, что степень солнечной активности может изменяться на масштабах в миллионы лет. Будем считать, что на интервале в миллионы лет средний поток солнечного ветра IS+СН оставался примерно постоянным. В качестве этого суммарного потока выберем поток, создавший минимальную измеренную концентрацию гелия в образцах лунного грунта $0.055 \text{ cm}^3/\text{g}$. Подставив эту величину в (A6), получим $F(\text{He}_i)_{\text{IS+СН}} = 6.3 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ c}^{-1}$ и будем считать ее постоянной для всех лунных образцов. Тогда изменение потока СМЕ находится как разность наблюдаемого потока и этой величины: $F(\text{He}_i) - 6.3 \times 10^6$. Из последнего выражения, подставив среднюю величину валового потока гелия, можно получить среднюю величину потока гелия корональных выбросов: $F(\text{He})_{\text{СМЕ}} = 13 \times 10^6 - 6.3 \times 10^6 = 6.7 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ c}^{-1}$. Тогда средняя величина потока протонов, вызванных СМЕ, будет равна $(\text{He})_{\text{СМЕ}}/n_2 = 0.45 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ c}^{-1}$, где в качестве n можно принять величину $n_2 = 0.15$, согласно данным по современным потокам корональных выбросов [17, 18]. Текущие (i -тые) вариации потока протонов, вызванные выбросами СМЕ, могут быть найдены из соотношения

$$F(\text{H}_i)_{\text{СМЕ}} = F(\text{He}_i)_{\text{СМЕ}}/n_2. \quad (\text{A8})$$

Общий поток протонов будет равен

$$\begin{aligned} F(\text{H})_{\text{TL}} &= 2.6 \times 10^8 - 0.45 \times 10^8 + F(\text{H}_i)_{\text{СМЕ}} \\ &= 2.15 \times 10^8 + F(\text{He}_i)_{\text{СМЕ}}/n_2. \end{aligned} \quad (\text{A9})$$

Результаты расчетов вариаций потоков сведены в Таблицу 3. В столбцах 1–3 приведены исходные данные по образцам грунта “Луны-16” и “Луны-24”, в столбцах 4–7 — расчетные величины компонентов солнечного ветра. В нижней строке указаны средние величины по столбцам. В таблице приведено среднее значение концентрации гелия по всем четырем образцам “Луны-16”. Графическое изображение вариаций потоков протонов и гелия представлено на Рис. 3.

Таблица 3. Возраст и концентрация гелия в образцах лунного грунта и соответствующие расчетные величины потоков гелия и водорода.

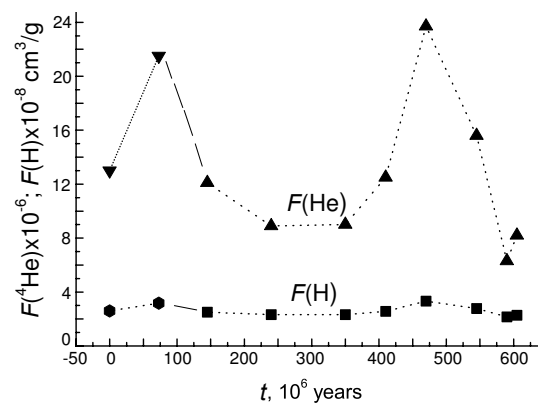
L , cm	${}^4\text{He}$, cm^3/g	t , 10^6 years	$F(\text{He}_i)$, $10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	$F(\text{He}_i)_{\text{CME}}$, $10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	$F(\text{H}_i)_{\text{CME}}$, $10^8 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	$F(\text{H})_{\text{TL}}$, $10^8 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
28	0.190 ± 0.012	80	21.7	15.4	1.03	3.18
72	0.107 ± 0.001	145	11.5	5.2	0.35	2.5
92	0.078 ± 0.001	240	8.9	2.6	0.17	2.32
118	0.079 ± 0.001	350	9.0	2.7	0.18	2.33
130	0.110 ± 0.001	410	12.5	6.2	0.41	2.56
143	0.208 ± 0.006	470	23.7	17.4	1.16	3.31
160	0.137 ± 0.001	545	15.6	9.3	0.62	2.15
184	0.055 ± 0.002	590	6.3	0	0	2.15
192	0.072 ± 0.001	605	8.2	1.9	0.13	2.28
—	0.115	—	13	6.7	0.45	2.6

Видно, что всплески потоков солнечных протонов и гелия происходят синхронно, но вариации потока гелия особенно велики, что позволяет считать, что эти этапы солнечной активности связаны с извержением корональной массы (СМЕ) — гелиевой активностью Солнца

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенное исследование — единственное, в котором сделана попытка проследить долговременную переменность солнечного корпускулярного потока по образцам лунного грунта. Рассмотрен вариант датировки образцов короткой колонки лунного грунта, доставленного станцией “Луна-16”. Впервые обнаружено сильное влияние резкого замедления темпа накопления лунного реголита на процесс датировки. Установлена также связь предложенного метода датирования с временем экспозиции образцов при их облучении галактическими космическими лучами. Полученные результаты существенно расширяют значимость информации о солнечном ветре, полученную космическими аппаратами Genesis, ACE/SWICS и миссиями Apollo, направленными для решения одной из главных задач естествознания — происхождения и эволюции Солнечной системы. Разработан метод реставрации древних солнечных корпускулярных потоков гелия и водорода по концентрации гелия и неона в лунном реголите. Показано, что вариации потока протонов на интервале времени около 600 млн лет невелики (меньше 30%), а величина вариаций потока гелия существенно больше (в 1.5–2 раза)

относительно среднего значения. Показано, что поток гелия имеет два всплеска интенсивности, произошедших около 80 и 470 млн лет тому назад, что подтверждает вывод, сделанный ранее в [2] по косвенным данным. Примерное равенство амплитуд всплесков, возможно, указывает на проявление долговременной переменности Солнца. Полученные данные подтверждают вывод [2] о том, что в настоящее время продолжается эпоха повышенной гелиевой активности, то есть активности СМЕ солнечных процессов. Полученные результаты позволяют продлить интервал времени, в течение которого активность Солнца в далеком прошлом может быть сопоставлена с земными свидетельствами [3, 20, 21] вариаций палеоклимата.

**Рис. 3.** Реставрированное изменение потоков гелия и протонов на основании исследования концентрации гелия в тонкой фракции реголита “Луны-16” и “Луны-24”.

5. ВЫВОДЫ

Применен метод расчета возраста лунного грунта, доставленного станциями “Луна-16” и “Луна-24”, предложенный ранее автором. Метод основан на использовании в модели кинетического параметра — скорости накопления (аккумуляции) реголита — и использовании времени экспозиции лунного грунта галактическими космическими лучами (ГКЛ). По измеренным концентрациям изотопов гелия в образцах колонок лунного грунта оценены величины древних солнечных потоков протонов и гелия и их вариации на интервале времени до 600 млн лет. Показано, что за это время было два сильных всплеска потока гелия: около 80 и 470 млн лет тому назад. Полученные данные представляют новую информацию о функционировании Солнца в прошлом и могут быть полезны в изучении солнечно-земных связей, в вопросах палеоклимата и палеонтологии. Непротиворечивое хронологическое объединение лунного грунта двух колонок, доставленных из различных регионов Луны, объективно поддерживает состоятельность предложенного метода реставрации солнечных корпускулярных потоков.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке проекта “Фундаментальные процессы исследований и освоения Солнечной системы” № 22 Президиума Российской академии наук.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. G. S. Anufriev, *Cosmic Research* **48**, 101 (2010).
2. G. S. Anufriev, *Cosmic Research* **50**, 405 (2012).
3. О. М. Распопов, В. А. Дергачев, Т. Колстрём, Х. Юнгер, *Магнетизм и аэрономия* **50**, 147 (2010).

4. G. S. Anufriev, B. S. Boltenev, I. I. Volkov, and I. N. Kapitonov, *Lithology and Mineral Resources* **31**, 1 (1996).
5. В. А. Алексеев, *Астрон. вестник* **38**, 225 (2004).
6. *Лунный грунт из Моря Изобилия*, Ред. А. П. Виноградов (Наука, Москва, 1974).
7. I. Leya, H. R. Lange, S. Heumann, et al., *Meteoritics and Planet Sci.* **36**, 1547 (2001).
8. А. П. Виноградов, И. К. Задорожный, в: *Лунный грунт из Моря Изобилия*, Ред. А. П. Виноградов (Наука, Москва, 1974), с. 379.
9. P. Eberhardt, J. Geiss, H. Graf, et al., in: *Proc. of Apollo II Lunar Science Conf.* (Pergamon Press, 1970), Vol. 2, p. 1037.
10. D. Heymann, A. Yaniv, and I. Lakatos, *Earth and Planetary Science Letters* **13**, 400 (1972).
11. Г. С. Ануфриев, Б. С. Болтенков, В. Н. Гартманов и др., *Геохимия* **1**, 248 (1977).
12. J. Geiss, F. Buhler, H. Cerutti, et al., *Space Sci. Rev.* **110**, 307 (2004).
13. D. B. Reisenfeld, D. S. Burnett, R. H. Becker, et al., *Space Sci. Rev.* **130**, 79 (2007).
14. G. Gloeckler, J. Cain, F. M. Ipavich, et al., *Space Sci. Rev.* **86**, 497 (1998).
15. R. Schwenn, J. C. Raymond, D. Alexander, et al., *Space Sci. Rev.* **123**, 127 (2006).
16. *Физика космоса (Маленькая энциклопедия)*, Ред. Р. А. Сюняев (Советская энциклопедия, Москва, 1986), сс. 636-639.
17. E. Marsch, *Advances in Space Research* **5**, 821 (2006).
18. Г. Н. Застенкер, Л. М. Зеленый, *Земля и Вселенная* **5**, 46 (1999).
19. R. Schwenn, *Space Sci. Rev.* **124**, 51 (2006).
20. Ю. А. Наговицын, *Astrophysical Bulletin* **63**, 43 (2008).
21. M. A. Xapsos and E. A. Burke, *Solar Phys.* **257**, 363 (2009).

Long-Term Variations of Solar Corpuscular Fluxes Based on Lunar Soil Samples

G. S. Anufriev

We report the results of age determination of a lunar soil column, delivered by the Luna 16 mission in September 1970 from the Sea of Fertility. We elaborated and applied the soil age determination method using the kinetic parameter, the regolith accumulation rate. The age of the soil delivered by Luna 16 is about 90 Myr. The isotopic ratio of $^3\text{He}/^4\text{He}$ in the column is slightly higher than in the soil column delivered by the Luna 24 mission. The abundance of helium in the fine fraction of the soil (about 100 μm) is significantly higher and is close to the maximum abundance from the Luna 24 soil column. These differences are most likely associated with the variations of solar corpuscular fluxes. Based on the measurements of the helium isotope abundance in the samples of lunar soil columns, we have estimated the values of ancient solar fluxes of protons and helium and variations thereof in the time interval of up to 600 Myr. We demonstrate that during this epoch there were two strong bursts of the helium flux, about 80 and 470 Myr ago, respectively. The existence of the first peak was assumed earlier from the paleodendrochronological data.

Keywords: *Moon—solar wind—Sun: activity*