

Академик А. П. ВИНОГРАДОВ, А. К. ЛАВРУХИНА, В. Д. ГОРИН,
Г. К. УСТИНОВА

**КОСМОГЕННЫЕ Al^{26} И Na^{22} В ЛУННОМ РЕГОЛИТЕ,
ДОСТАВЛЕННОМ «ЛУНОЙ-16»**

В результате непрерывного процесса кратерообразования под ударами метеоритных тел поверхность Луны эволюционирует: слои лунной пыли перемешиваются, обломки твердых пород перекатываются, меняя свою ориентацию на поверхности, некоторые оказываются засыпанными, другие, напротив, обнажаются, будучи выброшенными на поверхность из более глубоких слоев. Измерение активности космогенных изотопов, образованных космическими лучами на разной глубине в лунных породах разных типов, может раскрыть характер процессов эволюции лунной поверхности, в частности историю накопления реголита — лунной пыли (1).

В настоящее время образцы пород четырех обширных областей на видимой стороне Луны исследуются в земных лабораториях. Это твердые вулканические породы, по крайней мере, двух типов, брекчии и реголит. Породы не сильно различаются по химическому составу (1-3), но реголит и твердые породы имеют разную плотность (~ 1,2 и 3,1 г/см³ соответственно). Нами рассчитаны глубинные распределения Al^{26} и Na^{22} в лунных породах типов: А (57-40),

В (17-33) (вулканические породы), С (18-22) (брекчии) и D (84-18) (реголит) из сбора «Аполлона-11», реголит типа (12070) из образцов «Аполлона-12» (D') и реголит, доставленный «Луной-16» (D''). Расчет производился по ранее предложенному и развитому аналитическому методу, (4-8), эффективность которого подтверждена многочисленными расчетами радиоактивности в метеоритах (9). Из рис. 1 видно, что разница в распределении обоих изотопов в твердых породах, имеющих примерно одинаковую плотность и слегка различающихся по химическому составу, незначительна. Но плотность пылевых пород почти в три раза ниже. Поскольку ионизационные потери и потери на ядерное взаимодействие сильно зависят именно от плотности, то спад потоков космического излучения с глубиной в породах с малой плотностью будет меньше, поэтому активность образованных ими космогенных изотопов будет больше на больших глубинах (активность Al^{26} на глубине 50 см от поверхности в породе D в ~ 2,2 раза выше, чем в породе А). Напротив, разница между активностью в реголитах D, D', D'', определяемая только химическим составом, снова невелика. В целом глубинные распределения обоих космоген-

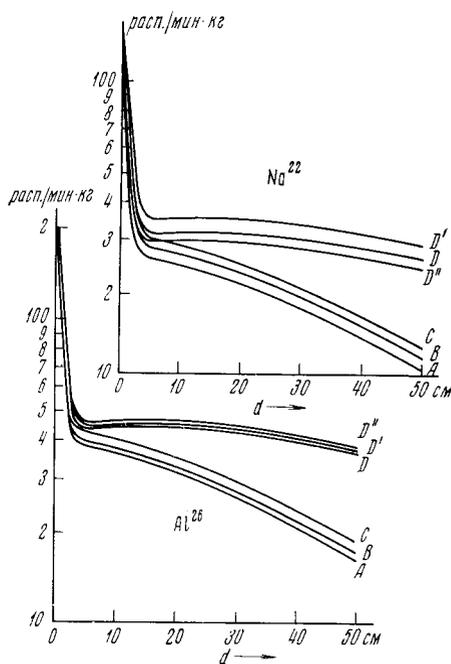


Рис. 1. Глубинное распределение активности Na^{22} и Al^{26} в лунных породах разных типов (d — глубина от поверхности Луны)

ных изотопов будет больше на больших глубинах (активность Al^{26} на глубине 50 см от поверхности в породе D в ~ 2,2 раза выше, чем в породе А). Напротив, разница между активностью в реголитах D, D', D'', определяемая только химическим составом, снова невелика. В целом глубинные распределения обоих космоген-

ных изотопов характеризуются резким спадом активности до глубины $\sim 5-6$ см от поверхности, обусловленным резким спадом низкоэнергетичного потока солнечных протонов, быстро теряющих свою энергию из-за сильных ионизационных потерь, и затем — плавным уменьшением с глубиной, соответствующим изменению потока вторичных ядерно-активных частиц галактической компоненты космических лучей.

Реголит Моря Изобилия был взят при помощи бура, который углубился в породу до 35 см. Для анализа активности Al^{26} и Na^{22} были взяты две пробы: проба 1 весом 18,87 г из колонки от поверхностного слоя до глубины 13 см и проба 2 весом 10,396 г с глубины 15 ÷ 18 см (врезка к рис. 2).

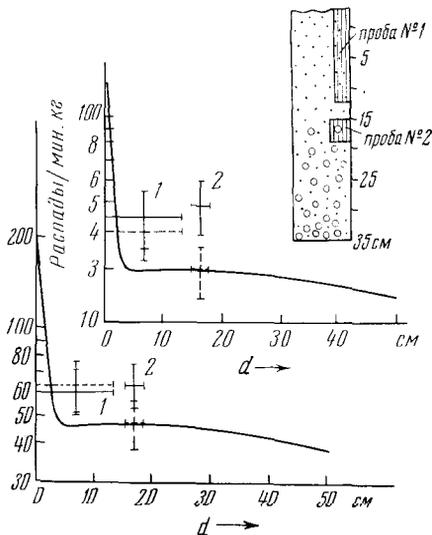


Рис. 2. Распределение активности Na^{22} и Al^{26} в лунном реголите, доставленном «Луной-16» (сплошные кресты — измеренные значения, пунктир — ожидаемые значения в пробах 1 и 2). На врезке — схематическая колонка лунного грунта

рическими датчиками с низкофоновыми сцинтилляторами $NaICrTe$ размером 120×100 мм, введенными в осевой канал защитного датчика аптисовпадений на основе пластмассового сцинтиллятора размером 500×650 мм. Вся система датчиков размещалась внутри массивной защитной камеры из стали с толщиной стенок 300 мм. Для подавления нейтронной компоненты фона в стенках камеры проложен слой толщиной $100 \div 150$ мм из смеси парафина с борной кислотой. Применение указанной массивной и активной защиты датчиков позволило снизить интегральный фон спектрометра в диапазоне $0,1 \div 3,0$ Мэв более чем в 200 раз (¹⁰). Для фоновых измерений брались образцы дунита в таких же количествах и в такой же упаковке, как и лунные пробы 1 и 2. Расчет активности Al^{26} проводился по суммарному фотопику с $E_{\gamma} = (511 + 1830)$ кэв с фоном 0,5 имп/час и эффективностью 1,7 и 2% соответственно для проб 1 и 2. Расчет активности Na^{22} проводился по суммарному фотопику с $E_{\gamma} = (511 + 1275)$ кэв с фоном 1 имп/час и эффективностью 2,1 и 2,8% соответственно для проб 1 и 2. Эффекты над фоном составляли для $Al^{26} \sim 150\%$ и для $Na^{22} \sim 100\%$.

Измеренные активности в пересчете на момент взятия лунного грунта аппаратом «Луна-16» составляют (в расп./мин⁻¹.кг⁻¹): $Al^{26} 60 \pm 11$ и 62 ± 11 , $Na^{22} 45 \pm 10$ и 50 ± 10 , соответственно для проб 1 и 2 (рис. 2). На рис. 2 наряду с расчетными кривыми отмечены соответствующие им активности, которые должны были наблюдаться в выбранных для измерения пробах. Ожидаемые и измеренные значения активностей в пробе 1 (которая представляет собой смесь грунта в слое от 0 до 13 см от поверх-

До настоящего времени не производилось измерений глубинного градиента активности космогенных изотопов в образцах лунной пыли. Это связано с тем, что применяемая техника измерений позволяет измерять активность только в пробах больших объемов (порядка 50—100 г). При малом диаметре колонки, которой берется грунт, это приводит к определению лишь некоторой средней активности в больших глубинных интервалах, т. е. к смазыванию глубинного эффекта и к потере ценной информации как об интенсивности космических лучей, так и об истории исследуемых образцов. Учитывая эти обстоятельства, мы прежде всего разработали специальную аппаратуру для измерения радиоактивности в малых навесках ($\sim 10-20$ г).

Измерения проводились на низкофоновом сцинтилляционном гамма-спектрометре в режиме $\gamma - \gamma$ -совпадений. Исследуемое вещество помещалось между двумя спектромет-

ности) совпадают в пределах ошибок, но измеренные значения активностей в пробе 2 выше ожидаемых в 1,3 раза для Al^{26} и в 1,7 раза для Na^{22} и практически совпадают с соответствующими активностями в пробе 1. Это позволяет допустить, что грунт в пробе 2 является тоже смесью, аналогичной смеси грунта разных слоев в пробе 1, т. е. поверхностный слой лунного реголита испытал перемешивание, по крайней мере до глубины 18 см, за время порядка 4 лет (для Na^{22} $1,5 T_{1/2} \approx 4$ года). Этот вывод соответствует результатам по измерению инертных газов, содержание которых оказалось не зависящим от глубины реголита ⁽¹⁾, и подтверждается гранулометрическими характеристиками реголита и величиной дисперсии гранулометрических кривых, снятых для различных глубин ⁽¹¹⁾. О перемешивании свидетельствуют и данные Л. Л. Кашкарова по исследованию треков, который на глубине ~ 13 см обнаружил частицы, на поверхности которых наблюдается высокий градиент плотности треков от низкоэнергетичных ядер элементов группы железа, входящих в состав солнечных космических лучей. Перемешивание слоя толщиной ~ 15 см может вызвать даже микрометеорит диаметром 2 мм. Иные характеристики получены для реголитов Моря Спокойствия и Океана Бурь. В колонке реголита (10004-26) длиной 13,2 см наблюдался резкий градиент плотности треков на поверхности кристаллов, взятых с различной глубины, и отсутствие градиента плотности треков по глубине кристаллов ⁽¹²⁾. В колонке реголита (12025,28) длиной 60 см обнаружено скачкообразное изменение от слоя к слою плотности треков ⁽¹³⁾ и содержания He^4 и Ne^{20} солнечного происхождения ⁽¹⁴⁾.

Таким образом, имеется пример неперемешанного слоя реголита (10004-26), свидетельствующий о долгом отсутствии выбросов с соседних участков поверхности, пример перемешанного слоя (реголит «Луны-16»), причем акт перемешивания имел место за период времени меньше 4 лет перед взятием пробы, и пример чередования перемешанных и неперемешанных слоев в реголите Океана Бурь с самыми разными радиационными возрастами для разных слоев (от 0 до 100 миллионов лет ⁽¹³⁾). Все эти данные свидетельствуют, по крайней мере, о превалировании процессов послышной эволюции реголита в результате выбросов при постоянной бомбардировке лунной поверхности телами и частицами из космоса над постоянными процессами изменения реголита в результате эрозии, скорость которой меньше 10^{-7} см/год ⁽¹⁴⁾, или за счет выпадения вещества из космоса. Этот вывод подтверждается и нашими расчетами активности космогенных изотопов в образце (10017) — твердая порода типа В — для которого были выполнены измерения Na^{22} , Al^{26} , Mn^{53} , Mn^{54} и Fe^{55} в пробе Т4 с глубины $0 \div 3$ см от облучавшейся поверхности и в пробе Т3 с глубины 6 см ⁽¹⁵⁾. На рис. 3 представлены расчетные кривые и данные измерений ⁽¹⁵⁾ для Na^{22} и Al^{26} . Наблюдаемые активности радиоизотопов в условиях равновесия накапливаются за время $1,5 T_{1/2}$ этих изотопов перед изъятием их из облучения. Таким образом, по Na^{22} и Al^{26} можно сравнивать процессы, происходившие в течение последнего миллиона лет и последних ~ 4 лет. Ранее путем анализа расчетных и измеренных данных для Na^{22} и Al^{26} на поверхности пробы Т4 в образце (10017) было доказано постоянство потока солнечных протонов в течение последнего миллиона лет ⁽¹⁶⁾. Подобный же анализ в глубинной пробе Т3 позволяет проследить историю образца (10017). Сплошные и штриховые кривые на рис. 3 описывают распределение активности в камне (10017), если он целиком лежит в плоскости лунной поверхности такого же состава и в лунной пыли соответственно, так что облучается только верхняя его поверхность (рис. 3 врезка а). Штрих-пунктирные (3) кривые описывают распределение активности в образце, если он лежал на поверхности, возвышаясь над ней и облучаясь со всех сторон, кроме нижней (рис. 3, врезка б)). Из анализа рисунков следует, что в течение последних 4 лет вокруг камня был насыпан слой лунной пыли, в то время

как большую часть последнего миллиона лет он лежал на открытой поверхности. Точно такую же картину иллюстрируют и данные по Fe^{55} , Mn^{54} и Mn^{53} . Таким образом, к уже известной истории образца (10017) (возраст затвердевания 3,6 млрд лет ⁽¹⁷⁾, космический возраст по Kr^{81} — Kr^{83} 450—500 млн лет ⁽¹⁸⁾, возраст по трековым данным 9—10 млн лет ⁽¹²⁾): около 500 млн лет назад камень был выдвинут из более глубоких

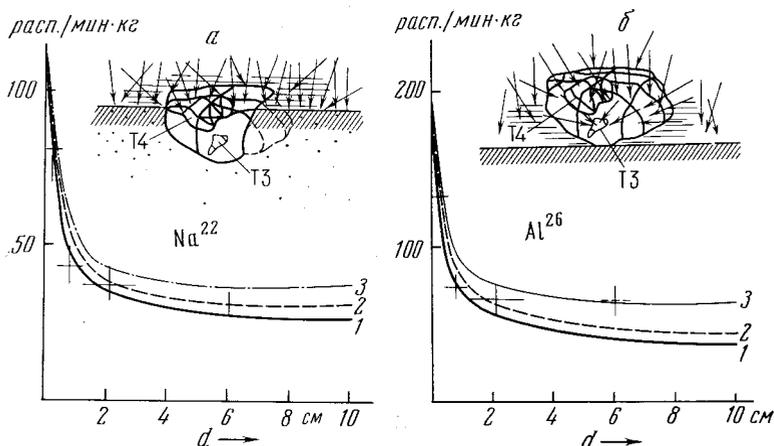


Рис. 3. Распределение активности Na^{22} и Al^{26} в образце (10017), когда камень лежит в плоскости лунной поверхности того же состава (1), в плоскости окружающего реголита (2), на плоскости поверхности (3). На врезках — положение камня относительно поверхности Луны

слоев на уровень 15—50 см от поверхности, а около 10 млн лет назад был выброшен на поверхность ⁽¹²⁾, — можно было бы добавить, что в течение последнего миллиона лет камень все еще лежал на открытой поверхности, причем постоянные процессы в окружающем реголите были настолько незначительны, что не сказались на условиях его облучения космическими лучами, но за 4 года перед изъятием камня с лунной поверхности в одном или нескольких событиях вокруг него был насыпан слой лунной пыли толщиной ~ 6 см. В дополнение к данным, полученным с помощью аппарата «Луна-16», это еще раз свидетельствует о том, что решающим фактором в эволюции лунного реголита является послышное изменение его в результате выбросов при бомбардировке из космоса.

Институт геохимии и аналитической химии
им. В. И. Вернадского
Академии наук СССР
Москва

Поступило
12 VII 1971

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ А. П. Виноградов, Геохимия, № 3 (1971). ² H. Wänke, F. Bege mann et al., Science, 167, 523 (1970). ³ Preliminary Examination of Lunar Samples from Apollo-12, Science, 167, 1325 (1970). ⁴ А. К. Лаврухина, Г. К. Устинова, Астрон. журн., 44, 1081 (1967). ⁵ А. К. Лаврухина, Г. К. Устинова, Т. А. Ибраев, Сборн. Космические лучи, «Наука», № 11, 1969. ⁶ А. К. Лаврухина, Г. К. Устинова, ДАН, 179, 1448 (1968). ⁷ А. К. Лаврухина, Г. К. Устинова и др., Meteorite Research, Dordrecht — Holland, 1969, p. 227. ⁸ А. К. Лаврухина, Г. К. Устинова, Астрон. вестн., 5, 144 (1971). ⁹ А. К. Лаврухина, Г. К. Устинова, Геохимия, в печати. ¹⁰ В. Д. Горин, Докл. на VI Всесоюз. конфер. по синтезу, произв. и исп. сцинтилляторов и сцинтилляционных материалов, Харьков, 1971. ¹¹ К. П. Флоренский, А. В. Иванов и др., Докл. XIV сессии КОСПАР, Спэнгл, США, 1971. ¹² D. Lal, D. Macdougall et al., Proc. Apollo-11 Lunar Sci. Conf., 3, 2295 (1970). ¹³ N. Bhandari, S. Bhat et al., Apollo-12 Lunar Sci. Conf., Houston, January, 1971. ¹⁴ J. Funkhouser, D. Bogard, O. Schaeffer, Apollo-12 Lunar Sci. Conf., Houston, January, 1971. ¹⁵ S. H. R. E. L. L. D. A. L. F. F., Proc. Apollo-11 Lunar Sci. Conf., 2, 1503 (1970). ¹⁶ А. К. Лаврухина, Г. К. Устинова, Nature, 232, 462 (1971). ¹⁷ A. L. Albee, D. S. Burnett et al., Science, 167, 463 (1970). ¹⁸ K. Marti, G. W. Lugmair, H. C. Urey, Science, 167, 548 (1970)