

УДК 524.1

КОСМОГЕННЫЕ ИЗОТОПЫ В ЛУННОМ ГРУНТЕ: СОЛНЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ И ВСПЫШКИ БЛИЗКИХ СВЕРХНОВЫХ

© 2024 г. Г. И. Васильев^{1, *}, А. Н. Константинов², В. М. Остряков²,
А. К. Павлов¹, Д. А. Фролов¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук», Санкт-Петербург, Россия

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: gennadyivas@gmail.com

Поступила в редакцию 24.05.2023

После доработки 16.10.2023

Принята к публикации 31.10.2023

Лунный грунт является интегральным детектором космических лучей различного происхождения (солнечных и нашей Галактики). Анализ глубинных профилей космогенных изотопов (^{14}C , ^{41}Ca , ^{36}Cl , ^{10}Be , ^{26}Al , ^{53}Mn), образованных этими космическими лучами, позволяет восстанавливать их интенсивность на шкалах времени порядка 3–4 периодов полураспада соответствующего изотопа. Для согласования данных по ^{10}Be требуется (помимо среднего потока галактических космических лучей) наличие дополнительного источника ускоренных частиц с жестким спектром. Таким источником может служить, например, вспышка близкой сверхновой, произошедшая примерно 2–3 млн лет назад.

DOI: 10.31857/S0367676524020244, EDN: RQNQHM

ВВЕДЕНИЕ

Протоны и альфа-частицы из локального межзвездного пространства взаимодействуют с магнитным полем Солнечной системы. На орбите Земли это проявляется в изменении потока космических лучей (КЛ) с энергиями менее 10 ГэВ/нуклон и зависит от активности Солнца. Изучение отношения содержания изотопов $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ в датированных кольцах деревьев и других архивах показало существование в прошлом периодов с пониженной активностью и продолжительностью в несколько солнечных циклов типа маундеровского минимума. Луна является интегральным детектором излучения. При постоянном среднем потоке КЛ содержание образующихся в ее грунте радиоактивных изотопов находится в динамическом равновесии, т.е. число образующихся радионуклидов равно числу распадающихся. Стандартный метод согласования теоретических и экспериментальных данных подразумевает использование в качестве свободного параметра среднего модуляционного потенциала $\Phi(t)$ за время нескольких периодов полураспада соответствующего радионуклида. Глубинный ход его концентрации (до сотен г/см²) определяется формой спектра галактических КЛ (ГКЛ), тогда как вклад солнечных КЛ (СКЛ) проявляется на глубинах менее ~10 г/см² [1–3]. Наличие близких локальных источников может дать дополнительный вклад помимо

“основного” потока ГКЛ. В работе [4] на основе анализа данных эксперимента PAMELA по содержанию изотопов углерода в ГКЛ делается вывод, что возможный источник ядер ^{14}C не может находиться ближе 190 пк, и взрыв сверхновой не мог произойти ранее 73 тыс. лет назад. Анализ концентрации более долгоживущего изотопа в грунте Луны, ^{10}Be (период полураспада ~ $1.4 \cdot 10^6$ лет), позволяет определить интенсивность потока КЛ и возможность взрыва близкой сверхновой на временном масштабе нескольких миллионов лет. Нами был проведен расчет генерации различных радионуклидов при взаимодействии протонов и альфа-частиц КЛ с лунным грунтом с помощью пакета GEANT4.10. Ранее эта методика была применена для вычисления изменения изотопного состава грунта Марса и Луны [5–7] и солнечного ветра во время солнечных вспышек [8]. В настоящей работе расширен ряд анализируемых радионуклидов и, соответственно, расширен временной диапазон происходящих событий.

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ

Используемые нами экспериментальные данные получены при анализе состава лунного керна, доставленного экспедицией Аполлон-15. Расчеты проводились для изотропного падения

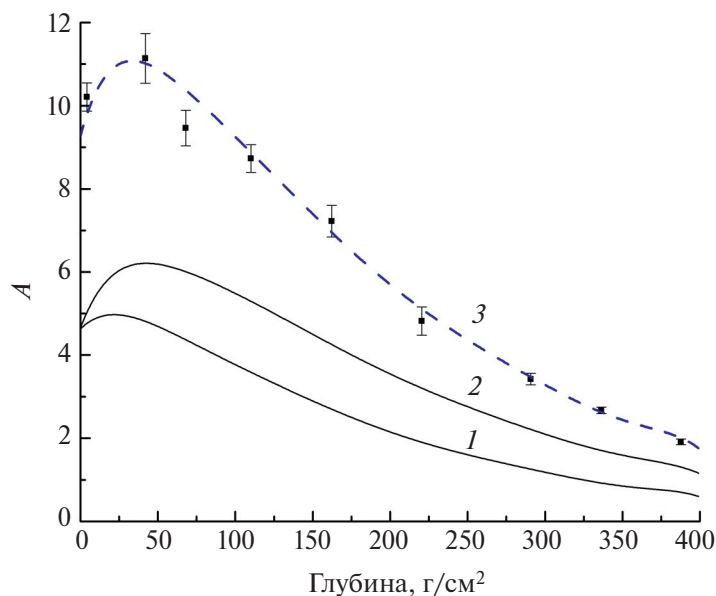


Рис. 1. Глубинные профили наведенной активности (A , число распадов в мин. на кг) ^{10}Be : точки — экспериментальные данные [1], 1 — от ГКЛ, 2 — от вспышки сверхновой, 3 — сумма.

первичных частиц с заданной энергией на поверхность. Фиксировалась глубина образования интересующих нас изотопов в каждом акте ядерного взаимодействия как первичных частиц, так вторичных. В дальнейшем проводилась свертка энергетической зависимости выхода изотопа со спектром падающих частиц. Наши расчеты дают более высокие концентрации всех изотопов по сравнению с измеренными, при этом хорошо совпадая по форме. Вероятное объяснение такого результата — повышенный выход вторичных частиц в GEANT4.10. На такую же проблему указывают и другие работы [9–11], т.к. вычисленный поток нейтронов в лунном грунте превышает измеренный примерно в 2 раза [11].

Измерения концентрации радиоуглерода в земных архивах с учетом палеомагнитных и палеоклиматических данных позволяют восстановить временной ход модуляционного потенциала, $\Phi(t)$, за последние 19000 лет [12]. Среднее значение $\Phi(t)$ при этом равно 360 ± 20 МВ. Использование восстановленных значений модуляционного потенциала в расчетах образования ^{14}C в лунном грунте дает превышение расчетных значений по сравнению с экспериментальными данными в 1.6 раз. Поправка (Y_0), обусловленная учетом завышенного выхода вторичных частиц, приводит к согласованию эксперимента с расчетами. Этот подход может быть применен также для долгоживущих изотопов ^{26}Al ($T_{1/2}=0.74 \cdot 10^6$ лет), ^{10}Be ($T_{1/2}=1.4 \cdot 10^6$ лет) и ^{53}Mn ($T_{1/2}=3.7 \cdot 10^6$ лет). В работе [12] авторы для расчетов профиля концентрации ^{26}Al постулировали время облучения

образца 1 млн лет, в то время как равновесное значение достигается через 3–4 периода полураспада. Это приводит к уменьшению концентрации изотопа, поэтому в работе [12] не было необходимости введения дополнительного корректирующего множителя Y_0 . Наша оценка $\Phi(t)=480$ МВ согласуется с полученным этими авторами значением $\Phi(t)=496$ МВ, что соответствует среднему уровню солнечной активности в течение последних 2 млн лет. Использование поправки позволяет также лучше описать экспериментальную кривую. На рис. 1 приведены результаты анализа данных по ^{10}Be , на рис. 2 — по ^{53}Mn . Для ^{10}Be экспериментальные данные невозможно объяснить без привлечения дополнительного источника КЛ с более жестким по сравнению с современным спектром ГКЛ. Таким источником могла быть вспышка близкой сверхновой [13]. Следы подобного события обнаружены в донных океанических отложениях с возрастом около 2.5 млн лет и в лунном грунте в виде изотопа ^{60}Fe с периодом полураспада 2.6 млн лет. Этот изотоп возникает исключительно при взрывах сверхновых звезд и в дальнейшем осаждается в атмосфере Земли с межзвездной пылью. Кроме того, взрыв сверхновой приводит к ускорению протонов на ударных волнах до высоких энергий со спектром более жестким, чем спектр современных ГКЛ. В этом случае в Солнечной системе произойдет резкий рост потоков частиц без значительного искажения их спектра, имеющего место за счет рассеяния на магнитных неоднородностях и ядерных взаимодействий в межзвездном пространстве. Учет этого дополнительного импульсного вклада

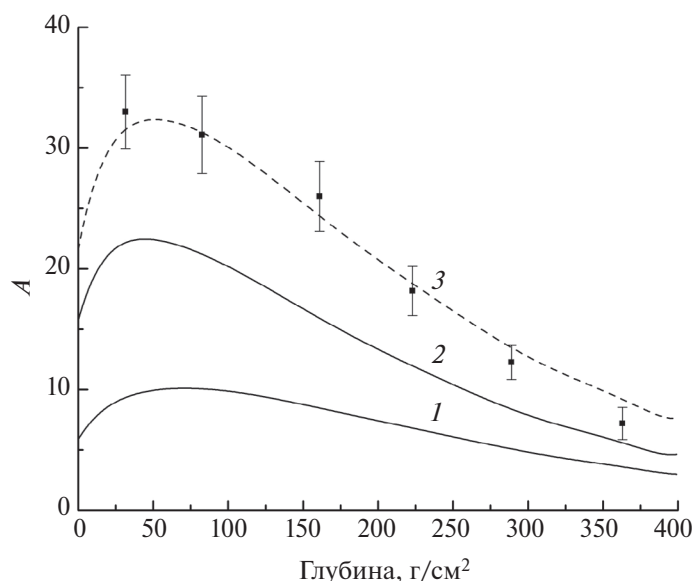


Рис. 2. Глубинные профили наведенной активности (A , число распадов в мин. на кг) ^{53}Mn : точки — экспериментальные данные [2], 1 — от ГКЛ, 2 — от вспышки сверхновой, 3 — сумма.

от сверхновой ~ 2.5 млн лет назад позволяет согласовать результаты расчетов с экспериментальными данными при том же среднем модуляционном потенциале, как и для ^{26}Al , но на шкале до 4 млн лет (рис. 1). КЛ от сверхновой должны также дать существенный вклад в образование более долгоживущего изотопа ^{53}Mn в лунных породах. Для него с учетом дополнительного источника на рис. 2 наш модельный расчет показывает хорошее согласие с экспериментальными данными при среднем модуляционном потенциале, сходном с полученным для ^{26}Al на шкале около 10 млн лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенный анализ глубинного хода различных изотопов с периодом полураспада менее миллиона лет в лунном грунте приводит к среднему значению модуляционного потенциала ~ 500 МВ на временной шкале ~ 2 млн лет. В то же время объяснение глубинного профиля более долгоживущих изотопов ^{10}Be и ^{53}Mn при том же значении потенциала невозможно без привлечения дополнительного источника КЛ, имеющего жесткий энергетический спектр $\sim E^{-1.7}$. Такие спектры могут быть результатом взрыва близкой сверхновой, ускоренные энергичные частицы от которой достигли Луны. Абсолютные значения концентрации образованного в грунте ^{10}Be приводят к ограничениям на параметры этого взрыва: полную его энергетику в КЛ и расстояние до сверхновой, а также на показатель спектра ускоренных частиц. Наши оценки приводят к следующим результатам. При минимальной оценке трансформации энергии

взрыва в энергию КЛ (10%) полная энергия должна быть порядка $E \sim 10^{52} - 10^{54}$ эрг при расстоянии до сверхновой 10–40 пк и жестком спектре частиц. В этом случае момент достижения Луны ускоренными частицами оценивается примерно 2–3 млн лет назад, а продолжительность такого события составляет $\sim 10^3 - 10^4$ лет. Это соответствует данным по ^{60}Fe , обнаруживающим его увеличенное содержание как раз в этот период времени в донных отложениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nishiizumi K., Elmore D., Ma X.Z., Arnold J.R. // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1984. V. 70. P. 157.
2. Nishiizumi K., Elmore D., Ma X.Z., Arnold J.R. // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1984. V. 70. P. 164.
3. Jull A.J.T., Cloudt S., Donahue D.J. et al. // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1998. V. 62. No. 17. P. 3025.
4. Богомолов Э.А., Васильев Г.И. // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2021. Т. 85. № 4. С. 466; Bogomolov E.A., Vasilyev G.I. // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2021. V. 85. No. 8. P. 341.
5. Острыakov В.М., Блинов А.В., Васильев Г.И. и др. // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2017. Т. 81. № 2. С. 189; Ostryakov V.M., Blinov A.V., Vasilyev G.I. et al. // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2017. V. 81. No. 2. P. 170.
6. Васильев Г.И., Павлов А.К., Острыakov В.М. // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2015. Т. 79. № 3. С. 33; Vasilyev G.I., Pavlov A.K., Ostryakov V.M. // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2015. V. 79. No. 3. P. 170.

7. Павлов А.К., Остряков В.М., Павлов А.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2013. Т. 77. № 5. С. 557; Pavlov A.K., Ostryakov V.M., Pavlov A.A. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2013. V. 77. No. 5. P. 493.
8. Васильев Г.И., Остряков В.М., Павлов А.К., Чакчурина М.Е. // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. № 2. С. 162; Vasilyev G.I., Ostryakov V.M., Pavlov A.K., Chakchurina M.E. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. No. 2. P. 143.
9. Mesick K.E., Feldman W.C., Coupland K.E. et al. // Earth Space Sci. 2018. V. 5. No. 7. P. 324.
10. Li Y., Zhang X., Dong W., Ren Z. // J. Geophys. Res. Space Phys. 2017. V. 122. No. 2. P. 1473.
11. Howard A., Holder F., Qesado J.M. et al. // Proc. 2008 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record. (Dresden, 2008). P. 1.
12. Kudryavtsev I.V., Dergachev V.A. // Geomagn. Aeronomy. 2019. V. 59. P. 1099.
13. Poluianov S., Kovaltsov G.A., Usoskin I.G. // Astronomy Astrophys. 2018. V. 618. No. A96. P. 1.
14. Wallner A., Feige J., Kinoshita N. et al. // Nature. 2016. V. 532. P. 69.

Cosmogenic isotopes in the lunar soil: solar activity and nearby Supernova outbreak

G. I. Vasilyev^{1, *}, A. N. Konstantinov², V. M. Ostryakov²,
A. K. Pavlov¹, D. A. Frolov¹

¹ Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 194021 Russia

² Peter the Great St-Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, 195251 Russia

*e-mail: gennadyivas@gmail.com

The lunar soil is an integral detector of cosmic rays (CRs) of different origin (Solar and Galactic). Analysis of the deep profiles of cosmogenic isotopes (^{14}C , ^{41}Ca , ^{36}Cl , ^{10}Be , ^{26}Al , ^{53}Mn) allows us to restore the intensity of CR on time scales of 3–4 half-lives of the corresponding isotope. To coordinate data on ^{10}Be , it is required (in addition to the average flux of CRs) the presence of an additional source of accelerated particles with hard spectrum. Such a source can be, for example, an outbreak of a nearby SN 2–3 million years ago.