

СОЛНЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ ЗА ПОСЛЕДНИЕ 10 МИЛЛИОНОВ ЛЕТ

**Павлов А.К.¹, Васильев Г.И.¹, Константинов А.Н.²,
Остряков В.М.², Фролов Д.А.¹**

¹Физикл-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург Россия

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург Россия

SOLAR ACTIVITY DURING THE LAST 10 MILLION YEARS

**Pavlov A.K.¹, Vasilyev G.I.¹, Konstantinov A.N.²,
Ostryakov V.M.², Frolov D.A.¹**

¹Ioffe Institute, St-Petersburg, Russia

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

Deep profiles of the cosmogenic isotopes in lunar regolith depend on the flux and spectra of the Galactic and solar cosmic rays (CRs), i.e. depend on the solar activity on a time scale comparable to their lifetime. We have analyzed different radionuclide contents (^{14}C , ^{41}Ca , ^{36}Cl , ^{26}Al , ^{10}Be , ^{53}Mn) in the Apollo-15 mission samples. Comparing these experimental results with the GEANT4.10 simulations we deduce some correction factor $Y_0 \sim 0.5$ for all considered radionuclides. We link it with overestimation of the secondary particle flux within the GEANT4.10 code which is also supported by some independent laboratory experiments. Taking this into account the ^{10}Be data can be explained assuming nearby Supernova explosion and its influence on the CR environment. We have also analyzed the ^{53}Mn data (longest considered lifetime) which are fully fitted within this assumption as well. This approach allows us to reach a conclusion about solar activity level during the last 10 million years which does not differ dramatically from its modern state.

DOI: 10.31725/0552-5829-2022-225-228

Галактические и солнечные космические лучи (ГКЛ и СКЛ) взаимодействуя с грунтом Луны, образуют радионуклиды с различными периодами полураспада ($T_{1/2}(^{14}\text{C}) = 5730$ лет; $T_{1/2}(^{26}\text{Al}) = 7.16 \cdot 10^5$ лет, $T_{1/2}(^{10}\text{Be}) = 1.4 \cdot 10^6$ лет, $T_{1/2}(^{53}\text{Mn}) = 3.7 \cdot 10^6$ лет). При относительно постоянном потоке КЛ за 4–5 периодов полураспада наступает динамическое равновесие между образованием изотопа и его распадом. В настоящей работе мы рассматриваем данные о зависимости наведенной активности от глубины в керне грунта, доставленного экспедицией Аполлон-15. Этот керн получен при бурении в области без близких метеоритных кратеров, что исключает влияние перемешивания. Современный поток протонов ГКЛ на поверхности Луны составляет в среднем $\sim 1 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$, а число альфа-частиц примерно в 10 раз меньше. Для протонов СКЛ средний поток с энергиями $E_p > 10 \text{ МэВ}$ составляет $\sim 100 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$. Спектр СКЛ значительно более мягкий по сравнению с ГКЛ. Частицы СКЛ быстро тормозятся из-за ионизацион-

ных потерь и дают мало вторичных частиц. Поэтому СКЛ дают заметный вклад в образование изотопов на глубинах только до ~ 10 г см⁻². Влияние активности Солнца на поток ГКЛ удобно описывать с помощью, так называемого, модуляционного потенциала $\Phi(t)$ [1]. Восстановление $\Phi(t)$ за последние 19000 лет по содержанию ¹⁴C в кольцах деревьев с учетом вариаций климата и магнитного поля Земли было проведено в работе [2].

Изотропно падающие на поверхность Луны первичные частицы (протоны и альфа-частицы) в ядерных взаимодействиях образуют каскад вторичных частиц. С помощью пакета GEANT4.10 [3] нами выполнены расчеты образования каскада и образования радионуклидов в ядерных реакциях в лунном грунте с элементным составом из керна миссии Аполлон 15. Расчеты для ¹⁴C проводились на шкале 19000 лет с использованием потенциала $\Phi(t)$, полученного в работе [2]. Сравнение с экспериментальными данными показало хорошее соответствие формы глубинного профиля активности с экспериментальными данными при завышенном значении скорости образования изотопа. Это обусловлено завышенным выходом вторичных частиц (прежде всего нейтронов) при моделировании каскада [5, 6]. После введения поправочного коэффициента расчеты и экспериментальные данные согласуются в пределах ошибок измерений. Сравнение со средним Φ из работы [2] дает совпадение в пределах точности его восстановления. Глубинный профиль ²⁶Al (рис. 1) позволяет оценить средний модуляционный потенциал за период ~ 2 миллионов лет как $\Phi \sim 480$ МВ, что соответствует среднему уровню солнечной активности [6].

Глубинный профиль другого радионуклида ¹⁰Be невозможно объяснить без учета взрыва близкой Сверхновой, произошедшей около 2.5 млн. лет назад [7] и зарегистрированной по измерениям повышенного содержания изотопа ⁶⁰Fe в океанических отложениях соответствующего возраста и на поверхности лунного грунта [8]. При этом в течение $\sim 10^3$ – 10^4 лет к спектру ГКЛ должен добавиться поток ускоренных на ударной волне частиц с жестким спектром со степенным показателем 1.7, тогда как подобный показатель у современных ГКЛ при энергиях выше 10 ГэВ оказывается около 2.7. Эта добавка не только увеличивает число образованных изотопов, но и изменяет форму глубинного профиля, так как ядерный каскад в грунте проникает на большую глубину и включает в себя большее число вторичных частиц (рис. 2). При этом уровень солнечной активности на шкале 4–5 миллиона лет оставался таким же, как и на шкале 2 миллиона лет.

Для ⁵³Mn динамическое равновесие достигается на шкале 10–15 миллионов лет. С учётом вклада Сверхновой в поток КЛ при тех же её параметрах как для ¹⁰Be, получено близкое значение модуляционного потенциала Φ (рис. 3).

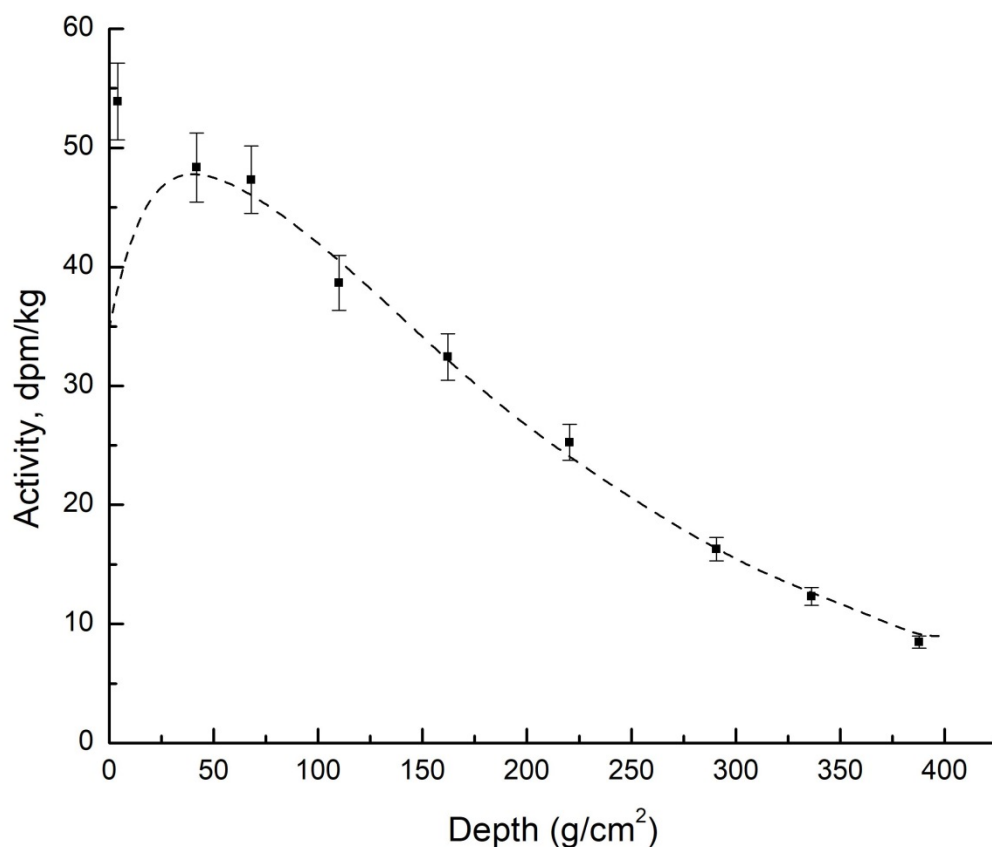


Рис. 1. Глубинный профиль наведенной активности ^{26}Al в единицах dpm/kg.

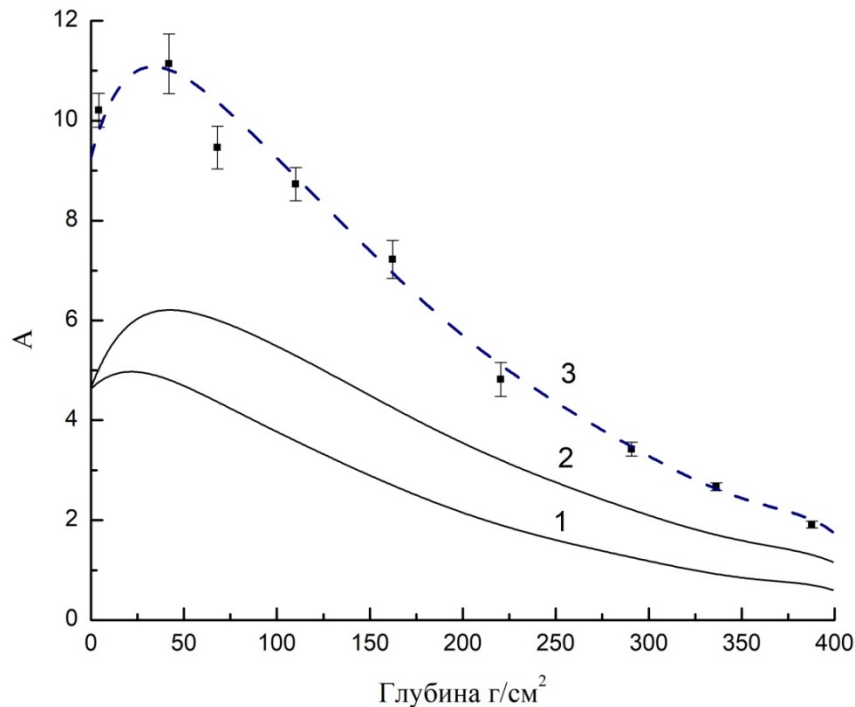


Рис. 2. Глубинные профили наведенной активности (A , в единицах dpm/kg) ^{10}Be : точки – экспериментальные данные [9], 1 – от ГКЛ, 2 – от вспышки Сверхновой, 3 – сумма.

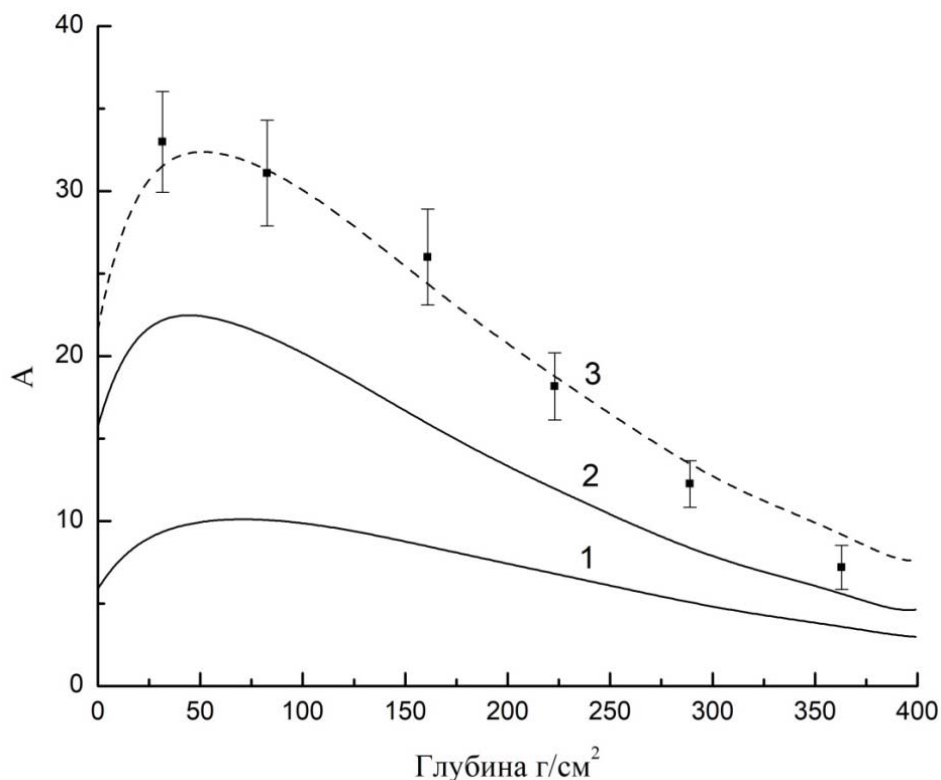


Рис. 3. Глубинные профили наведенной активности (A , в единицах dpm/kg) ^{53}Mn : точки – экспериментальные данные [10], 1 – от ГКЛ, 2 – от вспышки Сверхновой, 3 – сумма.

Таким образом, результаты нашей работы указывают на стабильный средний уровень солнечной активности за последние 10–15 миллионов лет при учёте существенного вклада в поток ГКЛ ускоренных частиц от вспышки близкой Сверхновой ~2.5 миллиона лет назад.

Литература

1. Usoskin, I.G. et al. // J. Geophys. Res., 2005, **110**, A12108.
2. Kudryavtsev I.V., Dergachev V.A. // Geomagnetism and Aeronomy, 2019, **59**, p. 1099.
3. Allison J. et al. // Nucl. Instr. and Methods, 2016, **835**, p. 186.
4. Pavlov A.K. et al. // MNRAS, 2019, **485**, p. 4441.
5. Mesick K.E et al. // Earth and Space Science, 2018, **5**, p. 324.
6. Frolov D. et al. // J. Phys.: Conf. Ser., **2103**, 1.
7. Wallner A. et al. // Nature, 2016, **532**, p. 69.
8. Fimiani L. et al. // Phys. Rev. Lett., 2016, **116**, p. 151104.
9. Nishiizumi K. et al. // Earth Planet. Sci. Lett., 1984, **70**, p. 157.
10. Nishiizumi K. et al. // Earth Planet. Sci. Lett., 1984, **70**, p. 164.