

**ОГРАНИЧЕНИЯ НА ПАРАМЕТРЫ
СОЛНЕЧНЫХ СУПЕРВСПЫШЕК ПО ДАННЫМ
О КОСМОГЕННОМ РАДИОУГЛЕРОДЕ В ЛУННОМ РЕГОЛИТЕ**

**Васильев Г.И.¹, Константинов А.Н.², Кудрявцев И.В.¹, Мелихова Е.С.²,
Остряков В.М.², Павлов А.К.¹**

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

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

**LIMITATIONS ON THE PARAMETERS OF SOLAR SUPERFLARES
BASED ON COSMOGENIC RADIOCARBON DATA
IN LUNAR REGOLITH**

**Vasilyev G.I.¹, Konstantinov A.N.², Kudryavtsev I.V.¹, Melikhova E.S.²,
Ostryakov V.M.², Pavlov A.K.¹**

¹Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia

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

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2023-39-42>

Recently samples with an abnormally high content of ^{14}C have been detected in the annual tree rings, which are interpreted as short-term (several years) increases in the cosmic ray flux at the atmospheric boundary. Most publications assume that such an increase occurred due to solar superflares. Other possible explanations may be connected with anomalous increases in the Galactic cosmic rays (GCRs) flux during the passage of dense interstellar clouds by the Solar System and Galactic gamma-ray bursts. In order to confirm the observed amount of cosmogenic isotopes ^{14}C , ^{10}Be , ^{36}Cl produced in the Earth's atmosphere the spectrum of protons in solar superflares has to be extremely hard. To check this hypothesis we make use the measurements of the radiocarbon content profile in lunar regolith core delivered by the Apollo-15 as an integral detector of GCRs and solar cosmic ray (SCR) flux. Subtracting the contribution of GCRs we estimate the possible fluxes and spectra of SCRs in hypothetical superpowerful events that contradict the superflare hypothesis.

В последнее время в радиоуглеродном ряду были обнаружены события (их около десяти) с аномально высоким содержанием ^{14}C и быстрым его нарастанием (порядка года – нескольких лет). Наиболее известен импульс 774–775 г. н.э. [1]. В большинстве работ предполагается, что такие события могут быть вызваны супермощной солнечной вспышкой или серией мощных вспышек [2]. Альтернативные гипотезы рассматривают в качестве причины сжатие гелиосферы при прохождении солнечной системы через плотное компактное межзвездное облако [3], а также Галактический гамма-всплеск [4].

В таблице приведены все обнаруженные к настоящему времени события с аномальным ростом ^{14}C за последние 10000 лет. Для первых 4-х событий измерены также коррелированные увеличения содержания ^{10}Be и

^{35}Cl в ледяных ядрах. Измеренные отношения этих изотопов возможно объяснить только при экстремально жестких спектрах солнечных космических лучей (СКЛ) в суперсобытиях. В модельных расчётах [2–4, 7] предполагалось, что такие события имели спектры, подобные экспериментально измеренным спектрам вспышек 1956 и 2005 гг., которые являются наиболее жесткими из наблюдавшихся современных вспышек.

Для упомянутых событий в таблице приведены: измеренные величины $\Delta^{14}\text{C}$, предполагаемые спектры СКЛ в этих событиях, соответствующая величина производства радиоуглерода в атмосфере Земли и наличие (или отсутствие) данных по космогенным ^{10}Be и ^{36}Cl . Для последних четырех событий таблицы сделано предположение, что их спектры подобны спектру вспышки 2005 года.

В супервспышках при резком возрастании потока СКЛ увеличивается скорость образования ^{14}C в лунном грунте. С учётом его распада это отражается на глубинном распределении измеряемой активности. В ядрах лунного грунта, доставленного Аполлоном-15, были проведены детальные измерения глубинного профиля активности ^{14}C [10]. В нём наблюдается резкое падение концентрации радиоуглерода в верхнем слое до глубины 5 г/см^2 . Далее, глубже наблюдается постепенный рост с максимумом около 50 г/см^2 и дальнейшим спадом. Глубинный профиль формируется в результате ядерных взаимодействий частиц ГКЛ и СКЛ. Поскольку СКЛ имеют в среднем меньшую по сравнению с ГКЛ энергию, они быстро тормозятся и дают существенный вклад в генерацию ^{14}C только в первых сантиметрах грунта. При расчете с помощью GEANT4 вклада ГКЛ в глубинный профиль активности ^{14}C нами учитывались вариации потока ГКЛ в результате солнечной модуляции (рис. 1). При этом мы использовали зависимость модуляционного потенциала $\phi(t)$, восстановленную за последние 19000 лет по космогенным изотопам на Земле [11] с локальным межзвездным спектром ГКЛ из работы [12].

Таблица. Измеренные в $\Delta^{14}\text{C}$ события за последние 10000 лет.

дата	$\Delta^{14}\text{C}$, ‰	спектр	Q , ат/см ² с	^{10}Be ^{36}Cl
775 CE [7]	17.6 ± 0.5	20.01.2005	$1.9 \cdot 10^8$	+ +
993 CE [7]	9.6 ± 0.6	20.01.2005	$5.1 \cdot 10^7$	+ +
660 BCE [4]	12.5 ± 1.1	20.01.2005	$1.6 \cdot 10^8$	+ +
7176 BCE [6]	19.5 ± 0.6	23.02.1956	$1.5 \cdot 10^8$	+ +
1052 CE [2]	5.9 ± 1.1	20.01.2005	$6.2 \cdot 10^7$	– –
1279 CE [2]	6.5 ± 1.6	20.01.2005	$7.7 \cdot 10^7$	– –
5410 BCE [5]	5.6 ± 0.8	20.01.2005	$9 \cdot 10^7$	– –
5259 BCE [3]	19.1 ± 0.6	20.01.2005	$1.9 \cdot 10^8$	– –

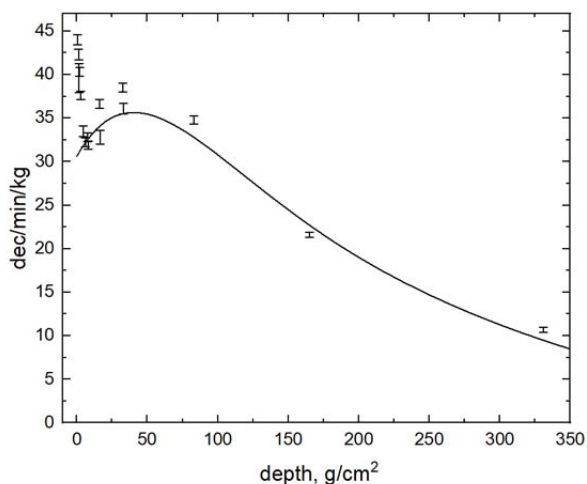


Рис. 1. Глубинный профиль активности ^{14}C в лунном грунте от ГКЛ

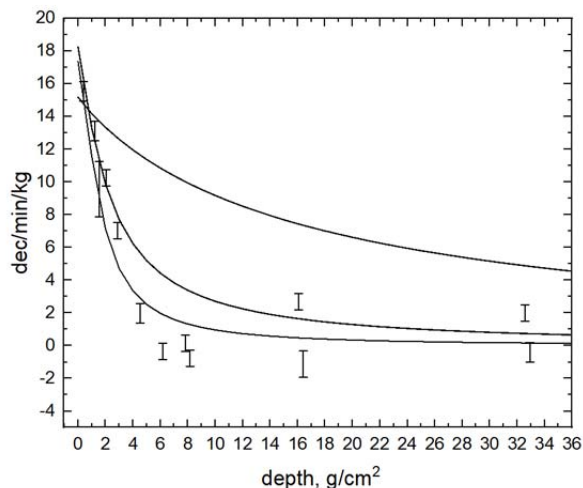


Рис. 2. Активность ^{14}C под действием усредненного потока СКЛ при степенных спектрах с показателем $\gamma = 2$, (верхняя кривая), $\gamma = 4$ (средняя) и $\gamma = 6$ (нижняя).

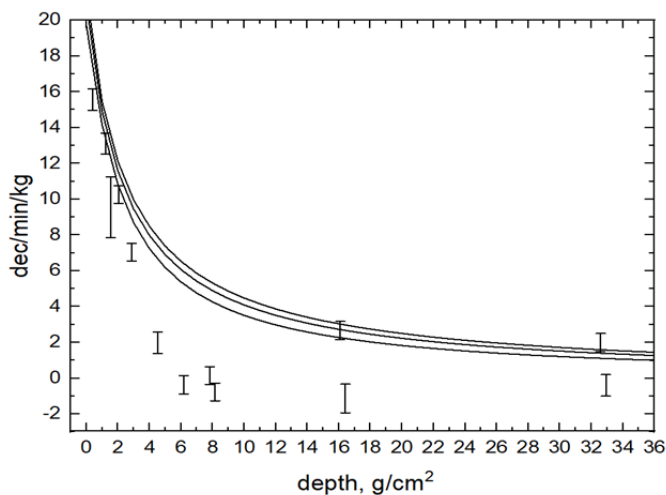


Рис. 3. Активность ^{14}C . Нижняя кривая – учёт среднего потока СКЛ с $\gamma = 6$ плюс вклад от первых 4-х событий таблицы; средняя – учёт всех событий таблицы; верхняя – с дополнительным таким же вкладом подобных событий за период 10000–20000 лет назад.

После вычитания вклада ГКЛ мы рассчитали вклад усреднённого за этот период потока СКЛ со спектром частиц $E^{-\gamma}$ для различных значений γ (рис. 2). На следующем рис. 3 представлены результаты вычисления дополнительного вклада от супервспышек, приведенных в таблице, а также возможный вклад подобных событий в период 10000–20000 лет назад, считая его таким же (с учетом распада) как и в предыдущие 10000 лет.

Выводы

1. Для корректного описания глубинного профиля скорости образования ^{14}C в верхнем слое лунного грунта за последние 20000 лет требуется,

чтобы усреднённый спектр СКЛ был «мягким» с показателем спектра $\gamma \approx 6$.

2. Интерпретация обнаруженных по измерениям ^{14}C на Земле суперсобытий как солнечных супервспышек с «жестким» спектром противоречит измеренному ходу глубинного профиля активности ^{14}C в лунных кернах.

Литература

1. Miyake F. et al. // Nature, 2012, **486**, 240.
2. Brehm N. et al. // Nature Geoscience, 2021, **14**, 10.
3. Brehm N. et al. // Nature Com., 2022, **13**, 1196.
4. O'Hara P. et al. // Multiradionuclide 10.1038/ncomms9611.
5. Miyake F. et al. // Geoph. Res. Lett., 2021, **48**, e2021GL093419.
6. Paleari C.I. et al. // Nature Com., 2022, **13**:214.
7. Mekhaldi F. et al. // Nature Com., 2015, **6**:8611.
8. Pavlov A.K. et al. // MNRAS, 2019, **485**, 4441.
9. Pavlov A.K. et al. // Astron. Lett. J., 2014, **40**, 640.
10. Jull A.J. et al. // Geochimica et Cosmochimica Acta, 1998, **62**, 3025.
11. Frolov D.A. et al. // J. of Physics: Conferens Series 2021 **2103** 012007.
12. Orlando E. // MNRAS, 2018, **475**, 2724.