ИЗОТОПНЫЕ СЛЕДЫ СЖАТИЙ ГЕЛИОСФЕРЫ, ВЫЗВАННЫХ СТОЛКНОВЕНИЯМИ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ С ПЛОТНЫМИ МЕЖЗВЕЗДНЫМИ ОБЛАКАМИ

**Васильев Г.И.¹, Константинов А.Н.², Кудрявцев И.В.¹, Огурцов М.Г.¹,
Остряков В.М.², Павлов А.К.¹, Фролов Д.А.^{1,2}**

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого, Россия

ISOTOPIC IMPRINTS OF HELIOSPHERE COLLAPSE CAUSED BY INTERACTION OF THE SOLAR SYSTEM WITH DENSE INTER- STELLAR CLOUDS

**Vasilyev G.I.¹, Konstantinov A.N.², Koudriavtsev I.V.¹,
Ogurtsov M.G.¹, Ostryakov V.M.², Pavlov A.K.¹, Frolov D.A.^{1,2}**

¹Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia

²Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Encounter of the Solar System with dense interstellar cloud may result in collapse of the heliosphere. In this case, the modulating effect of solar activity on the Galactic cosmic rays (GCRs) decreases (up to its complete disappearance). As a result, both the GCR flux near the Earth's orbit and the production rate of ^{10}Be , ^{14}C and ^{36}Cl isotopes in the atmosphere increase. The rise time of the isotope production rate is determined by the relative velocity of the solar system and the cloud, and the interaction time – by the size of the cloud. In this paper, we analyze the events dated approximately 660, 813, and 5480 BC, discovered by a sharp increase in the concentration of radiocarbon in annual tree rings and having approximately the same rise times. Also the 660 BC event was manifested in polar ice cores and detected in the concentrations of ^{10}Be and ^{36}Cl . Additionally, interstellar clouds are characterized by a much larger $^3\text{He} / ^4\text{He}$ isotopic ratio than in the Earth's atmosphere, so the passage of the cloud changes the isotopic composition of helium in air. The increased $^3\text{He} / ^4\text{He}$ ratio was measured in parts of the ice core from the Vostok Antarctic station, which correspond to the events of 660 and 813 BC.

DOI: 10.31725/0552-5829-2019-79-82

Введение

Изменения содержания радиоуглерода в земной атмосфере могут быть вызваны различными процессами, среди которых чаще всего рассматриваются галактические гамма-всплески, изменения геомагнитного поля, солнечные вспышки, солнечная модуляция галактических космических лучей (ГКЛ), а также изменения климата. Все перечисленные процессы оставляют следы в радиоизотопных архивах, различающиеся по амплитуде и временному ходу, а также по степени их влияния на конкретные изотопы.

В [1] нами была выдвинута гипотеза о влиянии неоднородностей межзвездной среды на модуляцию ГКЛ. Там же рассмотрен один из возмож-

ных таких случаев в районе 5480 г. до н.э. В данной работе мы рассматриваем 3 события, которые могут объясняться этим процессом: 5480, 813 и 660 гг. до н.э. [2, 3].

Гипотезы о причинах

Все 3 события показывают одинаковый фронт нарастания и похожие амплитуды (рис. 1). Попытка связать событие 660 г. до н.э. с целой серией солнечных вспышек [4] сталкивается с трудностью, поскольку данные по ^{14}C для трёх независимых событий показывают близкий временной ход роста и близкую амплитуду. Это означает, что последовательность солнечных вспышек, вызывающих обсуждаемый рост, должна быть одинакова для этих трёх событий, что представляется маловероятным. В рамках гипотезы о столкновении Солнечной системы с межзвёздными (МЗГ) облаками такое поведение $^{14}\text{C}(t)$ выглядит естественно: фронт определяется

Рис. 1. Возрастание концентрации ^{14}C в 5480, 813 и 660 гг. до н.э., нормированное на передний фронт.

скоростью движения Солнечной системы относительно МЗГ, а амплитуда — полным отсутствием модуляции и облучением Земли локальным межзвёздным спектром ГКЛ (LIS) (рис. 1). При этом общая продолжительность события зависит от размеров облака (или неоднородности в МЗГ). Повышенное содержание ^{14}C между 813 и 660 гг. до н.э. может быть как следствием влияния неоднородностей межзвёздной среды, так и глобальным минимумом солнечной активности. Решающим аргументом может быть измерение отношения $^3\text{He}/^4\text{He}$ с хорошим временным разрешением, т.к. повышение этого отношения при прохождении плотного облака меж-

звездного газа связано с поступлением ^3He непосредственно из межзвездной среды, а возвращение к исходному значению отношения – с процессами диссипации ^3He из атмосферы.

Изотопное отношение $^3\text{He}/^4\text{He}$

В работе [5] измерено отношение изотопов гелия во льду с антарктической станции Восток. Обнаружено отношение $^3\text{He}/^4\text{He} \sim 1,017$ к содержанию этих изотопов в атмосфере в образце льда с глубины 120–145 м. При этом в других образцах с глубин до 2 500 м это отношение меньше единицы ($0,97 \pm 0,03$) при атмосферном отношении изотопов гелия $1,38 \cdot 10^{-6}$, как и можно было ожидать, исходя из более высокой подвижности атома ^3He . В том числе отношение 0,985 зарегистрировано в образце льда с глубины 116–165 м, включающего вышеуказанный слой с повышенным содержанием ^3He . То есть, можно констатировать, что повышение содержания гелия-3 было недолгим, и имелся внешний источник изотопа ^3He . Исходя из скорости аккумуляции льда на станции Восток в голоцене $2,2 \text{ г/см}^2 \text{ год}$ [6], можно оценить возраст образца с глубин 120–145 м: 5–6 тысяч лет. И, соответственно, минимальный возраст гелия во льду 2,4–3,4 тысячи лет. Примерно такие же результаты получены в [3]: 1,1–2,4 тысячи лет для азота и кислорода. Еще раз подчеркнем, что эти оценки относятся к тяжелым молекулам и могут быть использованы для гелия только как нижний предел.

Изотопный след в ^{10}Be и ^{36}Cl

Для события 660 г. до н.э. существует «изотопный след» (измерение ^{10}Be и хлора-36 в гренландских льдах), не противоречащий нашей гипотезе. По данным [4] существует импульсное повышение ^{10}Be в двух керне (GRIP и NGRIP). В керне GRIP, кроме повышения ^{10}Be измерено также повышение ^{36}Cl вблизи 660 года до н.э. общей продолжительностью для обоих изотопов около 6 лет. Поскольку время жизни обоих изотопов в атмосфере составляет не более 2–3 лет, что в несколько раз меньше аналогичного времени для ^{14}C , то спад сигнала радиоуглерода в событии 660 г. до н.э. оказывается существенно медленнее, чем для двух других изотопов. Важно отметить, что повышенное содержание обоих изотопов наблюдалось в течение 6 лет, то есть было кратковременным. Это прямо противоречит гипотезе о глобальном минимуме солнечной активности, поскольку их продолжительность на порядок больше. По результатам наших расчетов отношение скоростей образования $^{10}\text{Be}/^{36}\text{Cl}$ для LIS составляет 5–6 в зависимости от вида LIS и модели переноса ^{10}Be . Отношение концентраций этих изотопов в керне GRIP составляет порядка шести как за период около 90 лет, охватывающий событие 660 до н.э., так и в самом событии. При этом для вспышки 1956 года с самым жестким известным спектром уско-

ренных солнечных частиц это отношение равно 1,2–2,8 в зависимости от модели переноса и выпадения бериллия в атмосфере.

Выводы

- Наличие 3-х событий с одинаковым передним фронтом нарастания и амплитудой сигнала в ^{14}C практически исключает гипотезу о сверхмощной солнечной вспышке или о последовательности таких вспышек.
- Короткий период возрастания содержания во льду ^{10}Be и ^{36}Cl для события 660 г. до н.э. и короткое время нарастания в сигнале ^{14}C для всех событий делает крайне маловероятной гипотезу о глобальных минимумах солнечной активности.
- Наличие избытка гелия-3 во льду соответствующего возраста является существенным дополнительным аргументом в пользу нашей гипотезы.

Таким образом, гипотеза о влиянии на гелиосферу неоднородностей межзвездной среды, как причины событий 660, 813 и 5480 гг. до н.э. кажется наиболее вероятной. Решающими тестом могут быть измерения ^{10}Be , ^{36}Cl и ^3He во льдах для всех трех событий, которые на данный момент отсутствуют.

Работа частично поддержана грантом РФФИ N°18-02-00583.

Литература

1. *A.K. Pavlov et al.* On the radiocarbon increase around 5480 BC as a result of the Solar system encounter with interstellar cloud // *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 2019, vol. 4445, pp. 4441–4445.
2. *F. Miyake et al.* Large ^{14}C excursion in 5480 BC indicates an abnormal sun in the mid-Holocene // *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 2017, vol. 114, no. 5, pp. 881–884.
3. *J. Park et al.* Relationship between solar activity and $\Delta^{14}\text{C}$ peaks in AD 775, AD 994, and 660 BC // *Radiocarbon*, 2017, vol. 59, no. 4, pp. 1147–1156.
4. *P. O'Hare et al.* Multiradionuclide evidence for an extreme solar proton event around 2,610 B.P. (<660 BC) // *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 2019, vol. 116, no. 13, pp. 5961–5966.
5. *P. Jean-Baptiste et al.* Constraints on hydrothermal processes and water exchange in Lake Vostok from helium isotopes // *Nature*, 2001, vol. 411, no. 6836, pp. 460–462.
6. *J.M. Barnola et al.* CO₂-climate relationship as deduced from the Vostok ice core: a re-examination based on new measurements and on a re-evaluation of the air dating // *Tellus B*, 1991, vol. 43, no. 2, pp. 83–90.