

АТМОСФЕРНЫЙ ^3He КАК ИНДИКАТОР ВОЗДЕЙСТВИЯ МЕЖЗВЁЗДНОГО ГАЗА НА СОЛНЕЧНУЮ МОДУЛЯЦИЮ

Васильев Г.И.¹, Константинов А.Н.², Острыakov 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

ATMOSPHERIC ^3He AS AN INDICATOR OF INTERSTELLAR GAS AFFECTING THE SOLAR MODULATION

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

¹Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia

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

Interaction of the heliosphere with interstellar inhomogeneities (clouds or cloudlets) may result in the Galactic cosmic ray (GCR) flux changes independently on the solar activity. During such periods intense accretion of neutral gas from clouds into the terrestrial atmosphere occurs. The $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratio in the interstellar gas exceeds the same ratio in the atmosphere by two orders of magnitude. So, the consequence of such an encounter could be manifested and detected in ice kerns by measuring the $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratio. The dating of these increases in ice covers some growths in radiocarbon and ^{10}Be content which are usually interpreted as powerful solar superflares (or sequence of flares). However, occurrence probability for such events during the last 15 kyr turns out to be much more frequent than those observed on Sun-like stars by Kepler mission.

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2024-53-56>

Введение

Основными гипотезами, объясняющими резкие повышения концентрации радиоуглерода в кольцах деревьев, являются глубокие минимумы солнечной активности (типа Маундеровского), солнечные супервспышки и взаимодействие гелиосферы с малоразмерными (10–100 а.е.) межзвёздными неоднородностями, или облаками. В последнем случае имеет место аккреция нейтрального газа на Землю, последствия которой могут быть обнаружены в ядрах полярных льдов. Это становится возможным, поскольку отношение $^3\text{He}/^4\text{He}$ в межзвёздном газе (1.6×10^{-4}) существенно превышает это отношение в земной атмосфере (1.38×10^{-6}). При таком взаимодействии, если плотность облака достаточно велика, происходит сжатие гелиосферы вплоть до размеров ~ 0.22 а.е. [1], а на земную атмосферу в этом случае попадает локальный межзвёздный спектр галактических космических лучей (ГКЛ). Поскольку этот спектр уже не зависит от солнечной активности, то это имеет последствия для образования различных космогенных изотопов в атмосфере Земли, приводя к некоторой универсальности такого образования.

Исходные данные

Согласно существующим моделям отношение концентраций изотопов $R_a = {}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ в современной атмосфере определяется балансом их прихода из космоса и земных недр, а также ухода в межпланетное пространство. Поступающий из литосферы в атмосферу ${}^4\text{He}$, образуется при α -распаде тяжёлых элементов (U, Th), а ${}^3\text{He}$ – только из мантии, как «первичный» захваченный при образовании Земли. Поэтому отношение ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ в поступающем газе составляет $\sim 10^{-5}$. С другой стороны, существует захват гелия из межзвездного газа и солнечного ветра с высоким изотопным отношением $R \sim 5 \times 10^{-4}$. Величина R в образцах ледяного керна измеряется относительно его современного атмосферного значения R_a , т.е. $\beta \equiv R/R_a$ и в атмосфере может меняться со временем. Природным архивом, сохраняющим данные по содержанию изотопов гелия, является полярный лед Антарктиды и Гренландии. В таблице приведены измерения β во льду со станции Восток в Антарктиде [2].

Table 1 Helium isotope data

Depth (m)	[${}^4\text{He}$] (nmol kg $^{-1}$)	R/R_a
Previous sampling (1989–92)*		
116–165	10.4 ± 1.2	0.985 ± 0.011
120–145	11.9 ± 1.4	1.017 ± 0.031
1,252–1264	13.3 ± 0.5	0.943 ± 0.007
2,441–2501	13.2 ± 0.9	0.954 ± 0.015
Deep core sampling (1997)		
3,530	9.5 ± 0.8	1.111 ± 0.005
3,531	8.7 ± 0.8	1.098 ± 0.005
3,535†	9.8 ± 0.8	0.951 ± 0.005
3,535†	11.9 ± 0.8	0.945 ± 0.005
3,540	29.1 ± 0.8	0.282 ± 0.005
3,551	38.4 ± 0.8	0.262 ± 0.005
3,565	36.0 ± 0.8	0.225 ± 0.005
3,568	35.8 ± 0.8	0.235 ± 0.005
3,576	32.1 ± 0.8	0.253 ± 0.005
3,578	34.5 ± 0.8	0.240 ± 0.005
3,580	35.8 ± 0.8	0.327 ± 0.005
3,599	33.1 ± 0.8	0.191 ± 0.005
3,605	31.8 ± 0.8	0.267 ± 0.005
3,608	32.5 ± 0.8	0.219 ± 0.005

Задачей этой работы являлось нахождение границы между льдом ледника и намёрзшим льдом из подлёдного озера. Эта граница была обнару-

жена на глубине 3535–3540 метров, что видно по резкому изменению R/R_a (обведено в рамку). Нас же интересуют повышения β на гораздо меньших глубинах, которые ещё могут быть датированы. Следует заметить, что обмен газами между верхним слоем керна и атмосферой может происходить только до тех пор, пока плотность льда меньше $\sim 0.80\text{--}0.83\text{ г/см}^3$. Средняя плотность полностью сформировавшегося льда на глубине $>40\text{ м}$ в керне составляет $\sim 0.92\text{ г/см}^3$. Таким образом, захваченный в керне газ оказывается моложе возраста самого льда примерно на 2600 лет [3, 4]. Такие исследования были проведены, в основном, для CO_2 , но также и для N_2 и O_2 . Для гелия, как более легко диффундирующего газа, подобная оценка может служить лишь верхним пределом. Из-за бóльшей подвижности ^3He сегодняшнему отношению β в атмосфере соответствует величина $\sim 0,95$ во льду. В образцах с глубин 120–145 м и 3530–3531 м в указанной работе были зафиксированы повышения β , что говорит о том, что предполагаемые события имели место в прошлом неоднократно. Однако на больших глубинах лёд практически не датируется, тогда как датировка первого из этих повышений возможна. А именно, газ в образце 120–145 м имеет возраст 2000–3000 лет при возрасте льда 4600–5600 лет. Возможная ошибка датировки оценивается ~ 1000 лет [3]. Существенный избыток ^3He в атмосфере ($\sim 7\%$ для образца 120–145 м) в этот период по сравнению с современной атмосферой требует как наличия источника, обогащенного ^3He , так и высокой скорости его потерь из атмосферы за последние ~ 3000 лет. При современном содержании ^3He в столбе атмосферы $1,6 \times 10^{14}\text{ ат/см}^2$ эта скорость может быть оценена $\sim 100\text{ ат/см}^2\text{с}$, что не противоречит теоретическим моделям диссипации гелия из верхней атмосферы. В этих моделях основными процессами потерь рассматриваются термическая (джинсовская) диссипация из экзосферы Земли и «полярный ветер» (поток ионов вдоль открытых силовых линий магнитного поля в полярных районах) [5, 6].

Результаты и обсуждение

В рассматриваемый нами период увеличения содержания ^3He были обнаружены два события (813 BCE и 660 BCE, см. рисунок) с резким ростом содержания космогенного ^{14}C . Для более древнего аналогичного события 5480 BCE измерения ^3He в керне отсутствуют. Подобные события могут объясняться увеличением потока ГКЛ на орбите Земли за счёт сжатия гелиосферы при прохождении Солнечной системы через плотные малоразмерные облака межзвёздного газа. В рамках этой гипотезы события должны сопровождаться интенсивной аккрецией межзвёздного гелия с высоким относительным содержанием ^3He , которая может обеспечить наблюдаемое увеличение содержания ^3He .

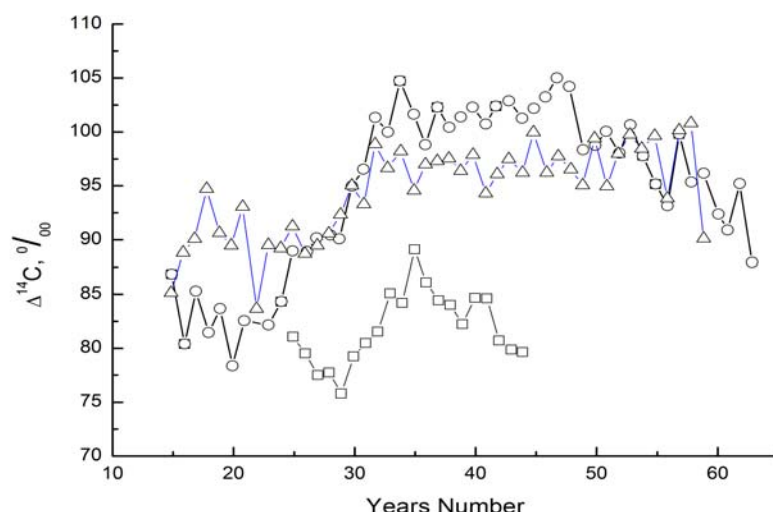


Рисунок. Увеличение содержания радиоуглерода в атмосфере Земли ($\Delta^{14}\text{C}$) для событий 5480 BCE (круги), 813 BCE (треугольники) и 660 BCE (квадраты) [7, 8].

Выводы

1. По нашему мнению, по данным об отношении $^3\text{He}/^4\text{He}$ во льдах станции Восток можно говорить о вероятном зафиксированном сжатии геосферы примерно 2–3 тысячи лет назад, которое привело к увеличению потока ГКЛ.

2. Время диссипации гелия-3 из атмосферы по этим же данным составляет около 3000 лет, что кардинально отличается от аналогичных оценок на основе геофизических данных (~100 000 лет).

Литература

1. Opher M., A. Loeb and J.E.G. Peek // *Nature Astronomy*. 2024. V. 8. P. 983.
2. Jean-Baptiste P., J.-P. Petit, V.Ya. Lipenkov et al. // *Nature*. 2001. V. 411. P. 460.
3. Bender M.L., G. Floch, J. Chappellaz // *J. of Geophys. Res.* 2006. V. 111. D21115.
4. Barnola J.M., P. Pimienta, D. Raynaud, and Y.S. Korotkevich // *Tellus B*. 1991. V. 43 (2). 83. [https://doi: 10.3402/tellusb.v43i2.15249](https://doi.org/10.3402/tellusb.v43i2.15249)
5. Pudovkin M.I., I.N. Tolstikhin, I.V. Golovchanskaya // *Geochemical Journal*. 1981. V. 15. P. 51.
6. Ganguli S.B. // *Reviews of Geophysics*. V. 34. № 3. P. 311.
7. Park J., J. Southon, S. Fahrni et al. // *Radiocarbon*. 2017. V. 59. P. 1147.
8. Jull A., I. Panyushkina, F. Miyake et al. // *Radiocarbon*. 2018. V. 60. P. 1237.