

УДК 551.590.21

## КАКУЮ ИНФОРМАЦИЮ МОЖНО ПОЛУЧИТЬ ИЗ ДАННЫХ О КОНЦЕНТРАЦИЯХ ПРИРОДНЫХ РАДИОНУКЛИДОВ Be-10 и C-14?

Ю. И. Стожков

Проведено сравнение рядов данных о концентрации радиоизотопа Be-10 в гренландском и антарктическом льду и C-14 в кольцах деревьев. Показано, что между этими рядами данных имеются значительные расхождения. Радиоизотопы Be-10 и C-14 образуются в атмосфере Земли космическими лучами. Однако сопоставление их концентраций с данными по космическим лучам, полученными в стратосферных измерениях, дает низкий коэффициент корреляции с потоком галактических космических лучей. Во временных зависимостях данных по Be-10 и C-14 наблюдается достаточно сильная связь с глобальными изменениями температуры приземного слоя воздуха в период 1880–1986 гг., когда имелись одновременные измерения этих величин.

Сделан вывод о том, что на концентрации атомов Be-10 и C-14 существенное влияние оказывают атмосферные процессы, а временные зависимости концентраций этих радиоизотопов главным образом содержат информацию об изменявшихся условиях в атмосфере, в частности, о глобальной температуре приземного слоя воздуха. Данные по Be-10 и C-14 нецелесообразно использовать для восстановления потоков галактических космических лучей или каких-либо характеристик солнечной активности в прошлом.

В настоящее время имеются однородные ряды данных о концентрациях радионуклидов Ве-10 и С-14, которые охватывают длительные периоды времени от середины 1980-х годов до нескольких сотен тысяч лет назад [1–8]. Эти радионуклиды образуются в атмосфере Земли при ядерных взаимодействиях галактических космических лучей (ГКЛ) с ядрами атомов воздуха и затем попадают на поверхность Земли. Атомы Ве-10 хранятся в ледяных массивах Гренландии и Антарктиды, а атомы С-14 – в кольцах деревьев. Периоды полураспада радионуклидов Ве-10 и С-14 равны 1.5 млн. лет и 5730 лет, соответственно.

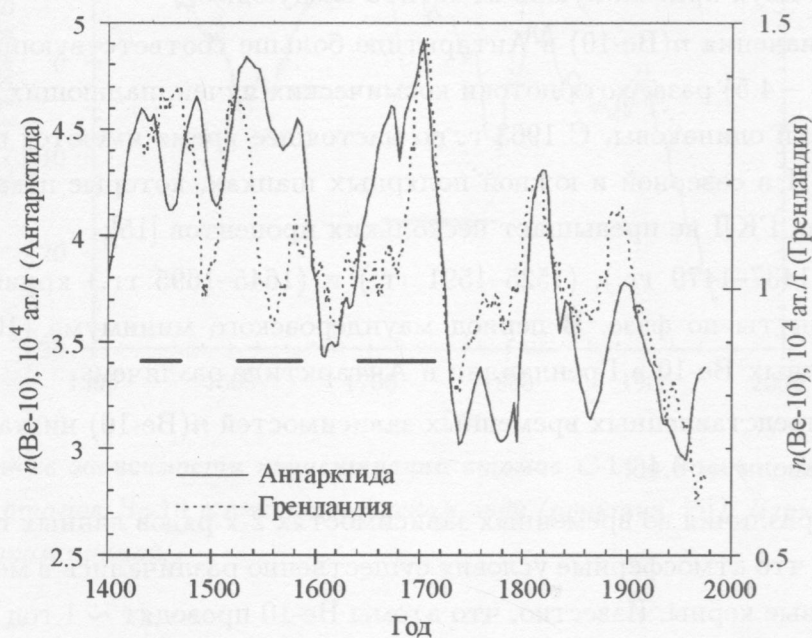


Рис. 1. Концентрации атомов Ве-10, полученные из ледовых ядер Антарктиды (сплошная кривая) и Гренландии (пунктир) [1, 3, 11]. Все данные сглажены с периодом 22 года. Периоды (1437–1479 гг.), (1525–1591 гг.) и (1645–1715 гг.) выделены отрезками прямых (см. текст).

Радионуклиды содержат в себе информацию о потоках ГКЛ в прошлом. Поэтому по концентрациям атомов Ве-10 и С-14, используя модели и известные сечения взаимодействий космических частиц с ядрами атомов воздуха, восстанавливают потоки ГКЛ в прошлом [см., например, 9–11]. Т.к. потоки ГКЛ модулируются солнечной активностью, то по данным Ве-10 также восстанавливают солнечную активность и гелиосферное магнитное поле в прошлом [12, 13]. При этом молчаливо предполагается, что отсутствуют другие факторы, которые могут существенно влиять на процессы выпадения радионуклидов из атмосферы на Землю.

В работе показано, что по данным о концентрациях радионуклидов Be-10 и C-14 проблематично восстановить потоки ГКЛ в прошлом, т.к. определяющим фактором во временных зависимостях концентраций этих атомов являются изменения в атмосферных процессах [14].

*Сравнение рядов данных Be-10 и C-14.* Имеются 2 ряда данных по Be-10, в которых зависимость концентраций этих атомов  $n(\text{Be-10})$  от времени получена из ледовых кернов Гренландии и Антарктиды, соответственно [1, 3, 12]. Эти данные представлены на рис. 1.

При сравнении двух кривых нужно отметить следующее:

– видно, что значения  $n(\text{Be-10})$  в Антарктиде больше соответствующих величин в Гренландии в (3.5 – 4.5) раза, хотя потоки космических лучей, падающих на полярную шапку, практически одинаковы. С 1963 г. по настоящее время имеются прямые измерения потоков ГКЛ в северной и южной полярных шапках, которые показывают, что различие в потоках ГКЛ не превышает нескольких процентов [15];

– в периоды (1437–1479 гг.), (1525–1591 гг.) и (1645–1695 гг.) кривые на рис. 1 существенно сдвинуты по фазе. В период маундеровского минимума (1645–1715 гг.) временной ход данных Be-10 в Гренландии и Антарктиде различен;

– корреляция представленных временных зависимостей  $n(\text{Be-10})$  низкая, коэффициент корреляции равен  $r = 0.46$ .

Наблюдаемые различия во временных зависимостях 2-х рядов данных по Be-10 можно объяснить тем, что атмосферные условия существенно различались в местах, где были получены ледовые керны. Известно, что атомы Be-10 проводят  $\sim 1$  год в атмосфере, прежде чем попадут на поверхность Земли. За это время происходит перемешивание воздушных масс полярных, средних и экваториальных широт. Кроме того, величина осаждения радионуклидов на земную поверхность зависит от интенсивности осадков. В Антарктиде, где существует циркумполярный вихрь, уровень осадков значительно ниже, чем в Гренландии, и перемешивание воздушных масс не такое интенсивное, как в северной полярной шапке. Поэтому концентрация радионуклидов в антарктическом льду значительно выше, чем в гренландском [16].

На рис. 2 сравниваются временные зависимости  $n(\text{C-14})$  в кольцах деревьев и  $n(\text{Be-10})$  в антарктическом льду [5, 17]. Такое сравнение правомерно, т.к. имеется один и тот же источник атомов Be-10 и C-14 – взаимодействие ГКЛ с ядрами атомов атмосферы (хотя энергии частиц ГКЛ, которые эффективно образуют атомы Be-10 и C-14, несколько различны). Видно, что, как и на рис. 1, две кривые имеют заметные отли-

чия. Например, в период (1705–1795) гг. временные изменения  $n(\text{Be-10})$ , полученные из кернов антарктического льда, и  $n(\text{C-14})$  существенно различаются.

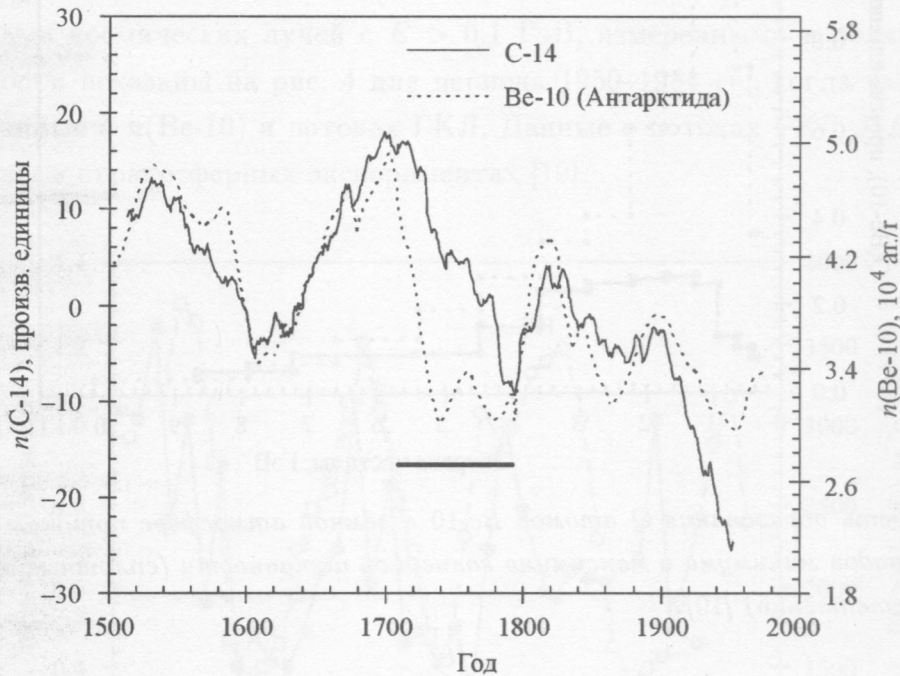


Рис. 2. Временные зависимости концентрации атомов C-14 в кольцах деревьев (сплошная кривая, [16]) и атомов Be-10 в антарктическом льду (пунктир, [5]). Период (1705–1795 гг.) отмечен отрезком прямой.

Различия в обсуждаемых временных зависимостях концентраций атомов Be-10 и C-14 наиболее вероятно вызваны различным изменением атмосферных условий в полярной шапке и в области средних широт. Атомы Be-10 проводят  $\sim 1$  год в атмосфере, прежде чем попадут на поверхность Земли (в нашем случае в гренландский и антарктический льды). Атомы C-14 проводят (5–6) лет в различных резервуарах (атмосфера, океан, почва), прежде чем попадут в кольца деревьев. Поэтому изменения атмосферных условий влияют на скорость выпадения атомов Be-10 на поверхность Земли и на переходы атомов C-14 из одного резервуара в другой и, в конечном счете, на их концентрацию в кольцах деревьев. Если бы мы использовали эти 3 ряда данных для восстановления потоков ГКЛ или солнечной активности в прошлом, то мы бы получили существенно отличающиеся друг от друга значения потоков ГКЛ и уровней солнечной активности.

*Сравнение потоков космических лучей и данных по Be-10. За период 1950–1985 гг.*

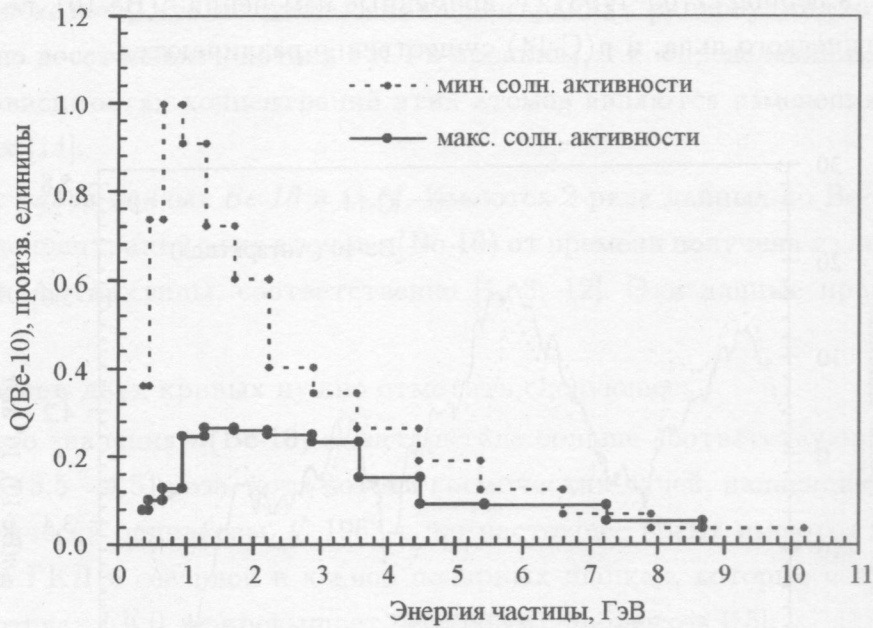


Рис. 3. Скорость образования  $Q$  атомов  $Be-10$  в земной атмосфере потоком космических лучей для периодов минимума и максимума солнечной активности (сплошные и пунктирные линии, соответственно) [10].

имеются данные  $n(Be-10)$  и данные измерений потоков ГКЛ с  $E > 0.1$  ГэВ на границе земной атмосферы [7, 14]. Как уже упоминалось выше, ядра  $Be-10$  образуются в реакциях “скалывания” при взаимодействии космических лучей с ядрами атомов воздуха. Скорость образования  $Be-10$  зависит от величины потока космических лучей и их энергетического спектра. На рис. 3 приведена рассчитанная скорость образования ядер  $Be-10$  в атмосфере в зависимости от энергии первичной частицы и спектра частиц для условий минимума солнечной активности, когда поток ГКЛ максимален, и для максимума солнечной активности, когда поток ГКЛ минимален [10]. Из расчетов видно, что основной вклад в образование ядер  $Be-10$  в атмосфере вносят космические частицы с энергией от нескольких сотен МэВ до  $\sim 5$  ГэВ в период низкой солнечной активности и от  $\sim 1$  ГэВ до  $\sim 5$  ГэВ в период высокой солнечной активности. Отношение площадей под кривыми, равное отношению полного числа ядер  $Be-10$ , которые образуют в атмосфере ГКЛ в периоды минимума и максимума солнечной активности, составляет величину  $(S_{\text{мин}}/S_{\text{макс}}) = 2.1$ .

Таким образом, значения  $n(Be-10)$  в ледовых кернах, относящихся к периодам минимумов и максимумов солнечной активности, должны отличаться в  $\sim 2$  раза. Если

влияние атмосферных условий на величину  $n(\text{Be-10})$  не является определяющим, то временные зависимости  $n(\text{Be-10})$  и потока ГКЛ  $J(E > 0.1 \text{ ГэВ})$  должны повторять друг друга.

Сравним временные зависимости  $n(\text{Be-10})$ , полученные из ледовых кернов Гренландии, с потоками космических лучей с  $E > 0.1 \text{ ГэВ}$ , измеренными в полярной шапке. Эти зависимости показаны на рис. 4 для периода 1950–1984 гг., когда имеются одно-временные данные о  $n(\text{Be-10})$  и потоках ГКЛ. Данные о потоках ГКЛ  $J(E > 0.1 \text{ ГэВ})$  были получены в стратосферных экспериментах [19].

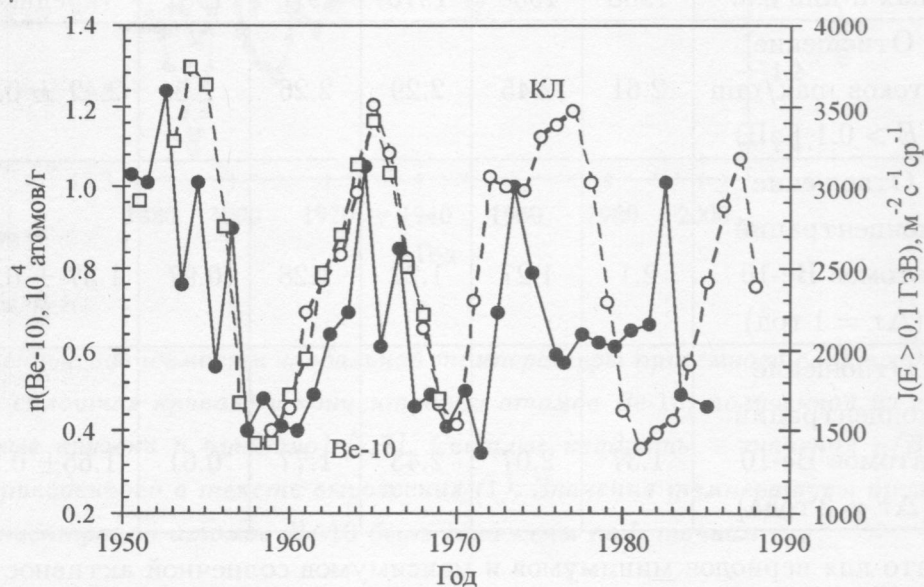


Рис. 4. Временные зависимости концентрации атомов  $\text{Be-10}$  в гренландском льду (темные точки) и потоков космических лучей  $J(E > 0.1 \text{ ГэВ})$  в полярной атмосфере (светлые кружки и квадраты).

Сопоставление двух кривых рис. 4 показывает, что в некоторые периоды максимальные значения концентраций  $\text{Be-10}$  наблюдались раньше максимумов потоков ГКЛ. В период 1974–1985 гг. временные изменения  $n(\text{Be-10})$  и  $J(E > 0.1 \text{ ГэВ})$  происходили в противофазе. Максимальный коэффициент корреляции этих 2-х рядов данных низкий и равен  $r = +0.51 \pm 0.18$  при временном сдвиге между данными  $n(\text{Be-10})$  и  $J(E > 0.1 \text{ ГэВ})$   $\Delta\tau = (1 - 2)$  года (при других значениях  $\Delta\tau$  величина  $r$  уменьшается) [14].

Сравним отношения экспериментально измеренных в гренландском льду величин  $n(\text{Be-10})$  в периоды минимумов и максимумов солнечной активности и отношения потоков ГКЛ, измеренных в эти же периоды.

влияние атмосферных условий на величину  $n(\text{Be-10})$  не является определяющим, то временные зависимости  $n(\text{Be-10})$  и потока ГКЛ  $J(E > 0.1 \text{ ГэВ})$  должны повторять друг друга.

Сравним временные зависимости  $n(\text{Be-10})$ , полученные из ледовых кернов Гренландии, с потоками космических лучей с  $E > 0.1 \text{ ГэВ}$ , измеренными в полярной шапке. Эти зависимости показаны на рис. 4 для периода 1950–1984 гг., когда имеются одно-временные данные о  $n(\text{Be-10})$  и потоках ГКЛ. Данные о потоках ГКЛ  $J(E > 0.1 \text{ ГэВ})$  были получены в стратосферных экспериментах [19].

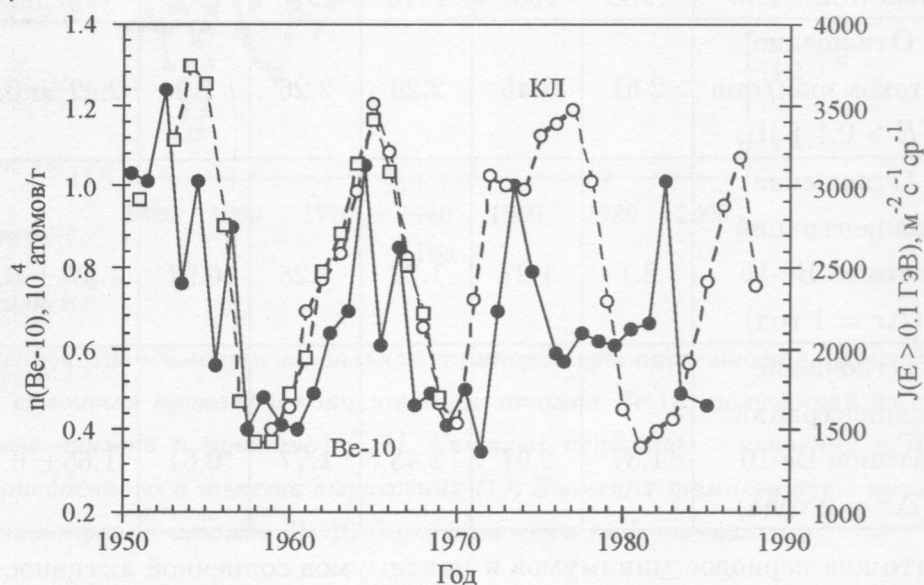


Рис. 4. Временные зависимости концентрации атомов  $\text{Be-10}$  в гренландском льду (темные точки) и потоков космических лучей  $J(E > 0.1 \text{ ГэВ})$  в полярной атмосфере (светлые кружки и квадраты).

Сопоставление двух кривых рис. 4 показывает, что в некоторые периоды максимальные значения концентраций  $\text{Be-10}$  наблюдались раньше максимумов потоков ГКЛ. В период 1974–1985 гг. временные изменения  $n(\text{Be-10})$  и  $J(E > 0.1 \text{ ГэВ})$  происходили в противофазе. Максимальный коэффициент корреляции этих 2-х рядов данных низкий и равен  $r = +0.51 \pm 0.18$  при временном сдвиге между данными  $n(\text{Be-10})$  и  $J(E > 0.1 \text{ ГэВ})$   $\Delta\tau = (1 - 2)$  года (при других значениях  $\Delta\tau$  величина  $r$  уменьшается) [14].

Сравним отношения экспериментально измеренных в гренландском льду величин  $n(\text{Be-10})$  в периоды минимумов и максимумов солнечной активности и отношения потоков ГКЛ, измеренных в эти же периоды.

Таблица дает эти отношения при временах запаздывания данных Be-10 по отношению к данным по космическим лучам  $\Delta\tau = 1$  и 2 года. При таких временах запаздывания наблюдается максимальная корреляция данных Be-10 с данными ГКЛ [14].

Т а б л и ц а

Отношения потоков космических лучей с энергией  $E > 0.1$  ГэВ на границе атмосферы и концентраций атомов Be-10 в гренландском льду в периоды минимумов и максимумов солнечной активности [14]

Периоды max и min с.а.	1954/ 1958	1965/ 1958	1965/ 1970	1977/ 1970	1977/ 1981	среднее
Отношение потоков max/min ( $E > 0.1$ ГэВ)	2.61	2.45	2.29	2.26	2.5	$2.42 \pm 0.07$
Отношение концентраций атомов Be-10 ( $\Delta\tau = 1$ год)	2.1	1.27	1.22	1.28	0.97	$1.37 \pm 0.19$
Отношение концентраций атомов Be-10 ( $\Delta\tau = 2$ года)	1.37	2.07	2.43	1.77	0.61	$1.65 \pm 0.31$

Видно, что для периодов минимумов и максимумов солнечной активности полученные из экспериментальных данных отношения концентраций атомов Be-10 существенно меньше отношений потоков космических лучей и отношения площадей под кривыми на рис. 3.

Т.к. амплитуда 11-летнего хода потоков ГКЛ на высоких широтах составляет  $\sim (70 - 80)\%$ , а на экваторе  $\sim (3 - 5)\%$ , то практическое отсутствие 11-летнего хода в данных Be-10 показывает, что в течение (1–2) лет, пока атомы Be-10 находятся в атмосфере, происходит перемешивание воздушных масс полярных, среднеширотных и экваториальных районов [16]. Результатом такого перемешивания является малая амплитуда 11-летних изменений  $n(\text{Be-10})$ .

Таким образом, сопоставление данных о Be-10 с прямыми измерениями потоков ГКЛ показывает слабую связь между ними, несмотря на то, что ГКЛ являются единственным производителем радионуклида Be-10 в земной атмосфере. Поэтому нельзя использовать данные о концентрации атомов радионуклидов для нахождения потоков ГКЛ в прошлом.



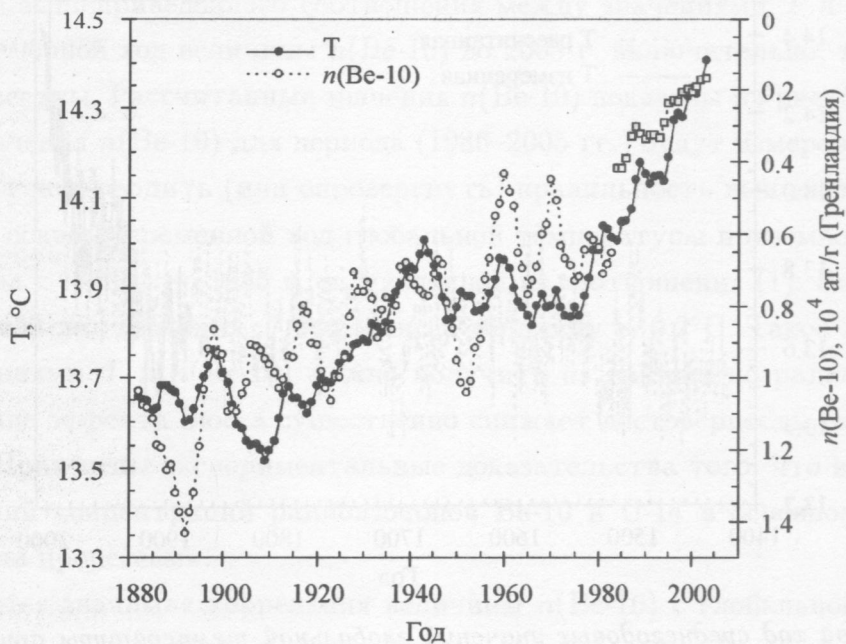


Рис. 5. Временные зависимости глобальной температуры приземного слоя воздуха  $T$  (темные точки и сплошная кривая) и концентрации атомов  $Be-10$ , полученной из гренландских льдов (светлые кружки и пунктир) [1,7]. Светлые квадраты – значения  $n(Be-10)$ , вычисленные из приведенного в тексте выражения (1). Значения температуры приземного слоя воздуха и концентрации атомов  $Be-10$  были сглажены по 5 точкам.

Потоки ГКЛ в прошлом можно найти, используя эмпирическую связь измеренных интегральных потоков ГКЛ  $J(E > 0.1 \text{ ГэВ})$  с уровнем солнечной активности  $R_z$ , где  $R_z$  – число солнечных пятен [14]. За последние  $\sim 50$  лет, когда проводились измерения потоков ГКЛ, было установлено, что коэффициент корреляции между величинами  $J(E > 0.1 \text{ ГэВ})$  и  $R_z$  высокий,  $r \geq 0.9$ . Расчеты потоков ГКЛ по солнечной активности, выполненные в [14], показывают, что за предшествующие  $\sim 400$  лет значения  $J(E > 0.1 \text{ ГэВ})$  изменялись незначительно. Это также свидетельствует о том, что временные изменения в концентрациях атомов  $Be-10$  и  $C-14$  были вызваны изменениями атмосферных условий.

Связь изменений  $n(Be-10)$  и  $n(C-14)$  с изменениями глобальной температуры приземного слоя воздуха  $T$ . Доказательством того, что временные вариации  $n(Be-10)$  и  $n(C-14)$  в основном вызваны изменениями в атмосферных процессах, является корреляция этих вариаций с изменениями глобальной температуры приземного слоя воздуха

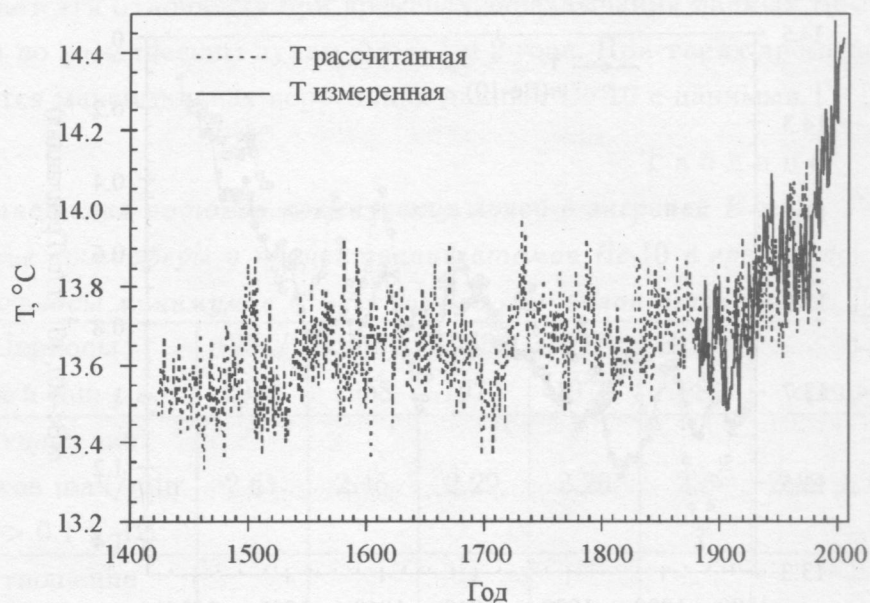


Рис. 6. Временной ход среднегодовых значений глобальной температуры приземного слоя воздуха  $T$  с 1423 г. по настоящее время [18]: пунктир — расчет, сплошная кривая — экспериментальные данные.

$T$  [18]. Впервые на такую связь было указано в [20], где был проведен спектральный анализ рядов данных  $T$  и  $n(\text{Be-10})$ . Было найдено, что на 99% уровне значимости оба ряда имеют одни и те же спектральные линии ( $\sim 194$ ,  $\sim 64$ ,  $\sim 32$  и  $\sim 22$  года).

Подобие временных зависимостей значений  $T$  и полученных из гренландского льда значений  $n(\text{Be-10})$  видно на рис. 5. Среднегодовые значения  $T$  и  $n(\text{Be-10})$  были сглажены по 5 точкам. Между кривыми, представленными на рис. 5, имеется значимая корреляция,  $r = -0.73 \pm 0.05$  при нулевом сдвиге между рядами данных. Нужно отметить, что в основном метеорологические станции расположены в Северном полушарии, поэтому для нахождения связи между  $T$  и  $n(\text{Be-10})$  лучше использовать данные о Be-10, полученные из кернов гренландского льда.

Используя данные рис. 5, значения приземной глобальной температуры  $T$  можно выразить через величину  $n(\text{Be-10})$  следующим образом:

$$T(t) = 13.7 \cdot [n_{\text{Be}}(t)]^{-0.028}, \quad (1)$$

где  $T$  выражается в  $^{\circ}\text{C}$ ,  $n_{\text{Be}}(t)$  — в единицах  $10^4$  атомов Be-10 на 1 г льда, а  $t$  — время в годах. Данные о концентрации атомов Be-10 в гренландском льду имеются только

до 1985 г. Из вышеприведенного соотношения между значениями  $T$  и  $n(\text{Be-10})$  можно получить временной ход величины  $n(\text{Be-10})$  до 2005 г. включительно, т. к. значения  $T$  до 2005 г. известны. Рассчитанные значения  $n(\text{Be-10})$  показаны на рис. 5 светлыми квадратами. Значения  $n(\text{Be-10})$  для периода (1986–2005 гг.) будут измерены в ближайшие годы и смогут подтвердить (или опровергнуть) правильность вышеизложенного.

На рис. 6 показан временной ход глобальной температуры приземного слоя воздуха  $T$  для периода с 1423 г. по 1985 г., вычисленной из соотношения (1). Видно, что в этот период за  $\sim 450$  лет значения  $T$  выросли на величину  $\sim 0.2^\circ\text{C}$ . Такое же соотношение между значениями  $T$  и  $n(\text{Be-10})$  можно получить из данных по радиоуглероду C-14, однако наличие эффекта Зюсса существенно снижает достоверность такой связи.

**Выводы.** Приведены экспериментальные доказательства того, что временные изменения значений концентраций радиоизотопов Be-10 и C-14 в основном определяются атмосферными процессами.

Наблюдается значимая корреляция величины  $n(\text{Be-10})$  с глобальной температурой приземного слоя воздуха  $T$ . По данным о концентрации атомов Be-10 в кернах гренландского льда и концентрации атомов C-14 в кольцах деревьев можно определить значения  $T$  в прошлом.

Потоки галактических космических лучей, уровень солнечной активности и гелиосферное магнитное поле в прошлом не могут быть найдены с приемлемой точностью по данным о концентрации радиоизотопов Be-10 и C-14 из-за существенного влияния атмосферных процессов на концентрации этих элементов.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] J. Beer, A. Blinov, G. Bonani, et al. *Nature* **347**, 164 (1990).
- [2] M. Stuiver and T. F. Brazinuas. *The Holocene* **3**, 289 (1993).
- [3] J. Beer, St. Baumgartner, B. Dittrich–Hannen, et al. *Solar Variability Traced by Cosmogenic Isotopes*. In: “*The Sun as a Variable Star. Solar and Stellar Irradiance Variations*”. Editors J.M. Pap, C. Frolich, H. S. Hudson, and S. K. Solansky (Cambridge University Press, 1994), p. 291.
- [4] В. А. Дергачев. *Геомагн. и аэроном.* **36**, 49 (1996).
- [5] E. J. Steig, P. J. Polissar, M. Stuiver, et al. *Geophys. Res. Lett.* **23**, 523 (1996).
- [6] E. Bard, G. M. Raisbeck, F. Yiou, and J. Jouzel. *Plan. Sci. Lett.* **150**, 453 (1997).
- [7] А. В. Блинов. Долгоживущие продукты ядерных реакций космических лучей в атмосфере Земли и временные вариации глобальных параметров. Докторская дис-

- сертификация, Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН (Санкт-Петербург, 1997).
- [8] J. Beer, S. Tobias, and N. Weiss. *Solar Physics* **181**, 237 (1998).
- [9] K. G. McCracken, F. B. McDonald, J. Beer, et al. *J. Geophys. Res.* **109**, A12103 (2004) doi: 10.1029/2004JA010688.
- [10] K. G. McCracken. "The accuracy of Cosmogenic Be-10 as a Quantitative Measurements of the GCR". Proc. of 28-th Intern. Cosmic Ray Conf., Tsukuba, Japan, 2003. **7/7**, 4127 (2004).
- [11] I. G. Usoskin, K. Mursula, S. K. Solanki, et al. *J. Geophys. Res.* **107** (A11), 13-1 (2002) doi: 10.1029/2002JA009343.
- [12] R. A. Caballero-Lopez, H. Moraal, K. G. McCracken, and F. B. McDonald. *J. Geophys. Res.* **109**, A12102 (2004) doi: 10.1029/2004JA010633.
- [13] S. K. Solanki, M. Schusler, and M. Fligge. *Nature* **408**, 445 (2000).
- [14] Y. I. Stozhkov, V. P. Okhlopkov, and N. S. Svirzhevsky. *Solar Physics* **224** (1-2), 323 (2004).
- [15] Ю. И. Стожков, Н. С. Свиржевский, Г. А. Базилевская и др. Сб. Арктика и Антарктика, Наука, Москва, Вып. 3(37), 114 (2004).
- [16] K. G. McCracken. *J. Geophys. Res.* **109**, A04101 (2004) doi: 10.1029/2003JA010060.
- [17] M. Stuiver, P. J. Reimer, and T. F. Braziunas. *Radiocarbon* **40**, 1127 (1998).
- [18] [http://ftp.ncdc.noaa.gov/anomalies/global\\_meant\\_C.all](http://ftp.ncdc.noaa.gov/anomalies/global_meant_C.all).
- [19] Ю. И. Стожков, Н. С. Свиржевский, Г. А. Базилевская, и др. Препринт ФИАН (2007), в печати.
- [20] В. И. Ермаков, В. П. Охлопков, Ю. И. Стожков. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 3, 41 (2006).

Поступила в редакцию 26 декабря 2006 г.