

УДК 550.38.551.583

ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПОТОКА КОСМОГЕННОГО ИЗОТОПА ^{10}Be ЗА ПОСЛЕДНИЕ 10 ТЫСЯЧ ЛЕТ, ВАРИАЦИИ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ И КЛИМАТ

© 2012 г. С. С. Васильев¹, В. А. Дергачев², О. М. Распопов³, Х. Юнгнер⁴

^{1, 2} Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

³ Учреждение РАН Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова (Санкт-Петербургский филиал), Санкт-Петербург

⁴ Лаборатория датирования, Университет Хельсинки, Финляндия

e-mail: sergey.vasiliev@mail.ioffe.ru; v.dergachev@mail/ioffe.ru

Поступила в редакцию 26.01.2011 г.

После доработки 18.07.2011 г.

Проведен спектральный анализ данных по потоку космогенного ^{10}Be в керне льда со станции Summit, Центральная Гренландия (проект GRIP) за последние ~10 тыс. лет. Показано, что поток ^{10}Be меняется циклически. Наиболее значимый цикл имеет период ~2300 лет. Выполнен анализ изменений положения виртуального геомагнитного полюса за 8 тыс. лет. На периодограмме долготы виртуального геомагнитного полюса обнаружены значимые компоненты, указывающие на циклическое изменение положения геомагнитного полюса с периодом ~2300 лет. Кроме ~2300-летнего цикла, на периодограмме данных по потоку ^{10}Be наблюдается ряд линий, присутствие которых можно рассматривать как проявление 1000-летнего цикла в скорости осаждения ^{10}Be на поверхность ледника. Обсуждается связь цикличности положения геомагнитного полюса и потока ^{10}Be .

1. ВВЕДЕНИЕ

Радиоизотоп ^{10}Be образуется в результате взаимодействия космических лучей с нуклидами атмосферы Земли. Скорость образования радиоизотопов зависит от потока космических лучей на границе атмосферы, изменяющегося под влиянием солнечной активности и магнитного поля Земли. Образовавшиеся атомы ^{10}Be захватываются аэрозолями, и после пребывания в атмосфере в течение 1–2 лет происходит их осаждение на поверхность Земли. В результате сезонных климатических процессов формируются годичные слои ледников. Слоистая структура ледников позволяет рассматривать их как датированные природные архивы, содержащие важную информацию о скорости образования космогенных изотопов. ^{10}Be , выпадающий на поверхность ледников Гренландии и Антарктиды, является наиболее существенным источником информации о солнечной активности, интенсивности галактических космических лучей, солнечно-земных связях на большой шкале времени.

2. АНАЛИЗ ДАННЫХ ПО ^{10}Be . ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА

Анализировались данные по концентрации ^{10}Be , полученной из слоев керна гренландского льда (проект GRIP) [Vonmoos et al., 2006]. Данные

датированы временным интервалом 316–9327 гг. ВР¹. Поскольку скорость накопления льда в леднике в течение Голоцена известна [Dahl-Jensen et al., 1993], легко осуществить переход от измеряемой концентрации ^{10}Be в керне к потоку ^{10}Be на поверхности Земли.

Для Голоцена естественным является предположение о стационарности переноса ^{10}Be в атмосфере [Vonmoos et al., 2006]. Для стационарного переноса ^{10}Be справедливо простое соотношение между потоком ^{10}Be , обозначенным как F , и скоростью образования ^{10}Be в атмосфере, Q , а именно $F = A(t)Q$. Коэффициент $A(t)$ почти постоянен и описывает небольшие непродолжительные флуктуации переноса ^{10}Be в атмосфере (см. раздел 4).

Следует отметить, что при измерении концентрации ^{10}Be [Vonmoos et al., 2006] толщина образцов анализируемого льда была непостоянна. Среднее значение толщины образца – 4.2 года. Разработано несколько подходов для спектрального анализа данных с переменным шагом. В данной работе использовался метод анализа таких данных [Lomb, 1976; Scargle, 1982], усовершенствованный далее в работе [Press and Rybicky, 1989]. На рисунке 1 показан поток ^{10}Be в единицах

¹ Английская аббревиатура ВР (before present) применяется для указания даты, отсчитываемой в годах в прошлое. За начало отсчета принимают 1950 г.

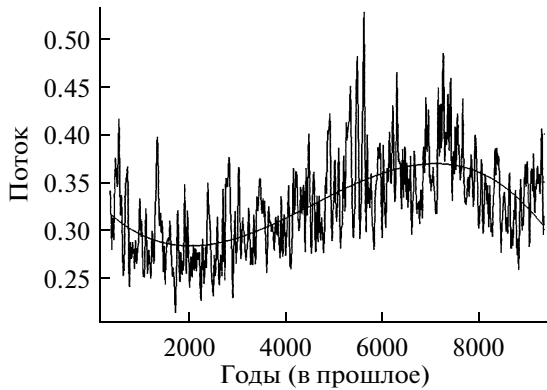


Рис. 1. Скорость осаждения (поток) ^{10}Be за 9300 лет в единицах 10^6 атом см^{-2} год^{-1} [Vonmoos et al., 2006]. Сплошная кривая — тренд.

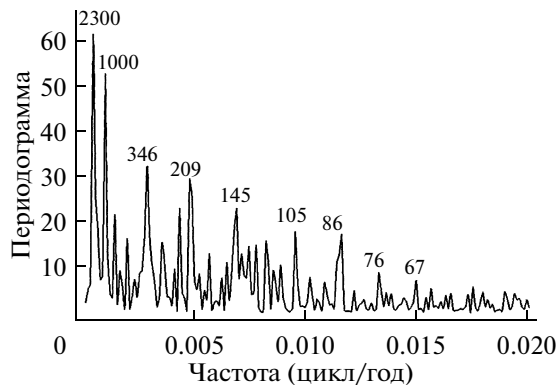


Рис. 2. Периодограмма данных по потоку ^{10}Be (рис. 1). По вертикальной оси — мощность линий в относительных единицах. Указаны периоды в годах наиболее значимых линий спектра.

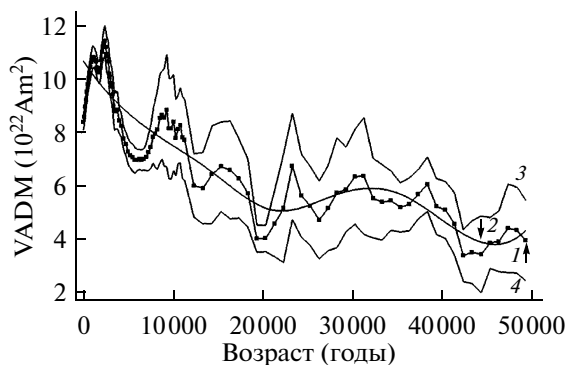


Рис. 3. Виртуальный аксиальный дипольный момент (VADM) за 50 тыс. лет [Knudsen et al., 2008]. По горизонтальной оси — возраст образцов. Черными точками помечены значения VADM, полученные на основе экспериментальных данных. Кривая 2 — сглаженные значения. Кривые 3 и 4 показывают ошибки VADM.

10^6 атом см^{-2} год^{-1} за последние 9000 лет. Сплошная кривая — долговременная составляющая потока (тренд), по-видимому, обусловлена изменением магнитного поля Земли [Yang et al., 2000; Korte and Constable., 2005]. При подготовке данных для анализа тренд удалялся. Результаты периодограммного анализа представлены на рис. 2, где указаны периоды наиболее заметных линий.

Природа мощных линий, присутствующих на периодограмме, может быть солнечного, геомагнитного или климатического происхождения. На рисунке 2 наиболее мощной линией является пик с периодом ~ 2300 лет. Эта спектральная линия присутствует также в данных по радиоуглероду [Vasiliev and Dergachev, 2002]. Однако, происхождение этой линии не нашло однозначного объяснения. В последнее время появились новые данные по геомагнитному полю [Knudsen et al., 2008], которые, как будет показано ниже, позволяют связать эту линию, наблюдаемую в спектрах данных, с изменением положения геомагнитного полюса.

3. ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Рассмотрим основные свойства долговременных вариаций геомагнитного поля, следующие из анализа данных [Knudsen et al., 2008]. На рисунке 3 показано изменение виртуального аксиального дипольного момента Земли (VADM) за последние 50 тыс. лет. Черными точками помечены значения VADM, полученные на основе экспериментальных данных, кривая 2 — сглаженные значения. Кривые 3 и 4 показывают ошибки VADM по оценке Knudsen et al. (2008). На этом временном интервале сглаженные значения VADM (кривая 2) монотонно увеличиваются от прошлого к настоящему, изменяясь от $\sim 4 \cdot 10^{22}$ Am^2 до $\sim 11 \cdot 10^{22}$ Am^2 . Вычисленная периодограмма данных VADM за 50 тыс. лет представлена на рис. 4. Доминирующей на периодограмме является линия, период которой ~ 7200 лет.

Для целей настоящей работы интересным является анализ данных за последние 12 тыс. лет, интервале, в котором имеются наиболее детальные данные об изменении поля. Из рассмотрения этих данных можно получить информацию об изменении геомагнитного поля на более коротких временных масштабах. На рисунке 5 показана периодограмма для временного интервала 0–12 тыс. лет. На периодограмме виден триплет линий, которые помечены символами Ω , $\Omega - \omega$ и $\Omega + \omega$. Основная линия (частота Ω) является аналогом наиболее мощной линии на рис. 2, период которой составляет ~ 2300 лет. Присутствие в данных по VADM аналогичной периодичности указывает на

возможность изменения геомагнитного поля с периодом ~2300 лет.

Для описания магнитного поля Земли используют различные модели, например, [Merrill et al., 1996]. Простейшей моделью является дипольная. На основе палеомагнитных исследований можно оценить виртуальный дипольный момент (VDM) или виртуальный аксиальный дипольный момент (VADM) Земли в прошлом [Butler, 1992]. Следует подчеркнуть различие VDM и VADM. Для оценки VDM необходимо знать в точке измерения две составляющие вектора намагниченности: угол между географическим и магнитным меридианами в точке земной поверхности (магнитное склонение) и угол между магнитной силовой линией и горизонтальной плоскостью (магнитное наклонение). Склонение и наклонение в модели диполя дают возможность найти положение геомагнитного полюса (VGP). Через намагниченность образца, географические координаты места палеомагнитных измерений и положение геомагнитного полюса (VGP) можно вычислить виртуальный дипольный момент (VDM) [Tauxe, 2005]. Однако в археомагнитных исследованиях не всегда удается установить магнитное склонение и наклонение, т.е. положение геомагнитного полюса остается неопределенным. Тогда используется упрощенная модель геомагнитного поля, в которой ось диполя совпадает с осью вращения Земли. Полученный в такой модели дипольный момент называют виртуальным аксиальным дипольным моментом (VADM).

Подробные данные по геомагнитному полю за 8000 тыс. лет опубликованы в работе [Kovacheva, 1997]. Данные содержат информацию по положению виртуального геомагнитного полюса (VGP), величине виртуального дипольного момента (VDM), а также значения VADM в тех случаях, когда данные по направлению вектора намагниченности образцов отсутствовали.

Выполненный периодограммный анализ этих данных показал, что ~2300-летний цикл отсутствует в данных по напряженности геомагнитного поля (VDM), но присутствует в данных по положению геомагнитного полюса (VGP), что позволяет заключить, что ~2300-летние вариации относятся скорее к положению геомагнитного полюса, чем к величине геомагнитного дипольного момента. Из рисунка 6 следует, что долготы геомагнитного полюса в течение последних 8000 лет изменялась циклически, причем основным является период ~2200–2300 лет. Расщепление линии и образование триплета (рис. 5) объясняется низкочастотной модуляцией (период ~7200 лет, рис. 4) геомагнитного дипольного момента.

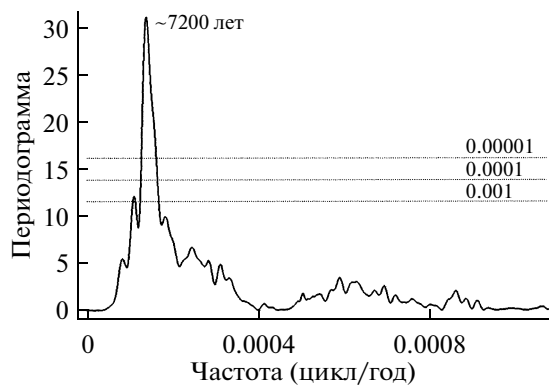


Рис. 4. Периодограмма данных по VADM (рис. 3). На горизонтальной оси – частота в единицах цикл/год. По вертикальной оси – мощность линий в относительных единицах. Горизонтальными линиями указаны уровни значимости.

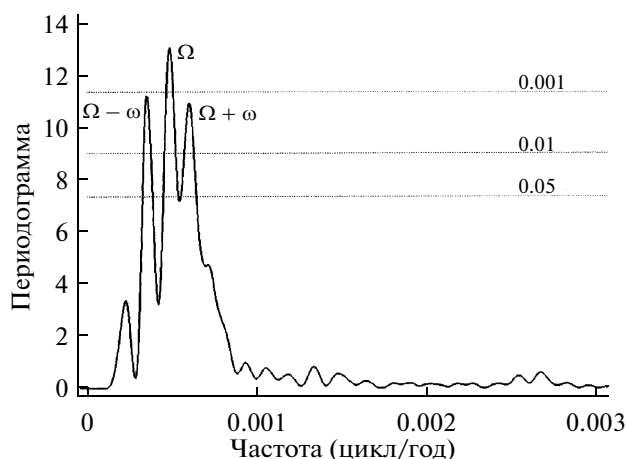


Рис. 5. Периодограмма данных по VADM за 12 тыс. лет (см. рис. 3). На горизонтальной оси – частота в единицах цикл/год. По вертикальной оси – мощность линий в относительных единицах. Горизонтальные линии обозначают уровни значимости.

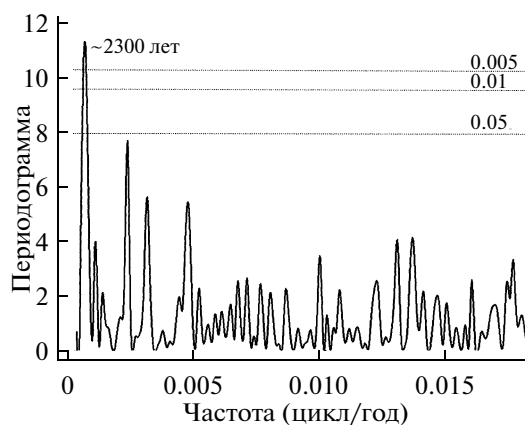


Рис. 6. Анализ данных [Kovacheva, 1997] по положению геомагнитного полюса за 8000 лет. Представлена периодограмма данных по долготе.

4. ИЗМЕНЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ И КЛИМАТ

Итак, в данных по скорости осаждения ^{10}Be и в данных по положению геомагнитного полюса обнаружены циклы с периодами, совпадающими в пределах погрешности и равными ~2300 лет. При циклическом изменении положения магнитного полюса происходит изменение геомагнитной широты места (Гренландия, Summit, $72^{\circ}35'\text{N}$, $37^{\circ}38'\text{W}$), где извлекался керн льда для измерений концентрации космогенных изотопов. Скорость образования ^{10}Be , меняется при изменении геомагнитной широты [Masarik and Beer, 2009], но в пределах широты от 60° до 90° эти изменения столь незначительны, что это не может заметно изменить скорость осаждения ^{10}Be . Поэтому следует рассмотреть возможность комплексного подхода, включающего, например, воздействие космических лучей на климат [Svensmark, 2000].

Изменение положения северного магнитного полюса (NMP) за последние 1000 лет достаточно хорошо изучено [см. Bloxham and Jackson, 1992; Hongre et al., 1998]. Kovaltsov and Usoskin (2007) изучили индуцированную космическими лучами ионизацию атмосферы в условиях изменения положения NMP и показали, что изменения локальных параметров атмосферы из-за эффекта миграции полюса сопоставимы с таковыми из-за вариаций солнечной активности. Таким образом, не исключено влияние миграции NMP на локальные изменения климата.

Bakhmutov (2006) на основе палеомагнитных данных из озерных отложений северо-запада России (в основном из Карелии и Кольского полуострова) и археомагнитных данных с Украины нашел положение виртуального геомагнитного полюса (VGP) для последних 13 тыс. лет. Выполненное сравнение полученных палеомагнитных данных с палеоклиматическими данными для севера–северо-востока Европы показало, что чередование холодных и теплых периодов может быть связано с изменением положения VGP.

В работе [Gallet et al., 2003] рассмотрены археомагнитные данные из западной Европы и Ближнего Востока. Замечено, что имеет место совпадение резкого изменения направления траектории VGP (археологических джерков) и максимума интенсивности археомагнитного поля. Gallet et al. (2005) сравнили существование этих “археомагнитных джерков” с палеоклиматическими индикаторами. Найдено замечательное согласие между джерками (особенно в период их роста) и индикаторами похолодания, такими, как наступление ледников в западной Европе.

Предполагаемым механизмом влияния магнитного поля на климат может являться изменение положения геомагнитного полюса, в результа-

те чего меняется плотность образования центров конденсации вследствие ионизации атмосферы космическими лучами [Courtillot et al., 2007; Kovaltsov and Usoskin, 2007].

Kerton (2009) исследовал перемещение магнитного полюса Земли за последние 105 лет и показал значимую корреляцию между положением северного магнитного полюса, с одной стороны, и глобальной температурой и температурой северного полушария, с другой стороны.

В работе [Johnston, 2008] обсуждается взаимосвязь зональных температурных аномалий и локальной напряженности магнитного поля, выявленных на геофизических станциях. Показана отрицательная корреляция температурных аномалий и напряженности поля.

Knudsen и Riisager (2009) обнаружили хорошую корреляцию датированных образцов $\delta^{18}\text{O}$, извлеченных из пещерных спелеотемов (speleothems – пещерные образования), и данными по дипольному моменту Земли за последние 5 тыс. лет. Из существования этой корреляции следует, что магнитное поле Земли влияло в прошлом на количество осадков в низких широтах, т.е. вариации геомагнитного поля могли оказывать влияние на климат Земли.

Таким образом, существующие факты в совокупности не оставляют сомнения в возможности влияния изменений дипольного момента и положения магнитного полюса на климат. Механизмы этого влияния остаются дискуссионными.

5. ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА И СКОРОСТЬ ОСАЖДЕНИЯ ^{10}Be

Концентрация ^{10}Be , измеряемая в природных архивах, таких как керны льда, зависит не только от скорости образования, но также от нескольких атмосферных процессов. К ним относятся широтное перемешивание, обмен воздушных масс между стратосферой и тропосферой (STE), и эффективность и способ осаждения из атмосферы. Интенсивность этих процессов связана с состоянием климата. В течение Голоцена вариации климата были незначительны. Это не означает, что концентрация ^{10}Be не отражает климатических изменений. Как утверждают авторы [Beer et al., 1994a], хорошее согласие ^{10}Be и ^{14}C данных позволяет предположить, что процесс образования изотопов вносил основной вклад в скорость осаждения ^{10}Be на временных интервалах, больших 2–3 лет. На более коротких временных масштабах климатическое воздействие может доминировать.

Более категоричен в своих выводах Lai (1987). Он утверждал, что наблюдаемые вариации концентрации ^{10}Be в кернах льда в большой степени обусловлены климатическими изменениями. По-

этому данные по ^{10}Be могут быть использованы для изучения метеорологических процессов в полярных районах. Однако, в работе [Berggren et al., 2009] представлены новые данные по ^{10}Be годичного разрешения, охватывающие временной интервал 1389–1994 гг., измеренные в керне льда со станции NGRIP в центральной части Гренландии. Совместный анализ данных по ^{10}Be со станций NGRIP и Dye-3 (Гренландия) показывают подобную долгосрочную циклическую изменчивость на всем протяжении солнечных минимумов Маундера и Шперера, хотя имеют место и нерегулярные кратковременные различия в данных между этими двумя гренландскими станциями. Эти результаты указывают на то, что, по крайней мере, необходимы две серии ^{10}Be данных высокого разрешения, чтобы оценить локальные изменения и уверенно восстанавливать факторы, влияющие на концентрацию ^{10}Be в исследуемых кернах.

Вскоре после образования ^{10}Be адсорбируется аэрозолями и поэтому может легко достичь поверхности Земли, участвуя в формировании осадков, или в результате турбулентного переноса аэрозолей. Атмосферные потоки время от времени проникают из стратосферы в тропосферу, формируя стратосферно-тропосферный обмен (STE). Тропопауза искривляется в регионе между двумя крупномасштабными тропосферными зонами, позволяя стратосферным воздушным массам проникать в тропосферу, в результате чего происходит выброс большего количества ^{10}Be на соответствующей широте. Хотя считается, что ^{10}Be хорошо перемешан в стратосфере, частота и пространственное распределение STE могут создавать региональные вариации концентрации ^{10}Be в тропосфере.

Большинство климатических процессов в атмосфере могут оказывать влияние на высоту и толщину тропопаузы и, следовательно, воздействовать на обмен атмосферных потоков. Это, в свою очередь, вносит вклад в локальное значение скорости осаждения ^{10}Be , что не связано с изменением скорости образования.

В последнее время по результатам расчетов и измерений концентрации ^7Be и ^{10}Be получены важные данные об особенностях переноса этих изотопов в атмосфере. Изучены сезонные вариации ^7Be и ^{10}Be в аэрозолях в центральной Швеции в течение 1972–2005 годов [Possnert et al., 2006; Aldahan et al., 2008]. Сезонные вариации концентрации изотопов, по-видимому, вызываются климатическими факторами (вариациями осадков, температуры и направления ветра). Отношение концентраций $^{10}\text{Be}/^7\text{Be}$, полученное в этих исследованиях, менялось в пределах 0.5–2.5 и изменения имели сезонный характер. В некоторых случаях возрастания относительной концентрации

$^{10}\text{Be}/^7\text{Be}$ происходило в холодные месяцы года, что, по-видимому, отражает перемешивание воздушных масс с различным возрастом или происхождением.

В работе [Pedro et al., 2006] рассматривались данные по снежным отложениям с целью изучения атмосферного переноса ^{10}Be в Антарктике (станция Law Dome). Исследовались данные для непродолжительного промежутка времени (~1 года), так чтобы возможные флуктуации ^{10}Be отражали главным образом процессы атмосферного переноса. Повышенная концентрация ^{10}Be наблюдалась поздним летом и ранней осенью, синхронно с увеличением концентрации стратосферных аэрозолей над антарктическими станциями. Имело место значимое увеличение антикорреляции, ^{10}Be и $\delta^{18}\text{O}$ для выделенных эпизодов снегопада ($P < 0.01$). Эта антикорреляция означает, что концентрация ^{10}Be уменьшалась в снеге, образовавшимся в более теплом воздухе, для которого характерно большее значение $\delta^{18}\text{O}$ (следует учесть, что $\delta^{18}\text{O} < 0$). Распространение вывода о такой антикорреляции на более продолжительные временные интервалы, основываясь на этих измерениях, преждевременно. Однако известна подобная антикорреляция концентрации ^{10}Be и температуры центральной Англии [Manley, 1974] для продолжительного временного интервала (240 лет). Как утверждают авторы [Beer et al., 1994b], согласие хорошее, учитывая все неопределенности измерений. Подобный результат получен также для средней поверхностной температуры северного полушария [Beer et al., 1994a].

Моделирование процессов переноса ^{10}Be выполнялось на основе обобщенной циркуляционной модели атмосферы (GCM) [Field et al., 2005; Heikkilä et al., 2008; Heikkilä et al., 2009]. Хотя скорость образования ^{10}Be является хорошим индикатором солнечной активности и изменения магнитного поля Земли, интерпретация данных по ^{10}Be из кернов льда встречает затруднения из-за учета влияния климата на скорость осаждения ^{10}Be на поверхность ледника. В работе [Field et al., 2006] использовалась GCM Гарвардского института для изучения влияния на перенос ^{10}Be таких факторов, как величина дипольного момента Земли, модуляционный параметр солнечной активности (Φ), концентрация CO_2 в атмосфере, вулканические аэрозоли. Найдено, что изменения потока ^{10}Be существенно отличаются на различных широтах. Кроме того, изменения скорости осаждения ^{10}Be , сопровождаемые вариациями скорости аккумуляции снега, создают климатически обусловленные флуктуации концентрации ^{10}Be как в Гренландии, так и Антарктике. Если иметь в виду скорость образования ^{10}Be в течение Голоцена, то отклик на изменения климата следует учи-

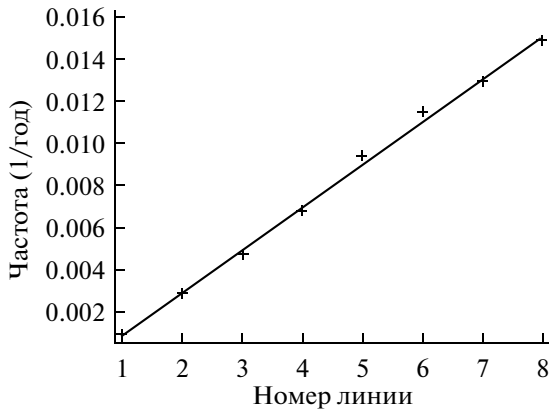


Рис. 7. Частота линии в зависимости от ее номера (см. рис. 2). Нумерация начинается с линии, имеющей период ~ 1000 лет.

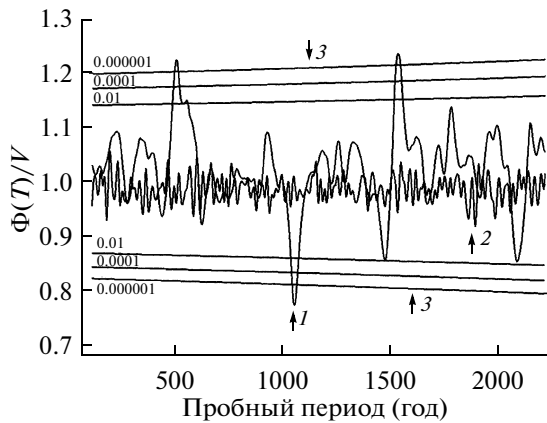


Рис. 8. Результат анализа цикличности в данных по потоку ^{10}Be (рис. 1). По горизонтальной оси – пробный период, по вертикальной – отношение Φ к дисперсии данных V (см. текст). Наклонные линии обозначают уровни значимости. Кривая 1 – результат анализа данных, кривая 2 – гауссовского шума, 3 – уровни значимости.

тывать, несмотря на спокойную климатическую картину в целом.

Heikkilä et al. (2008) провели исследования переноса ^{10}Be во время маундеровского минимума (1645–1715 гг.) солнечной активности. Была использована обобщенная циркуляционная модель ЕСТАМ5-НАМ. Показано, что во время этого минимума средняя глобальная скорость образования ^{10}Be была на 32% выше (из-за ослабления солнечной активности). В то же время зональная усредненная скорость осаждения отличалась только на $\sim 8\%$ от среднего возросшего потока.

Следовательно, в течение маундеровского минимума солнечной активности климатический эффект заметно меньше, чем эффект возрастания скорости образования ^{10}Be . Показано, что во вре-

мя данного минимума стратосферно-тропосферный обмен в северном полушарии возрастает. В южном полушарии эффект мал. В целом, климатическое воздействие на скорость осаждения ^{10}Be в полярных регионах незначительно.

Из сказанного следует, что, с одной стороны, миграция магнитных полюсов может влиять, по крайней мере, на локальное состояние климата (см. раздел 3). С другой стороны, климатические изменения могут быть ответственны за флуктуации скорости осаждения ^{10}Be . Комбинация этих физических явлений может явиться механизмом, обеспечивающим связь циклического изменения положения северного магнитного полюса Земли и скорости осаждения ^{10}Be в Антарктиде.

6. 1000-ЛЕТНИЙ ЦИКЛ СКОРОСТИ ОСАЖДЕНИЯ ^{10}Be

На периодограмме данных по скорости осаждения ^{10}Be (рис. 2) присутствует ряд линий, периоды которых меньше ~ 2300 лет. Возникновение этих линий трудно связать с изменением величины геомагнитного дипольного момента, поскольку на периодограмме данных по VADM за 12 тыс. лет (рис. 5) отсутствуют значимые линии, периоды которых меньше ~ 2300 лет (сравни с рис. 2).

Интересно, что эти линии (рис. 2) расположены через примерно равный частотный промежуток. На рисунке 7 показана зависимость частоты линии от номера, соответствующего положению на рис. 2, и проведена линия регрессии

$$\omega_k = 0.001 + (k - 1) \cdot 0.002,$$

где k – номер периодической составляющей, а частота измеряется в единицах год^{-1} . Следовательно, можно ожидать, что изменение скорости осаждения ^{10}Be имеет циклический характер, а продолжительность цикла равна ~ 1000 лет.

Присутствие циклов в данных можно проверить, исходя из определения понятия “период функции”. Так функция $f(x)$ имеет период T , если для любого x выполняется соотношение: $f(x) = f(x + T)$.

Для анализа цикличности следует рассмотреть выражение $\Phi(T) = \langle (f(x) - f(x + T))^2 \rangle$, где через скобки $\langle \dots \rangle$ обозначена операция усреднения по x . При поиске продолжительности цикла следует вычислить Φ для некоторого набора значений T . Если пробное значение периода совпадет с продолжительностью цикла, то Φ примет минимальное значение. Это минимальное значение обязательно равно нулю, т.к. реальные данные содержат шум.

На рисунке 8 представлены результаты поиска циклов в данных по ^{10}Be . По вертикальной оси отложена величина $\Phi(T)$, деленная на дисперсию данных V , по горизонтальной оси – пробный пе-

риод T . Кривая, соответствующая анализируемым данным, помечена индексом I . Из рисунка 8 видно, что кривая I имеет единственный минимум, положение которого означает, что цикл продолжительностью ~ 1000 лет в скорости осаднения ^{10}Be , по-видимому, является проявлением физических процессов.

Насколько значим полученный результат по анализу цикличности? Как это принято при статистическом анализе, реальные данные сравнивались с гауссовским шумом. Для шума, так же как для реальных данных, рассматривается функция $\Phi(T)$ (см. кривую 2), которую обозначим здесь через $\tilde{\Phi}(T)$.

Поскольку функция распределения отклонений от среднего для $\tilde{\Phi}(T)$ представляет собой χ_n^2 (хи-квадрат) с n степенями свободы, где n — число точек усреднения, можно вычислить вероятности отклонения. На рисунке 8 эти вероятности обозначены как уровни значимости. Сравнивая ход кривой I с уровнями значимости (см. рис. 8), видим, что отклонение кривой I от среднего уровня в области пробного периода ~ 1000 лет может быть с ничтожно малой вероятностью обусловлено флуктуациями шума. Таким образом, существование цикла в скорости осаднения ^{10}Be продолжительностью ~ 1000 лет статистически значимо.

Что касается физической природы рассматриваемых спектральных линий периодограммы, то анализу этого вопроса посвящена работа Васильева и Дергачева (2009). Там показано, что величина рассматриваемых линий такова, что природой их возникновения может являться ослабление солнечной активности в эпохи глубоких минимумов типа маундеровского.

7. ВЫВОДЫ

Проведен спектральный анализ данных по потоку ^{10}Be (проект GRIP) на поверхность ледника Summit, Гренландия за последние ~ 10 тыс. лет. В спектре обнаружены гармонические компоненты. Наиболее значимый цикл имеет период ~ 2300 лет (рис. 2).

Выполнен анализ изменений положения виртуального геомагнитного полюса за 8 тыс. лет. На периодограмме долготы виртуального геомагнитного полюса обнаружены значимые компоненты, указывающие на циклическое изменение положения геомагнитного полюса с периодом ~ 2300 лет (рис. 6).

Итак, в данных по потоку ^{10}Be и в данных по положению геомагнитного полюса обнаружены циклы с периодами, совпадающими в пределах погрешности и равными ~ 2300 лет. При циклическом изменении положения магнитного полюса происходит изменение геомагнитной широты ме-

ста, где извлекался керн льда для измерений концентрации космогенных изотопов (Гренландия, Summit, $72^\circ 35' \text{N}$, $37^\circ 38' \text{W}$). Скорость образования ^{10}Be меняется при изменении геомагнитной широты [Masarik and Beer, 2009], но в пределах широты от 60° до 90° эти изменения столь незначительны, что это не могут заметно изменить скорость осаднения ^{10}Be . Возможно другое, более сложное объяснение, связанное с влиянием положения геомагнитного полюса на состояние климата в полярном регионе (см. раздел 3) с последующим изменением потока ^{10}Be (см. раздел 4).

Кроме ~ 2300 -летнего цикла, на периодограмме данных по потоку ^{10}Be наблюдается ряд линий, периоды которых занимают диапазон от 1000 лет до нескольких десятков лет (рис. 2), и которые расположены на периодограмме примерно через равный частотный промежуток (рис. 7). Присутствие этих линий можно рассматривать как проявление 1000-летнего цикла в скорости осаднения ^{10}Be . Возникновение этих линий, по-видимому, не связано с изменением величины или положения геомагнитного дипольного момента. Так, на периодограмме данных по VADM за 12 тыс. лет (рис. 5) отсутствуют значимые линии, периоды которых меньше ~ 2300 лет. С другой стороны, присутствие вариаций в скорости осаднения ^{10}Be с периодами, меньшими, чем 1000 лет, совместимо с механизмом воздействия солнечной активности на поток космических лучей. Рассматриваемые вариации возникают, по-видимому, из-за ослабления солнечной активности в эпохи глубоких минимумов типа маундеровского [Васильев и Дергачев, 2009].

В результате проведенного исследования показано, что поток ^{10}Be на поверхности ледника изменяется циклически, а продолжительность циклов составляет ~ 2300 и ~ 1000 лет. Изменение потока ^{10}Be с периодом ~ 2300 лет, по-видимому, связано с циклическим изменением положения северного магнитного полюса.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проекты № 09-02-00083, 10-05-00129, 10-02-00391).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Васильев С.С., Дергачев В.А. Солнечная активность за прошедшие 10 тыс. лет по данным о космогенных изотопах ^{10}Be и ^{14}C // Изв. РАН. Сер. физ. Т. 73. С. 396–398. 2009.
- Aldahan A., Hedfors J., Possnert G., Kulan G., Berggren A.-M., Söderström C. Atmospheric impact on beryllium isotopes as solar activity proxy // Geophys. Res. Lett. V. 35. L21812. 2008. doi:10.1029/2008GL035189.
- Bakhmutov V. The connection between geomagnetic secular variation and long-range development of climate changes for the last 13,000 years // Quaternary International. V. 149. P. 4–11. 2006. doi:10.1016/j.quaint.2005.11.013

- Beer J., Baumgartner S., Dittrich-Hannen B., Hauenstein J., Kubik P., Lukaszczuk C., Mende W., Stellmacher R., Suter M. Solar Variability Traced by Cosmogenic Isotopes in The Sun as a Variable Star // Poster Proc. from IAU Colloquium 143: The Sun as a Variable Star: Solar and Stellar Irradiance Variations. Edited by J.M. Pap, C. Frolich, H.S. Hudson, S. Solanki. Cambridge: Cambridge Univ. Press. P. 291–300. 1994a.
- Beer J., Joos F., Lukaszczuk Ch., Mende W., Rodriguez J., Siegenthaler U., Stellmacher R. ^{10}Be as an indicator of solar variability and climate // The Solar Engine and its Influence on Terrestrial Atmosphere and Climate. Edited by Elizabeth Nesme-Ribes. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag. P. 221. 1994b.
- Berggren A.-M., Beer J., Possnert G., Aldahan A., Kubik R., Christl M., Johnsen S.J., Abreu J., Vinther B.M. A 600-year annual ^{10}Be record from the NGRIP ice core, Greenland // Geophys. Res. Lett. V. 36. L11801. 2009. doi:10.1029/2009GL038004.
- Bloxham J., Jackson A. Time-dependent mapping of the magnetic field at the core-mantle boundary // J. Geophys. Res. V. 97. P. 19537–19563. 1992.
- Butler R.F. Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geologic Terranes. Boston: Blackwell Scientific Publications. 1992.
- Courtillot V., Gallet Y., Le Mouél J.-L., Fluteau F., Genevey A. Are there connections between the Earth's magnetic field and climate? // Earth. Planet. Sci. Lett. V. 253. P. 328–339. 2007.
- Dahl-Jensen D., Johnsen S.J., Hammer C.U., Clausen H.B., Jouzel J. Past accumulation rates derived from observed annual layers in the GRIP ice core from Summit, central Greenland // W.R. Peltier, editor. Ice in the Climate System. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg, Germany. P. 517–532. 1993.
- Johnston D.P. An Alternative View of Global Warming. May // Internet publication. <http://www.appinsys.com/GlobalWarming/JohnstonMagneticGW.pdf>. 2008
- Field C., Schmidt G. A., Koch D. Solar and climatic effects on ^{10}Be // Memoria della Societa Astronomica Italiana. V. 76. P. 805. 2005.
- Field C.V., Schmidt G.A., Koch D., Salyk C. Modeling production and climate-related impacts on ^{10}Be concentration in ice cores // J. Geophys. Res. V. 111. D15107. 2006. doi: 10.1029/2005JD006410.
- Gallet Y., Genevey A., Courtillot V. On the possible occurrence of 'archaeomagnetic jerks' in the geomagnetic field over the past three millennia // Earth. Planet. Sci. Lett. V. 214. P. 237–242. 2003.
- Gallet Y., Genevey A., Fluteau F. Does Earth's magnetic field secular variation control centennial climate change? // Earth. Planet. Sci. Lett. V. 236. P. 339–347. 2005.
- Heikkilä U., Beer J., Feichter J. Modeling cosmogenic radionuclides ^{10}Be and ^7Be during the Maunder Minimum using the ECHAM5-HAM General Circulation Model // Atmos. Chem. Phys. V. 8. P. 2797–2809. 2008. doi:10.5194/acp-8-2797-2008.
- Heikkilä U., Beer J., Feichter J. Meridional transport and deposition of atmospheric ^{10}Be // Atmos. Chem. Phys. V. 9. P. 515–527. 2009.
- Hongre L., Hulot G., Khokhlov A. An analysis of the geomagnetic field over the past 2000 years // Phys. Earth Planet. Inter. V. 106. P. 311–335. 1998.
- Kerton A.K. Climate Change And The Earth's Magnetic Poles, A Possible Connection // Energy & Environment. V. 20. P. 75–83. 2009.
- Korte M., Constable C.G. The geomagnetic dipole moment over the last 7000 years – new results from a global model // Earth and Planetary Science Letters. V. 236. P. 348–358. 2005. doi:10.1016/j.epsl.2004.12.031.
- Kovacheva M. Archaeomagnetic database from Bulgaria: the last 8000 years // Physics of the Earth and Planetary Interiors. V. 102. P. 145–151. 1997. doi: 10.1016/S0031-9201(97)00015-0.
- Kovaitsov G.A., Usoskin I.G. Regional cosmic ray induced ionization and geomagnetic field changes // Adv. Geosciences. V. 13. P. 31–35. 2007.
- Knudsen M.F., Riisager P. Is there a link between Earth's magnetic field and low-latitude precipitation? // Geology. V. 37. P. 71–74. 2009.
- Knudsen M.F., Riisager P., Donadini F., Snowball I., Muscheler R., Korhonen K., Pesonen L.J. Variations in the geomagnetic dipole moment during the Holocene and the past 50 kyr // Earth Planet Sci Lett. V. 272. P. 319–329. 2008.
- Lal D. ^{10}Be in polar ice: Data reflect changes in cosmic ray flux or polar meteorology // Geophys. Res. Lett. V. 14. P. 785–788. 1987.
- Lomb N.R. Least-squares frequency analysis of unequally spaced data // Astrophysics and Space Science. V. 39. P. 447–462. 1976.
- Manley G.Q. Central England Temperatures: Monthly Means 1659–1973 // Quart. J. R. Met. Soc. V. 100. P. 389–405. 1974.
- Masarik J., Beer J. An updated simulation of particle fluxes and cosmogenic nuclide production in the Earth's atmosphere // J. Geophys. Res. V. 114. D11103. 2009. doi:10.1029/2008JD010557.
- Merrill R.T., McElhinny M.W., McFadden P.L. The Magnetic Field of the Earth. New York: A.P. 1996.
- Pedro J., van Ommen T., Curran T., Morgan V., Smith V., McMorro A. Evidence for climate modulation of the ^{10}Be solar activity proxy // J. Geophys. Res. V. 111. D21105. 2006. doi:10.1029/2005JD006764.
- Possnert G., Kulan A., Berggren A., Aldahan A. Beryllium Isotopes In Aerosols Over Sweden // AGU, Fall Meeting 2006, Abstract #A13D-0957. 2006.
- Press W.H., Rybicky G.B. Fast algorithm for spectral analysis of unevenly sampled data // Astrophys. J. V. 338. P. 277–280. 1989.
- Scargle J.D. Studies in astronomical time series analysis. II. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data // Astrophys. J. V. 263. P. 835–853. 1982.
- Svensmark H. Cosmic rays and Earth's climate // Space Sci. Rev. V. 93. P. 175–185. 2000.
- Tauxe L. Lectures in Paleomagnetism // Internet publication. <http://earthref.org/MAGIC/books/Tauxe/2005/>. 2005
- Vasiliev S.S., Dergachev V.A. The ~2400-year cycle in atmospheric radiocarbon concentration: Bispectrum of ^{14}C data over the last 8000 years // Annales. Geophysicae. V. 20. P. 115–120. 2002.
- Vonmoos M., Beer J., Muscheler R. Large variations in Holocene solar activity: Constraints from ^{10}Be in the Greenland Ice Core Project ice core // J. Geophys. Res. V. 111. A10105. 2006. doi:10.1029/2005JA011500.
- Yang S., Odah H., Shaw J. Variations in geomagnetic dipole moment over the last 12000 years // Geophys. J. Intern. V. 140. P. 158–162. 2000.