ПРИРОДА ЦИКЛИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ СКОРОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ^{10}Be ЗА ПОСЛЕДНИЕ 10 ТЫС. ЛЕТ

Васильев С.С., Дергачев В.А.

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

THE NATURE OF CYCLIC CHANGES IN THE RATE OF ^{10}Be FORMATION OVER THE PAST 10 THOUSAND YEARS

Vasiliev S.S., Dergachev V.A.

Ioffe Physical-Technical institute, St. Petersburg, Russia

Cosmogenic radioisotopes, such as ^{14}C , ^{10}Be , etc., are formed in the Earth's atmosphere under the influence of galactic cosmic rays. The rate of formation of cosmogenic radioisotopes depends on the magnitude of the Earth's magnetic field and solar activity. The analysis of cores of Greenland glaciers contributed to the development of methods for constructing chronological sequences of data. The age of the glacier layers for which the concentration of the cosmogenic ^{10}Be isotope was measured is consistent with the GICC05 stratigraphic scale. We used accurately dated ^{10}Be data to analyze the variability in the rate of formation of this cosmogenic isotope. The nature of the identified cycles can be sought in such phenomena as climatic effects, changes in the Earth's magnetic field and the influence of solar activity. The climatic effect on the rate of ^{10}Be deposition can be manifested through a change in the mixing rate of the cosmogenic isotope in the troposphere. A good indicator of this process is the change in the ion concentration in the GISP2 core. We have studied the process of atmospheric mixing in the northwest Atlantic and the effect of this mixing on changes in the concentration of cations (Na^+ , Ca^{2+} , etc.) and NH_4^+ , Cl^- , NO_3^- , and SO_4^{2-} anions in the GISP2 core. Of particular interest are the NO_3^- anions, since they arise during a thunderstorm. We compared the fluctuation spectra of NO_3^- (nitrates) with the ^{10}Be fluctuation spectrum. A comparison of the spectra shows that they are similar. The conclusion is drawn about the influence of storm activity and lightning formation on mixing processes in the North Atlantic during the Holocene.

DOI: 10.31725/0552-5829-2019-83-86

Введение

До конца 20-го века предполагалось, что климат в течение голоцена был стабильным без существенных изменений в таких его проявлениях, как вариации температуры, количество осадков, а также перенос атмосферных масс ветром. Однако в конце 20-го века стали появляться свидетельства климатической изменчивости на северо-западе Атлантике в голоцене.

Изменение штормовая активность на северо-западе Атлантики в течение голоцена привлекает внимание со времени публикации О'Бриен [1], когда было показано, что при формировании ледяных кернов Гренландии существенно менялась скорость накопления растворимых в воде компонент и континентальной пыли. Природа этих изменений связана с вариациями

циями скорости и направления ветра и требует выяснения, как области проявления, так и механизмов реализации.

Исследования O'Brien et al. (1995)

Наша способность прогнозировать окружающую среду и последствия антропогенных выбросов требует глубокого понимания природной атмосферно-климатической изменчивости. Данные из ледниковых кернов Гренландия показывают, что изменчивость климата была более подавленной во время эпохи голоцена, чем это было до этой эпохи во время последнего оледенения. Изучая разработанные гляциохимические временные ряды из ледяного керна Greenland Ice Sheet Project (GISP2), O'Brien et al. [1] реконструировали и точно датировали непрерывную хронологию атмосферы и окружающей среды для высоких широт северной Атлантики во время голоцена, за начало которого принимается период, отстоящий примерно на 11600 лет от настоящего времени. Были определены химические концентрации для 5 тыс. образцов голоцена при приблизительно двухлетнем интервал отборе проб. Эти концентрации были использованы для оценки изменений в скорости аккумуляции ионов морской и перенесенной с континента соли, содержащие Na, Cl, Mg и K. Скорости оседания ионов, флуктуируя, существенно менялись в течение нескольких тысяч лет, что показано на рис. 1 (левая панель).

Рис. 1. Слева – концентрация калия (в единицах ppb) в керне проекта GISP2 в течение голоцена. Верхняя и нижняя линии показывают величину дисперсии. Справа – периодограмма усредненной концентрации ионов. Верхняя гладкая кривая ограничивает амплитуды, значимость которых менее 0,95. Нижняя кривая показывает модельный уровень красного шума.

На рис. 1 (правая панель) показана усредненная периодограмма всех ионов, концентрации которых были измерены в проекте GISP2. Видно, что средняя длина цикла составляет 2700 лет. Линия с периодом 1350 лет является гармоникой основной периодичности.

Цикличность скорости аккумуляции ^{10}Be в Гренландии

Возраст слоев ледника, для которых измерялась концентрация космического изотопа ^{10}Be , согласован со стратиграфической шкалой GICC05

(Muscheler et al., [2]). Мы произвели анализ изменчивости скорости аккумуляции этого космогенного изотопа. На рис. 2 (левая панель) показана периодограмма данных по ^{10}Be . Отмечены спектральные линии с периодом ~ 2100 , 1000 , ~ 710 и 207 лет.

Рис. 2. Слева – периодограмма данных по скорости аккумуляции ^{10}Be , справа – амплитуда взаимного спектра мощности для скорости аккумуляции ^{10}Be и вариаций концентрации NO_3^- .

Природа линии с периодом ~ 2100 лет, возможно, связана с циклическим изменением величины дипольного магнитного момента Земли. Спектральная линия, имеющая период 207 лет, хорошо известна по проявлениям солнечной активности (207-летний цикл Зюсса–де Фриза), а также связью с изменениями климата в прошлом. На рисунке 2 (левая панель) наряду с периодом линии указана ошибка положения, которая определяется как ширина линии на половине высоты.

В целом, происхождение спектральных линий для данных по ^{10}Be не является вполне ясным за исключением линии, соответствующей циклу Зюсса–де Фриза. Природу выявленных циклическостей можно искать в таких явлениях, как климатическое воздействие, изменение магнитного поля Земли и влиянии солнечной активности. Климатическое воздействие на скорость осаждения ^{10}Be может проявляться через изменение скорости перемешивания космогенного изотопа в тропосфере. Хорошим индикатором этого процесса являются изменения концентраций ионов в керне GISP2. В предыдущем разделе был представлен результат изучения процесса перемешивания атмосферы на северо-западе Атлантики и влияние этого перемешивания на изменения концентрации катионов (Na^+ , Ca^{2+} и др.) в керне GISP2. Был изучен спектр флуктуаций этих изменений и показано, что основными периодами являются 2700 и 1350 лет (смотри рис. 1). Этот спектр существенно отличается от спектра флуктуаций ^{10}Be , поэтому естественно заключить, что процессы, приводящие к флуктуациям концентраций катионов и ^{10}Be , различаются.

Сравнение концентрации анионов и ^{10}Be в керне GISP2

Наряду с катионами, в данные GISP2 содержатся анионы NH_4^- , Cl^- , NO_3^- и SO_4^{2-} . Анионы NO_3^- (нитраты) возникают во время грозы в резуль-

тате разряда молний. Их образование не связано с переносом воздушных масс и имеет, по-видимому, локальный характер. Отличие природы образования NO_3^- от природы образования других анионов побудило сравнить содержание этого аниона с концентрацией ^{10}Be в надежде понять природу его спектра. Изучена периодограмма нитратов. Она в некоторых деталях сходна с периодограммой ^{10}Be . Для проверки идентичности процесса аккумуляции ^{10}Be и вариаций концентрации нитратов был проведен взаимный спектральный анализ этих данных. Результаты представлены на рис. 2 (правая панель).

Из полученного взаимного спектра мощности следует, что природа этих процессов общая.

Выводы

1. В течение голоцена в регионе Гренландии в результате происходящих штормов происходит осаждение катионов и анионов, содержащихся в морской воде и континентальной пыли. Процесс имеет циклический характер. Длина основного цикла составляет 2700 лет.

2. Изучен спектр мощности для скорости аккумуляции ^{10}Be . Показано, что вариации скорости выпадения бериллия-10 не определяются циклическими изменениями скорости переноса воздушных масс в регионе.

3. Показано, что вариации скорости аккумуляции ^{10}Be подобны вариациям концентрации нитратов в керне GISP2, что подтверждается взаимным спектром мощности этих рядов.

4. Изучен механизм влияния вариаций концентрации нитратов на скорость осаждения ^{10}Be . Показано, что увеличение концентрации нитратов в атмосфере приводит к возрастанию числа аэрозолей. В результате увеличивается поток ^{10}Be , захваченный этими аэрозолями.

Литература

1. *O'Brien, S.R., Mayewski, P.A., Meeker, L.D., et al.* Complexity of Holocene Climate as Reconstructed from a Greenland Ice Core // *Science*, 1995, 270, 1962-1964. DOI: 10.1126/science.270.5244.1962 .
2. *Muscheler, R., Adolphi, F., Svensson, A.* Challenges in ^{14}C dating towards the limit of the method inferred from anchoring a floating tree ring radiocarbon chronology to ice core records around the Laschamp geomagnetic field minimum // *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, 394, 209–215. <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2014.03.024>