СОЛНЕЧНЫЙ МОДУЛЯЦИОННЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ПО ДАННЫМ О КОСМОГЕННЫХ ИЗОТОПАХ ЗА ПОСЛЕДНИЕ 10 ТЫС. ЛЕТ

Васильев С.С., Дергачев В.А.

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия
e-mail: v.dergachev@mail.ioffe.ru

SOLAR MODULATION POTENTIAL ACCORDING TO DATA ON COSMOGENIC ISOTOPES OVER THE PAST 10 THOUSAND YEARS

Vasiliev S.S., Dergachev V.A.

A.F. Ioffe Physical-Technical Institute, St. Petersburg, Russia
e-mail: v.dergachev@mail.ioffe.ru

Cosmogenic radioisotopes, such as ^{14}C , ^{10}Be , etc., are formed in the Earth's atmosphere under the influence of galactic cosmic rays. The production rate of cosmogenic radioisotopes depends on the magnitude of the Earth's magnetic field and solar activity. To reconstitute solar activity in the past, we can use data on the magnitude of the Earth's dipole moment, as well as data on the concentration of cosmogenic isotopes from natural archives.

Radiocarbon, fixed by tree rings, forms a chronological sequence (chronology), which can be used to synchronize the series of cosmogenic isotopes ^{10}Be and ^{14}C . Synchronization allows you to specify the age of ice layers for which the concentration of ^{10}Be is measured. As a result of synchronization, a refined chronology for ^{10}Be is obtained (Muscheler et al., 2014).

Solar modulation potential (SMP) is a measure of solar activity. The relationship between the SMP, the magnitude of the Earth's dipole moment and the production rate of ^{10}Be was studied earlier in Kovaltsov and Usoskin (2010). To calculate the solar modulation potential for the last 10 thousand years, we used the synchronized sequence for ^{10}Be (Muscheler et al. 2014) data on the Earth's dipole moment (Constable et al. 2016) and the model of Kovaltsov and Usoskin (2010). The data for the last 10 thousand years were considered. The analysis of the obtained SMP series showed the presence of cycles of length 210 (Suess or de Vries cycle) and 700 years. The presence of Hallstatt cycle (2300-year cycle) in the SMP is not detected. The results of the studies contradict the notion that the Hallstatt cycle is of solar origin.

DOI: 10.31725/0552-5829-2018-87-90

1. Синхронизация данных по ^{10}Be с $\Delta^{14}\text{C}$ данными

На скорость образования космогенных изотопов влияет величина солнечной активности, а также интенсивность магнитного поля Земли. Быстрые или значительные изменения этих величин отражаются в скорости образования космогенных изотопов.

При синхронизации рядов по ^{10}Be с рядами концентраций радиоуглерода ($\Delta^{14}\text{C}$) в данных находят изменения большой величины (выбросы). Важно, чтобы эти изменения вызывались одинаковым воздействием, например, вариациями солнечной активности или изменениями магнитного поля Земли. В данном случае для синхронизации двух рядов были ис-

пользованы выбросы, обусловленные циклом Хальштата (Hallstatt cycle, или 2300–2400-летний цикл), который впервые наблюдался в $\Delta^{14}\text{C}$ данных. Процесс синхронизации демонстрируется на рис. 1. В классическую временную шкалу [1], описывающую зависимость возраста образца от глубины в керне ледника, для ^{10}Be внесены поправки с целью синхронизировать даты выбросов в двух рядах.

Рис. 1. Сравнение данных по радиоуглероду и ^{10}Be за последние ~6000 лет. Верхняя кривая – данные по относительной концентрации радиоуглерода в единицах per mil, нижняя кривая – данные по скорости образования ^{10}Be в единицах $10^6 \text{ atoms/cm}^2/\text{yr}$.

Рис. 2. Глобальная скорость образования ^{10}Be ($\text{atoms cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$) по вертикали как функция солнечного модуляционного потенциала ϕ и величины магнитного дипольного момента Земли [2] в относительных единицах.

2. Солнечный модуляционный потенциал

Солнечный модуляционный потенциал (СМП) может быть вычислен по известным зависимостям скорости образования космогенного изотопа ^{10}Be от времени и значениям дипольного момента Земли в те же моменты времени. Схема вычисления следует из рис. 2. Для вычисления солнечного модуляционного потенциала S проводится двумерная интерполяция: $S(t) = F(Q(t), M(t))$, где через Q обозначена скорость образования ^{10}Be , а через M – значение дипольного момента. Функция F соответствует модели [2] (см. рис. 2).

Рис. 3. Солнечный модуляционный потенциал. Плавной кривой обозначен тренд.

Рис. 4. Солнечный модуляционный потенциал после удаления долговременного тренда.

В работе для вычисления СМП использовались данные по ^{10}Be (GRIP) за 9.5 тыс. лет, синхронизированные с рядом по $\Delta^{14}\text{C}$ [3], а также данные по магнитному дипольному моменту Земли [4]. Результаты вычисления показаны на рис. 3 и 4.

На первый взгляд, изменения ряда СМП (рис. 3) имеет хаотический характер. Для более детального изучения был проделан спектральный анализ этого ряда. Предварительно был удален долговременный тренд (см. рис. 4). Полученный спектр мощности показан на рис. 5.

Рис. 5. Спектр мощности солнечного модуляционного потенциала.

Рис. 6. Спектр мощности данных по дипольному моменту Земли [4].

В спектре наблюдаются две линии, имеющие периоды 710 и 207 лет. 207-летняя линия соответствует циклу Зюсса-де Фриза. 710-летняя линия не наблюдается в данных по солнечной активности. На периодограмме отсутствует линия, период которой ~2300 лет (Hallstatt цикл). Это ставит вопрос о природе 2300-летнего цикла, наблюдаемого в данных космогенных изотопов.

3. Поиск 710-летней периодичности в исходных данных

Рассмотрим периодограмму магнитного дипольного момента (рис. 6). На ней доминирующей особенностью является ~2300-летняя линия, объясняющая Хальштатт-цикл в радиоуглеродных данных [5]. На этой периодограмме отсутствует значимая особенность, соответствующая 710-летней периодичности. Следовательно, вариации дипольного момента не могут являться причиной появления 710-летней линии на периодограмме СМП.

На наш взгляд, наиболее вероятной причиной появления этой линии является миграция магнитного полюса. На рис. 7 показано положение северного магнитного полюса по данным [6]. В течение последних 7000 лет положение полюса смещалось к востоку (на рисунке это соответствует уменьшению параметра AGE). В то же время происходили флуктуации положения полюса относительно тренда. Для анализа флуктуаций долговременный тренд был удален из данных и проведен спектральный анализ. На периодограмме (рис. 8) обнаружена значимая 710-летняя линия, которую можно соотнести с соответствующей линией в спектре СМП.

Рис. 7. Дрейф северного магнитного полюса. Долгота отсчитывается в восточном направлении.

Рис. 8. Периодограмма флуктуаций долготы северного магнитного полюса. На перидограмме заметна 710-летняя линия.

Итоги

Данные по ^{10}Be совместно с данными по дипольному моменту Земли были использованы для вычисления солнечного модуляционного потенциала (СМП).

Проведен спектральный анализ СМП. В спектре найдены циклические компоненты, имеющие период 710 и 207 лет. Циклическая компонента, имеющая период ~ 2300 лет отсутствует.

Наиболее вероятной причиной появления 710-летней линии являются флуктуации наклона магнитного диполя.

Литература

1. *Johnsen, S.J. et al.* // Journal of Geophysical Research. 1997. V. 102. P. 26397-26410.
2. *Kovaltsov, G.A. and Usoskin, I.G.* // Earth and Planetary Science Letters. 2010. V. 291. P. 182–188.
3. *Muscheler, R., Adolphi, F. and Anders Svensson, A.* // Earth and Planetary Science Letters. 2014. 394: 209–215.
4. *Constable, C., Korte, M., Panovska, S.* // Earth and Planetary Science Letters. 2016. V. 453. P. 78–86.
5. *Dergachev, V.A. and Vasiliev, S.S.* // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2018. In print.
6. *Korte, M. and Manda, M.* // Planets and Space. 2008. V. 60. P. 937–948.