

## **ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРА СОЛНЕЧНОЙ МОДУЛЯЦИИ В ГОЛОЦЕНЕ И НАКЛОН ГЕОМАГНИТНОГО ДИПОЛЯ**

**Васильев С.С., Дергачев В.А.**

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

## **CHANGES IN THE SOLAR MODULATION PARAMETER IN THE HOLOCENE AND THE TILT OF THE GEOMAGNETIC DIPOLE**

**Vasiliev S.S., Dergachev V.A.**

*Ioffe Physical-Technical Institute of the RAS, St. Petersburg, Russia*

*In calculating the solar modulation parameter  $\Phi$  over the past millennia, the relationship between the rate of formation of cosmogenic isotopes, the Earth's dipole moment, and the value of  $\Phi$  is usually used. In these studies, the cosmogenic isotopes  $^{14}\text{C}$  and  $^{10}\text{Be}$  are considered. In studying solar modulation, the cyclic change in the tilt of the Earth's magnetic dipole is usually not taken into account. In our work, we used an approach based on empirical modes decomposition, which allowed us to exclude the influence of changes in the dipole tilt on the assessment of solar activity in the past.*

**<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2024-57-60>**

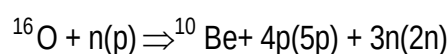
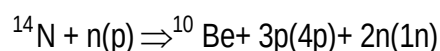
### **1. Введение**

#### ***1.1. Распространение космических лучей в Солнечной системе***

Скорость образования космогенных радионуклидов зависит от интенсивности проникновения галактических космических лучей (ГКЛ) в атмосферу Земли. Прежде чем достичь Земли, ГКЛ должны пересечь гелиосферу, где они подвергаются воздействию солнечной модуляции. Распространение ГКЛ через гелиосферу описывается уравнением переноса космических лучей, сформулированным Parker [1]. Спектры ГКЛ и, соответственно, скорость образования космогенных радионуклидов зависят от локального межзвездного спектра космических лучей  $J_{\text{LIS}}$  и параметра солнечной модуляции  $\Phi$ . Различные подходы к определению  $J_{\text{LIS}}$  описаны Herbst et al. [2].

#### ***1.2. Образование космогенного изотопа $^{10}\text{Be}$ в атмосфере Земли***

Протоны и нейтроны космических лучей, проникая в атмосферу, взаимодействуют с азотом и кислородом, образуя  $^{10}\text{Be}$  по реакциям:



Скорость образования изотопов зависит от падающего на атмосферу потока космических лучей, который изменяется вследствие модулирующего влияния солнечного ветра и магнитного поля Земли.

### **1.3. Магнитное поле Земли**

Магнитное поле Земли является в основном дипольным. Магнитное поле Земли в прошлом определено по археомагнитным данным. Дипольный момент  $D$  для голоцена подробно изучался McElhinny and Senanayake [3], а также Yang et al. [4], Knudsen et al. [5], которые использовали большой объем археомагнитных данных. Другой подход был использован Korte and Constable [6], которые на основе данных об археонапряженности и отложениях разработали модель сферического гармонического поля для оценки изменений дипольного момента.

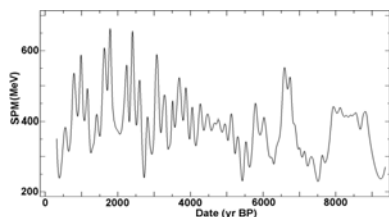
### **1.4. Параметр солнечной модуляции**

На скорость образования космогенных изотопов  $Q$ , таких как  $^{10}\text{Be}$  или  $^{14}\text{C}$ , влияет локальный спектр космических лучей в окрестностях Земли  $J_{\text{LIS}}$ , напряженность геомагнитного поля и параметр солнечной модуляции  $\Phi$ . Обычно для расчета  $Q$  используются численные методы. Подробности этого подхода можно найти у Masarik and Beer [8], а также у Kovaltsov and Usoskin [9].

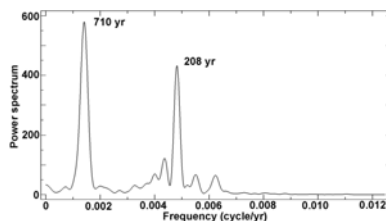
## **2. Методы и результаты**

### **2.1. Реальный подход к расчету параметра солнечной модуляции $\Phi$**

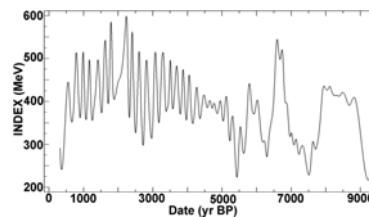
При вычислении современного выражения для  $\Phi$  использовались данные о скорости образования космогенного изотопа  $^{10}\text{Be}$ , синхронизированные с радиоуглеродной шкалой (Muscheler et al. [7]), а также актуальные данные о дипольном моменте Земли (Constable et al. [10]). Для расчета  $\Phi$  мы использовали соотношение, полученное Kovaltsov and Usoskin [9]. Результаты расчета представлены на рис. 1.



**Рис. 1.** Параметр солнечной модуляции  $\Phi$  для последних 9.5 тысяч лет



**Рис. 2.** Спектр мощности компонент IMF1 и IMF2 в произвольных единицах.



**Рис. 3.** Скорректированный параметр солнечной модуляции  $\Phi_{\text{cor}}$ .

Ряд называется стационарным, если такие статистические характеристики временного ряда, как его математическое ожидание, дисперсия и ковариация не зависят от момента времени. Полученный ряд для  $\Phi$  (см. рис. 1), очевидно, не является стационарным, что затрудняет анализ классическими методами. Для анализа нестационарных рядов разработан ряд методов, наиболее популярными из которых являются секулярный спектральный анализ и разложение по эмпирическим модам (EMD).

Для анализа данных о параметрах солнечной модуляции было применено разложение EMD (Huang et al. [11]). В результате стандартной процедуры данные могут быть представлены в виде комбинации нескольких осциллирующих составляющих и тренда.

Первые две моды, IMF1 и IMF2, представляют собой квазипериодические компоненты. Период колебаний первого компонента составляет ~208 лет. При изучении космогенных изотопов этот цикл известен как цикл Де Фриза (Grootes et al. [12]). Вторая мода, IMF2, демонстрирует колебания с периодом ~710 лет. Спектр мощности первых двух компонент представлен на рис. 2.

Колебания с обсуждаемым периодом около 710 лет при анализе космогенных изотопов не наблюдались. Нет таких вариаций и в данных об изменении дипольного геомагнитного момента. Мы обратили внимание на возможную связь этих колебаний с изменением наклона дипольного момента Земли во времени.

## **2.2. Флуктуации положения северного геомагнитного полюса и 710-летний цикл**

Nilsson et al. [13] исследовали наклон геомагнитного диполя в голоцене на основе палеомагнитных данных. Показано, что широта северного геомагнитного полюса меняется циклически с периодами 2700 и 1350 лет.

## **2.3. Влияние наклона магнитного диполя на $\Phi$**

Влияние наклона магнитного диполя Земли на  $\Phi$  практически полностью определяется второй компонентой (IMF2) в EMD-разложении параметра солнечной модуляции. Мы исключили эту компоненту, просуммировав все остальные в EMD-разложении. На рис. 3 показан скорректированный параметр солнечной модуляции  $\Phi_{\text{cor}}$ , свободный от влияния изменения наклона магнитного диполя.

$\Phi_{\text{cor}}$  меняется по-разному в первой и второй половине рассматриваемого интервала времени. В интервале от 5000 лет до настоящего времени колебания параметра происходят с различной амплитудой. Максимальная амплитуда достигается около 2500 лет н. э. В более раннее время, от 9.5 тыс. лет. до 5000 лет н. э., картина изменений более сложная.

## **3. Выводы**

Исследование посвящено восстановлению параметра солнечной модуляции  $\Phi$  на основе данных о скорости образования  $^{10}\text{Be}$  и значении магнитного дипольного момента Земли за последние 9.5 тысяч лет. Циклические изменения наклона диполя вносят дополнительный вклад в оценку  $\Phi$ , не связанный с солнечной активностью. С помощью разложения по эмпирическим модам (EMD) удалось выделить сигнал, связанный с изменением

наклона диполя, и сгенерировать сигнал, характеризующий солнечную активность за 9.5 тысяч лет.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российской академии наук в рамках государственного задания FFUG-2024-0002.

#### Литература

1. *Parker E.N.* Planet. // Space Sci., 1965, **13** (1), 9  
DOI:10.1016/0032-0633(65)90131-5
2. *Herbst K., A. Kopp, B. Heber, et al.* // J. Geophys. Res., 2010, **115**, D00I20  
DOI: 10.1029/2009JD012557
3. *McElhinny M.W., W.E. Senanayake* // J. Geomag. Geoelectr., 1982, **34**, 39  
DOI:10.5636/jgg.34.39
4. *Yang S., H. Odah, J. Shaw* // Geophys. J. Int., 2000, **140** (1), 158  
DOI: 10.1046/j.1365-246x.2000.00011.x
5. *Knudsen M.F., P. Riisager, F. Donadini, et al.* // Earth Planet. Sci. Lett., 2008, **272**, 319  
DOI: 10.1016/j.epsl.2008.04.048
6. *Korte M., C. Constable* // Geochem. Geophys. Geosyst., 2005, **6**, Q02H16.  
DOI:10.1029/2004GC000801
7. *Muscheler R., F. Adolphi, M.F. Knudsen* // Quat Sci Rev., 2014, **106**, 81  
DOI:10.1016/j.quascirev.2014.08.017
8. *Masarik J., J. Beer* // J. Geophys. Res., 1999, **104** (D10), 12099  
DOI:10.1029/1998JD200091
9. *Kovaltsov G.A., I.G. Usoskin* // Earth Planet. Sci. Lett., 2010, **291**, 182  
DOI:10.1016/j.epsl.2010.01.011
10. *Constable C., M. Korte, S. Panovska* // Earth Planet. Sci. Lett., 2016, **453** (2), 78  
DOI:10.1016/j.epsl.2016.08.015
11. *Huang N.E., Man-Li Wu, S.R. Long, et al.* // Proc. R. Soc. Lond., 2003, A, **459**, 2317.  
DOI: 10.1098/rspa.2003.1123
12. *Grootes P.M., H. van der Plicht* // Radiocarbon, 2022, **64**, 419  
DOI: 10.1017/RDC.2021.63
13. *Nilsson A., R. Muscheler, I. Snowball* // EPSL, 2011, **299**, 31  
DOI:10.1016/j.epsl.2011.09.030