**ГЕЛИОСФЕРНЫЙ МОДУЛЯЦИОННЫЙ ПОТЕНЦИАЛ,
РЕКОНСТРУИРОВАННЫЙ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ
ПО СОДЕРЖАНИЮ КОСМОГЕННОГО ИЗОТОПА ^{10}Be ВО ЛЬДАХ
ГРЕНЛАНДИИ, И ЭКСТРЕМУМЫ АКТИВНОСТИ СОЛНЦА**

Кудрявцев И.В.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

**HELIOSPHERIC MODULATION POTENTIAL RECONSTRUCTED ON
THE BASE OF THE COSMOGENIC ISOTOPE ^{10}Be CONTENT IN
GREENLAND ICE AND THE EXTREMES OF SOLAR ACTIVITY**

Kudryavtsev I.V.

Ioffe institute, St. Petersburg, Russia

The reconstructions of heliospheric modulation potential on base cosmogenic isotope ^{10}Be concentration from the end of 14 century in Greenland ice(NGRIP) are presented. This time interval includes the Spoerer ($\approx 1400\text{--}1510$ AD), Maunder($\approx 1645\text{--}1715$ AD) and Dalton($\approx 1790\text{--}1830$ AD) deep minima of solar activity. The results of reconstructions show that the depth of Maunder and Dalton minima can be equal. But the depth of Spoerer solar minimum can be less than the depth of Dalton minimum.

DOI: 10.31725/0552-5829-2019-245-248

Данные по содержанию космогенных изотопов в природных архивах позволяют нам изучать интенсивность галактических космических лучей (ГКЛ) и солнечную активность (СА) в далекие эпохи, для которых отсутствуют прямые экспериментальные и наблюдательные данные. Настоящая работа посвящена рассмотрению гелиосферного модуляционного потенциала на основе данных о содержании космогенного изотопа ^{10}Be во льдах Гренландии NGRIP [1]. Гелиосферный модуляционный потенциал (ГМП), как известно, описывает модуляцию ГКЛ межпланетным магнитным полем (ММП) при их распространении в солнечной системе. ММП, в свою очередь, изменяется при изменении солнечной активности. Таким образом, реконструкция ГМП позволяет нам изучать активность Солнца в прошлом. До настоящего времени не прекращаются обсуждения глобальных минимумов солнечной активности Шпёрера и Маундера – были ли они более глубокие, чем минимум Дальтона или нет (см. например, работы [2–6])? Для ответа на этот вопрос рассмотрим данные о содержании космогенного изотопа ^{10}Be во льдах Гренландии NGRIP [1]. На рисунках 1А, Б показаны концентрация этого изотопа в годовых слоях льда в Гренландии полученных из скважины и скорость осаждения изотопа ^{10}Be на поверхность ледника, соответственно.

Проведем реконструкцию гелиосферного потенциала $\varphi(t)$ согласно методике, описанной в работах [9, 10] и которая сводится к решению следующего уравнения:

$$Q(t) = \sum_{i=1}^2 \int_0^{\infty} Y_i J_i(E, t) (1 - f(E, M(t))) dE \quad (1)$$

где $Q(t)$ – скорость генерации космогенного изотопа ^{10}Be в атмосфере Земли под действием частиц ГКЛ; t – время; J_i – спектр протонов и α -частиц первичных космических лучей (КЛ) на орбите Земли; f – функция описывающая проникновение заряженных частиц в земную атмосферу; M – геомагнитный дипольный момент в единицах 10^{22}Am^2 ; Y_i – функции описывающие генерацию изотопа ^{10}Be под действием протонов ($i = 1$) и α -частиц ($i = 2$) первичных КЛ в атмосфере Земли [10]; E – энергия частиц (ГэВ/нуклон).

Рис. 1. А и Б – концентрация изотопа ^{10}Be в годичных слоях льда в Гренландии и скорость его осаждения [1]. В – геомагнитный дипольный момент [7, 8].

Спектр протонов и α -частиц J_i может быть задан в виде следующей зависимости [9]

$$J_i = J_{lis,i}(E + \Phi_i) \frac{E(E + 2E_r)}{(E + \Phi_i)(E + \Phi_i + 2E_r)}, \quad (2)$$

где $J_{lis,l}$ – локальный межзвездный спектр ГКЛ, который определяется выражением

$$J_{lis}(E) = \frac{1.9 \cdot 10^4 P(E)^{-2.78}}{1 + 0.4866 P(E)^{-2.51}}, \quad P(E) = \sqrt{E(E + 2E_r)},$$

$$\Phi_i = (eZ_i / A_i) \varphi;$$

Функция f , в свою очередь, задается выражением:

$$f(E) = \begin{cases} \sqrt{1 - \sqrt{P(E)/(1.9M)}} & \text{при } P \leq 1.9M \\ 0 & \text{при } P \geq 1.9M \end{cases}$$

На рисунке 1В представлен дипольный магнитный момент Земли M согласно работам [7, 8]. В 15 веке его величина росла, достигнув максимума к началу 16 века. В середине 17 века его спад остановился, а в середине 18 начался быстрый спад. С увеличением величины φ значение Q монотонно спадает (см., например, [5]), что позволяет легко определить его значение для известного значения $Q(t)$. Однако здесь необходимо отметить, что связь величины скорости осаднения изотопа ^{10}Be на поверхность ледника F со скоростью образования этого изотопа в атмосфере Q достаточно сложная, она зависит от локальных климатических условий (см., например, [6]) и к настоящему времени не достаточно хорошо изучена. Поэтому на рисунке 2А, Б приведены результаты расчетов для двух различных значений отношения Q/F . Толстой линией показано усреднение за 11 лет. На рисунке 2В приведена реконструкция для зависимости между $Q(t) = 0.004 + 3.23F(t)$, полученной в работе [6].

Заключение

Как видно на рисунках 2А-В, минимальные значения модуляционного потенциала во время минимумов Шперера, Маундера и Дальтона могли опускаться до нулевых значений. При этом минимальные величины для усредненных по 11 годам значениям модуляционного потенциала равны для этих минимумов 0.442, 0.306, 0.288 ГВ при $Q/F = 2.5$ и 0.250, 0.153, 0.155 ГВ при $Q/F = 3$, соответственно. Для зависимости $Q(t) = 0.004 + 3.23F(t)$ эти значения равны 0.1, 0.059, 0.063 ГВ для минимумов Шперера, Маундера и Дальтона, соответственно. Таким образом, данные NGRIP не указывают на то, что глубина минимума Маундера была экстремально низкой. Более того, глубины минимумов Маундера и Дальтона могли быть сравнимы, на что и указывалось в работах [3–5]. Средние значения гелиосферного модуляционного потенциала во время минимума Шперера превышали значения во время минимума Дальтона, что также не позволяет сделать вывод об экстремально низкой активности Солнца в этот период. Хотя надо отметить, что длительность минимумов

Шпёра и Маундера значительно превышала длительность минимума Дальтона.

Рис. 2. Реконструированные значения гелиосферного модуляционного потенциала для различных зависимостей между скоростью генерации изотопа ^{10}Be и скоростью его осаждения.

Литература

1. *Berggren A.-M. et al.* // *Geophys. Res. Lett.*, 2009, 36, L11801.
2. *Usoskin G. et al.* // *Astronomy & Astrophysics*, 2015, V. 581, A95.
3. *Zolotova N.V. and Ponyavin D.I.* // *Astrophys. J.*, 2015, V. 800, id42.
4. *Kuleshova A.I. et al.* // *Geomagnetism and Aeronomy*, 2015, V. 55, P1071.
5. *Koudriavtsev I.V. et al.* // *Geomagnetism and Aeronomy*, 2016, V. 56, P998.
6. *Ogurtsov M.G.* // *Astronomy Letters*, 2018, V. 44, P. 278.
7. *Licht et al.* // *Phys. Earth Planet. Inter.*, 2013, V. 224, P.28.
8. *Usoskin G. et al.* // *Astronomy & Astrophysics*, 2014, V. 562, L10.
9. *Kovaltsov G.A. et al.* // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2012, V.337, P. 114.
10. *Poluianov S.V. et al.* // *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2016, V. 121, P. 8125.