ПРОЯВЛЕНИЕ СЖАТИЯ ГЕЛИОСФЕРЫ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ ЧЕРЕЗ МЕЖЗВЁЗДНЫЕ ОБЛАКА

**Васильев Г.И.¹, Константинов² А.Н., Кудрявцев И.В.¹,
Огурцов М.Г.^{1,3}, Остряков В.М.², Павлов А.К.¹, Фролов Д.А.²**

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

²СПбПУ Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

³Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

A MANIFESTATION OF COMPRESSION OF THE HELIOSPHERE WITH THE PASSAGE OF THE SOLAR SYSTEM THROUGH INTERSTELLAR CLOUDS

**Vasilyev G.I.¹, Konstantinov² A.N., Koudriavtsev I.V.¹,
Ogurtsov M.G.^{1,3}, Ostryakov V.M.², Pavlov A.K.¹, Frolov D.A.²**

¹Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia

²Peter the Great St. Petersburg State Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

³Central Astronomical Observatory, at Pulkovo of RAS, St. Petersburg, Russia

We consider the possibility of explaining large ^{14}C excursion in 5480 BC by the passage of a dense cloud of interstellar gas with small dimensions (10–100 AU) by the Solar System. In this case, the compression of the heliosphere leads to the suppression of the modulating effect of solar activity on the Galactic Cosmic Rays without changing activity of the Sun itself. The features of the reflection of this event in dated natural “archives” accumulating cosmogenic isotopes are discussed. We also propose experiments on the ^3He measurements which could support (or reject) this hypothesis.

DOI: 10.31725/0552-5829-2018-83-86

Введение

В атмосфере Земли под действием галактических космических лучей (ГКЛ) возникают ядерные каскады, в которых образуются долгоживущие радиоактивные изотопы ^{10}Be и ^{14}C , фиксируемые в природных датированных архивах (кольца деревьев, керны полярных льдов, донные отложения). Поэтому их концентрация в архивах отражает историю потоков ГКЛ за длительный промежуток времени, сравнимый с периодом полураспада этих изотопов. Известно, что в истории Солнца существовали периоды (Маундера, Шперера, Вольфа и др.), когда потоки КЛ и, следовательно, скорость образования изотопов были аномально высоки, что проявлялось в увеличении содержания ^{14}C в кольцах деревьев. В то же время, недавно были обнаружены периоды повышения концентрации радиоуглерода (например, около 5480 г. до н.э.), когда рост скорости образования ^{14}C происходил значительно быстрее по сравнению с отмеченными выше аномальными периодами [1]. Это может означать иную природу этих возрастных изменений, связанную, например, с аномальным поведением Солнца [1]. Эксперимен-

тальные зависимости изменения концентрации ^{14}C в древесных кольцах от времени в сравнении с маундеровским периодом [1, 2] приведены на рис. 1.

Рис. 1.

Проведённый вейвлет анализ этих экспериментальных данных (после вычитания временного тренда) показал, что 11-летний цикл солнечной активности оставался практически неизменным до и после достижения максимальной скорости. Вариации содержания ^{14}C на плато оказываются незначительными. В настоящей работе рассматривается объяснение этих особенностей прохождением Солнечной системы (СС) через плотное компактное межзвёздное газовое облако (МЗГ).

Восстановление скорости образования ^{14}C в земной атмосфере по измеренным образцам

При сжатии гелиосферы в плотных облаках МЗГ поток и спектр ГКЛ на орбите Земли могут приближаться к локальному межзвёздному (LIS). Для этого размер области модуляции R должен стать меньше длины свободного пробега частиц ГКЛ, L , относительно их взаимодействия с магнитными неоднородностями солнечного ветра. При этом L зависит от гелиоцентрического расстояния и от энергии частиц. Основной вклад в образование рассматриваемых изотопов вносят частицы с энергией в пределах 0.1–10 ГэВ/нукл. Поэтому сжатие области модуляции должно происходить до значений $R < 4$ а.е., что возможно для плотности газа в облаке $n > 100 \text{ см}^{-3}$ [3]. Момент коллапса гелиосферы определяется относительной скоро-

стью движения СС и облака МЗГ. Взаимодействие между ними может происходить только в области эффективной ионизации водорода МЗГ при УФ-ионизации и перезарядке нейтрального водорода на протонах солнечного ветра, которая начинается на гелиоцентрических расстояниях 4–6 а.е. Вновь образованные ионы вовлекаются в потоки солнечного ветра через взаимодействие с его магнитными полями, приводя к его торможению. Для современной скорости столкновения СС с МЗГ ~ 30 км/с время сжатия геиосферы в зависимости от градиента плотности МЗГ в облаке и геометрии столкновения может составлять менее 10 лет. Поток ГКЛ при этом будет возрастать с тем же характерным временем.

С помощью пакета GEANT4 нами были выполнены расчеты образования ^{14}C и ^{10}Be в земной атмосфере на высотах 0–130 км в ядерных атмосферных каскадах, вызванных ГКЛ. При этом использовались различные модельные представления LIS для протонов и альфа-частиц. В расчётах учитывалось влияние геомагнитного поля на скорость генерации изотопов. Методика расчёта описана в работе [4]. Кроме модуляции ГКЛ солнечной активностью факторами, влияющими на изменение скорости образования изотопов, являются изменения глобальной температуры, геомагнитного поля, концентрации CO_2 , но они в рассматриваемый период оставались практически неизменными.

Образованный ^{14}C перераспределяется между стратосферой, тропосферой, биосферой, гумусом, верхним и нижним слоями океана. При вычислении скорости генерации ^{14}C , $Q(t)$, (на основе экспериментальных данных) использовалась пятирезервуарная модель углеродного цикла. После вычитания тренда скорости образования изотопа, полученного фурье-фильтрацией, вейвлет-анализ выявил для периода BC 5467–5422 с уровнем доверительной вероятности более 0.95 четыре квази-11-летних цикла продолжительностью 9–15 лет, а для периода BC 5486–5476 – один цикл длительностью ~ 10 лет.

Возможное подтверждение прохождения Солнечной системы через облако межзвездного газа по измерениям ^3He в ледяных ядрах

Прохождение плотных облаков может приводить к значительному захвату нейтрального He атмосферой Земли. Благодаря высокому потенциалу ионизации нейтральные атомы He могут проникать в область <1 AU до их ионизации УФ-излучением Солнца с вероятностью $\sim 50\%$. Отношение концентраций $^3\text{He}/^4\text{He}$ в современной атмосфере составляет $1.38 \cdot 10^{-6}$, а в межзвёздной среде $3 \cdot 10^{-6}$. Скорость атомов He относительно Земли зависит от направления и скорости движения Солнечной системы относительно межзвездного газа и положения Земли на орбите и составляет 50–100 км/с. Поэтому для изменения отношения $^3\text{He}/^4\text{He}$ в атмосфере на 1% достаточно аккреции He из облака в течение 20–30 лет при плотности газа 100 ат/см³. Изменение $^3\text{He}/^4\text{He}$ в атмосфере во времени может быть измерено в газах,

захваченных в ледяные керны Антарктиды и Гренландии. Более быстрая скорость диффузии ^3He при образовании льда по сравнению с ^4He приводит к тому, что $^3\text{He}/^4\text{He} < 1$. В работе [5] выявлены керны со станции Восток с отношением $^3\text{He}/^4\text{He} > 1$, что может говорить о внесении в атмосферу гелия с измененным изотопным отношением относительно обычного.

Выводы

1. Период около ВС 5480 с аномальной скоростью образования ^{14}C может быть объяснен прохождением Солнечной системы через компактное межзвездное облако с плотностью более 100 ат/см^3 с подавлением модуляции ГКЛ из-за сжатия гелиосферы.

2. Циклические процессы на Солнце при этом продолжались без заметных сбоев.

3. Исследование содержания ^3He в образцах полярных льдов этого периода может подтвердить или опровергнуть сделанные выше предположения

4. Необходим поиск подобных периодов в датировемых природных архивах.

Благодарности

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 18-02-00583 и Программой фундаментальных исследований Президиума РАН № 28.

Литература

1. Miyake F. et al. // PNAS. 2017. L3. P. 881.
2. Stuiver M. // Radiocarbon. 1998. V. 40. P. 1127.
3. Zank G.P., Frisch P.C. // Astrophys. J. 1999. V. 518. P. 965.
4. Pavlov A.K. et al. // J. Atm. Solar-Terrestrial Phys. 2017. V. 164. P. 308.
5. Bender et al. // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. D21115.