КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ И РАЗЛИЧНЫЕ РЕКОНСТРУКЦИИ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА ОСНОВЕ КОСМОГЕННЫХ ИЗОТОПОВ

Кудрявцев И.В.^{1,2}

¹*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия*

²*Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия*

THE CLIMATIC CHANGES AND DIFFERENT RECONSTRUCTIONS OF SOLAR ACTIVITY ON THE BASIS OF COSMOGENIC ISOTOPES

Kudryavtsev I.V.^{1,2}

¹*Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia*

²*Central Astronomical Observatory of RAS, St. Petersburg, Russia*

The cosmogenic isotopes ^{14}C and ^{10}Be are often used for reconstruction of solar activity in the past. But sometimes the different reconstruction result in various results. The possible reasons of distinctions of the results of the various reconstructions of solar activity on the basis of cosmogenic isotopes in the past are considered. Influence of climatic changes on the initial data can be origin of these distinctions.

DOI: 10.31725/0552-5829-2020-177-180

1. Введение

К настоящему времени имеется большое количество реконструкций скорости генерации космогенных изотопов ^{14}C и ^{10}Be в атмосфере Земли и солнечной активности (СА) в прошлом (например, [1–7]) на основе этих изотопов. Данные изотопы образуются под действием частиц галактических космических лучей (ГКЛ) и солнечных космических лучей (СКЛ) в атмосфере Земли. Образовавшийся в атмосфере Земли изотоп ^{14}C в составе углекислого газа участвует в углеродном обмене между природными резервуарами, усваиваются деревьями и накапливаются в годовых кольцах деревьев, образцы которых используются при лабораторном анализе. Изотоп ^{10}Be , в отличие от изотопа ^{14}C , не участвует в обмене между природными резервуарами, а осаждается из атмосферы и накапливается в ледниках, например, Антарктиды и Гренландии.

2. Реконструкции на основе радиоуглеродных данных

В ходе лабораторных измерений определяют отклонения от стандарта отношения содержания изотопа ^{14}C в годовых кольцах к содержанию стабильного изотопа ^{12}C и, после этого, в атмосфере Земли ($\Delta^{14}\text{C}$). С другой стороны, для расчета скорости образования изотопа ^{14}C необходимо знать абсолютное содержание этого изотопа ^{14}C в атмосфере, которое может быть определено на основе $\Delta^{14}\text{C}$ и содержания углекислого газа в ат-

мосфере Земли. Следовательно, что для более точного определения абсолютного содержания ^{14}C в прошлом, находящегося в составе атмосферного CO_2 , необходимо использовать наиболее точные данные по содержанию CO_2 в атмосфере. Так в работе [1] используется приведенная в работе [8] реконструкция содержания CO_2 (рисунок 1, кривая 1). Авторы работы [1] пришли к выводу, что во время минимумов СА Шперера и Маундера скорость генерации изотопа ^{14}C была существенно выше, чем во время минимума Дальтона. В работах [5, 6, 9] при вычислениях использовалась реконструкция [10] (рисунок 1, кривая 2). Как видно из рисунка эта реконструкция более детальна. При этом относительное уменьшение концентрации CO_2 сравнимо и изменением $\Delta^{14}\text{C}$.

Рис. 1. Температурные реконструкции [8] (кривая 1) и [10] (кривая 2).

Следующим фактором, влияющим на точность реконструкции, является учет климатических изменений на обмен углеродом между природными резервуарами, что было отмечено в работе [11]. В работе [9] было показано, что во время Малого Ледникового Периода (МЛП) необходимо учитывать изменение скорости перехода радиоуглерода из верхнего слоя океана в атмосферу в результате изменения глобальной температуры. При этом резкое уменьшение содержания CO_2 в атмосфере в 16 и в начале 17 века [12] может быть результатом поглощения углекислого газа океаном из атмосферы при уменьшении глобальной температуры во время МЛП (рисунок 1). В результате учета этих двух факторов было показано [5, 6], что скорости генерации изотопа и числа Вольфа во время минимума Маундера и Дальтона могла быть сравнимы. В пользу этого говорит и тот факт, что во время минимума Дальтона числа Вольфа опускались до минимально возможного значения, до нуля. Ситуация с минимумом Шпёрера более сложная из-за различия в используемых температурных реконструкциях, хотя надо учитывать что (как отмечено выше) числа Вольфа опускались во время минимума Дальтона до минимально возможного значения.

3. Реконструкции на основе содержания изотопа ^{10}Be в ледниках Антарктиды и Гренландии

Данные по содержанию изотопа ^{10}Be в слоях льда Антарктических и Гренландских ледников также используются для реконструкции СА. В работе [2] приводится ряд таких реконструкций, и показана противоречивость результатов при использовании данных из Антарктиды и Гренландии. В настоящее время нет однозначного ответа на причину этих различий. Причины могут быть как в различии используемых данных, так и во влиянии климата. Для реконструкции СА необходимо использовать скорость генерации этого изотопа в Земной атмосфере, которая связана со скоростью осаждения сложной зависимостью и эта зависимость различается для различных скважин даже в Гренландии [7]. Кроме этого, не у всех данных присутствует скорость осаждения ^{10}Be , в ряде случаев измерено только концентрация изотопа ^{10}Be в слоях льда. Однако концентрация и скорость осаждения ^{10}Be связаны друг с другом с помощью скорости роста ледника, которая, как известно, зависит от вариаций климата. На рисунке 2А приведено отношение потока изотопа ^{10}Be на поверхность ледника [13](Dome Fuji, Антарктида) к концентрации (атомов на грамм льда). Как видно из данного рисунка скорость роста ледника менялась до двух раз. Изменчивость скорости роста ледника наблюдается и для скважины NGRIP, Гренландия [14].

Рис. 2. Скорость роста ледника в Антарктиде (Dome Fuji) [13] (А) и реконструкции гелиосферного модуляционного потенциала ϕ .

В работах [15] показано, что при использовании данных [14] реконструкция гелиосферного модуляционного потенциала ϕ может давать сравнимые значения для минимумов Шперера, Маундера и Дальтона. Рассмотрим, в каком случае подобный результат может быть получен и при использовании данных [13]. На рисунке 2Б приведены участки реконструкций ϕ для различных отношений скорости образования изотопа ^{10}Be (атом/(см² с)) в атмосфере к концентрации этого изотопа в слоях льда (атом/гр), рассчитанного аналогично [15, 16]. Для участков 1, 2 и 3 эти отношения равны соответственно $2.3 \cdot 10^{-7}$, $2.6 \cdot 10^{-7}$ и $3 \cdot 10^{-7}$. В этом случае значения ϕ во время минимумов Шперера, Маундера и Дальтона практически равны. Поэтому для надежной реконструкции скорости образования

изотопа ^{10}Be необходимо иметь хорошо установленную связь концентрации (скорости осаднения) изотопа ^{10}Be со скоростью их образования в атмосфере в прошлые столетия и тысячелетия для каждой скважины.

Еще одной возможной причиной различий результатов реконструкций скорости образования ^{10}Be в атмосфере Земли может быть временное разрешение данных. Для сравнения глобальных минимумов СА с минимумов Дальтона надо учитывать, что длительность этого минимума была мала – числа Вольфа падали до нуля только в течение одного года. Минимумы Шпёрера и Маундера более длительные, поэтому использование усредненных данных будет искажать результат реконструкции. Тогда становится понятным, почему различаются реконструкции на основе Гренландских и Антарктических данных. В настоящее время только данные NGRIP представляют годовичные значения концентрации изотопа ^{10}Be в слоях льда и скорость его осаднения. В [15, 16] приводятся реконструкции ГМП с использованием скорости осаднения изотопа ^{10}Be для скважины NGRIP [14] и показано, что скорость генерации этого изотопа опускается до нулевых значений во время минимумов Шпёрера, Маундера и Дальтона. Подобный результат был получен в [2] при использовании данных о концентрации ^{10}Be в слоях в образцах NGRIP. При этом надо отметить, что значения ГМП не могут опускаться ниже нуля согласно определению данной функции.

Работа частично поддержана грантами РФФИ 18-02-00583 и 19-00088.

Литература

1. Roth R. and Joos F. // *Clim. Past*, 2013, V. 9, P. 1879.
2. Muscheler R. et al. // *Solar Physics*, 2016, V. 291, P.3025.
3. Usoskin I.G. et al. // *Astronomy & Astrophysics*, 2014, V.562, L10. 4 pp.
4. Usoskin I.G. et al. // *Astronomy & Astrophysics*, 2015, V.581, A95.
5. Kuleshova A.I. et al. // *Geomagnetism and Aeronomy*, 2015, V.55. P.1071.
6. Kudryavtsev I.V. et al. // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2016. V.56. P. 998.
7. Ogurtsov M.G. // *Astronomy Letters*. V.44. P.278-288. 2018.
8. Monnin E. et al. // *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, V. 224, P. 45.
9. Kudryavtsev I.V. et al. // *Geochronometria*, 2014, V. 41, No. 3, P. 216.
10. Etheridge D.M. et al., 1998, <http://cdiac.ornl.gov/ftp/trends/co2/lawdome.smoothed.yr75>.
11. Дергачев В.А., Остряков В.М. // Труды 6 всесоюзного совещания по проблеме "Астрофизические явления и радиоуглерод". Тбилиси 13–15 октября 1976 г., Тбилиси. С. 177-182. 1978.
12. SILSO, World Data Center-Sunspot Number and Long-term Solar Observations, Royal Observatory of Belgium, <http://www.sidc.be/SILSO>
13. Horiuchi K et al. // *Quaternary Geochronology*, 2008, V.3, P. 253.
14. Berggren A.-M. et al. // *Geophys. Res. Lett.*, 36, L11801.
15. Кудрявцев И.В. // Сборник трудов ежегодной конференции "Солнечная и солнечно-земная физика – 2019", С. 245.
16. Kudryavtsev I.V. // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2020. V.60, в печати.