



УДК 551.583.7:539.1:550.3

С. Г. Бойченко

Индикаторная связь долгопериодных колебаний бериллия-10 и приземной температуры в последнем тысячелетии

(Представлено академиком НАН Украины В. И. Старостенко)

Установлены квазипериодические колебания в вековом ходе ^{10}Be , которые можно считать геофизическим индикатором квазипериодических колебаний приземной температуры. Полученный результат важен и потому, что он вполне обоснованно позволяет закладывать в сценарии изменений температуры в 21 ст. колебания с периодом около 60 лет, которые явно носят природный характер и могут приводить в определенные периоды к еще большему усилению или, наоборот, некоторому нивелированию эффекта глобального потепления.

Космогенные радиоизотопы типа ^{10}Be (период полураспада $\tau \sim 1,5 \cdot 10^6$ лет), ^{14}C ($\tau \sim 5,7 \cdot 10^3$ лет), ^{26}Al ($\tau \sim 7,6 \cdot 10^5$ лет), ^{36}Cl ($\tau \sim 3,1 \cdot 10^5$ лет) владеют потенциальной информацией об интенсивности потоков космического излучения, о солнечных и геомагнитных модуляциях в прошлом.

Основная доля ^{10}Be имеет космогенное земное (атмосферное) происхождение. Образование его происходит непосредственно в атмосфере, главным образом, при взаимодействии высокоэнергетических галактических лучей и, в меньшей мере, солнечных лучей с ядрами азота и кислорода при прохождении ядерной реакции “скалывания”, т. е. реакции, при которой от ядра-мишени отрывается несколько нуклонов. Скорость образования ^{10}Be в атмосфере составляет $\sim 8,5 \cdot 10^{-2}$ ат/(см² · с) [1]. Имея значительный период полураспада ($\sim 1,51 \cdot 10^6$ лет), ^{10}Be депонируется в различных природных архивах: в атмосферных осадках (снеге, льде), почве, в ледовых покровах, в донных морских и континентальных отложениях, а также в костных системах организмов.

Среди других источников ^{10}Be , правда незначительных, следует назвать космогенные радионуклиды, захваченные из ближнего космоса, образованные при облучении межпланетного вещества (межпланетная пыль, метеоры, кометы) потоками космических лучей,

© С. Г. Бойченко, 2013

а также радионуклиды *литосферного происхождения*, которые из-за ветровой эрозии пород диссипируют в атмосферу (со средней скоростью около $4 \cdot 10^{-4}$ ат/(см² · с) [2]).

Сток ¹⁰Ве из атмосферы происходит в основном в процессе влажного и, в меньшей мере, сухого осаждения путем сорбции атмосферными аэрозолями. Скорость осаждения различна в зависимости от физико-химических процессов, проходящих в атмосфере, синоптической ситуации и от высоты слоя атмосферы, из которого происходит осаждение: в **верхней стратосфере** (30–20 км) — преобладает гравитационное осаждение аэрозолей; в **нижней стратосфере — тропопаузе — верхней тропосфере** (20–10 км) — частицы переносятся атмосферной конвекцией (движениями воздушных масс); в **средней и нижней тропосфере** (ниже 10 км) происходит осаждение аэрозолей и осевших на них нуклидов путем вымывания атмосферными осадками [2]. Аэрозоли в этом случае либо служат непосредственно ядрами конденсации, либо захватываются каплями в процессе седиментации. Максимальное и наиболее динамичное вымывание частиц происходит в области облаков на высоте 4–5 км.

Среднее время пребывания ¹⁰Ве в атмосфере различно: так, в стратосфере оно составляет около года, а в тропосфере — около месяца. Максимальные концентрации ¹⁰Ве ((1–250) · 10⁴ ат/м³) в атмосфере приходятся на высоты 8–12 км на широтах 50–60°, что связывают с максимумом образования и влажным осаждением на ячейке Фереля, а также с горизонтальным переносом в направлении низких широт [2, 3].

В современной науке физико-химические свойства ¹⁰Ве используют для решения следующих задач [1, 2, 4]: абсолютного датирования образцов, уточнения вариаций ¹⁴С, восстановления ритмов солнечной активности и определения солнечного форсинга, а также как геохимический трассер для доказательства захвата океанических осадков в процессе субдукции и как хронометр вулканических извержений.

Особенности колебаний содержания ¹⁰Ве в последнем тысячелетии. Вековой ход вариации ¹⁰Ве в атмосфере для последних 1–2 тыс. лет был восстановлен несколькими известными научными группами на основании замеров во льдах Центральной Антарктиды на станциях Dome Fuji (DF2001) и PS1 и уточнен замерами на станциях Гренландии (Dye-3 и GISP-2). В данном исследовании были использованы следующие эмпирические ряды:

ряд ¹⁰Ве₁ восстановлен за период 843–1982 гг. [3];

ряд ¹⁰Ве₂ восстановлен за период 695–1882 гг. [5].

Для анализа использовались аномалии содержания ¹⁰Ве для периода 1000–1850 гг., которые были стандартизированы: центрированы на линейный тренд и нормированы на общую дисперсию за рассмотренный период. Как видно из рис. 1, для обоих эмпирических рядов характерна практически линейная тенденция увеличения содержания ¹⁰Ве за период 1000–1850 гг. — с трендом 0,75 и 0,14 за 1000 лет (соответственно для рядов ¹⁰Ве₁ и ¹⁰Ве₂, нормированных на их общую дисперсию), а для солнечного форсинга характерна обратная тенденция ($-1,3 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}/10^3 \text{ лет}$). В соответствии с результатами спектрального анализа стандартизированных (минус линейный тренд) рядов максимальные значения амплитуды колебаний содержания ¹⁰Ве в атмосфере последнего тысячелетия приходятся на периоды (60 ± 10), (100 ± 10), (175 ± 25) лет (рис. 2). Квазипериодические колебания с периодами около 50–70 лет имеют, возможно, одну физическую природу, но в восстановленных рядах, видимо, произошло расщепление волны с периодом около 60 лет.

Особенности вековых колебаний приземной температуры в последнем тысячелетии. Восстановление векового хода приземной температуры для последнего тысячелетия проводят с помощью современных физико-химических методов, основанных на анализе

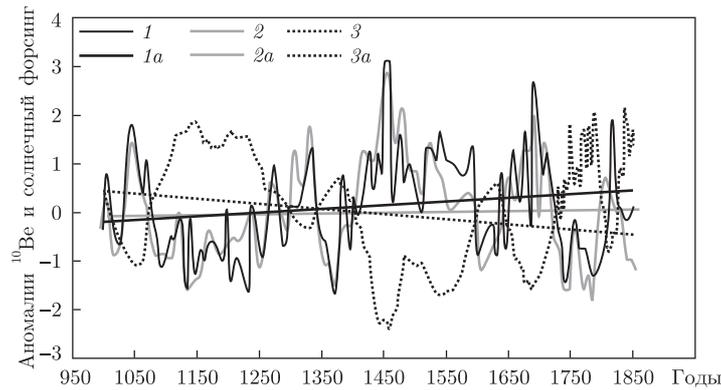


Рис. 1. Вековой ход нормированных аномалий ^{10}Be (1 — ряд $^{10}\text{Be}_1$, 2 — ряд $^{10}\text{Be}_2$, 1a и 2a — линейный тренд для этих рядов соответственно) и солнечного форсинга (3 — значения в у. е. и 3a — линейный тренд) в Северном полушарии за период 1000–1850 гг.

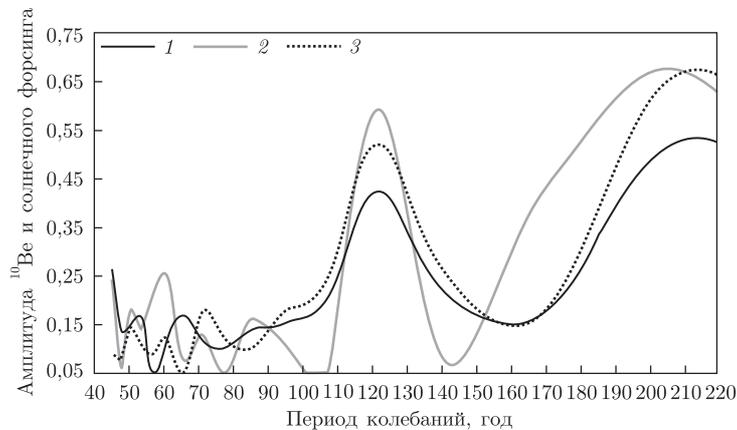


Рис. 2. Спектр Фурье аномалий ^{10}Be (1 — ряд $^{10}\text{Be}_1$, 2 — ряд $^{10}\text{Be}_2$) и солнечного форсинга (3) в Северном полушарии в последнем тысячелетии

изотопных соотношений водорода (H/D) и кислорода ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) в морских и континентальных отложениях, а также во льдах Антарктиды и Гренландии. Температурные реконструкции также калибруют и компилируют с помощью палеоданных, исторических рукописей и частично данных инструментальных наблюдений.

В данном исследовании использованы восстановленные несколькими известными научными группами ряды приземной температуры Северного полушария за период 1000–1850 гг., а именно:

ряд T_1 — аномалии температуры, базирующиеся на пятнадцати палеорядах разных регионов Северного полушария с разрешением от года до нескольких десятилетий [6]. Реконструкции калибровались путем сопоставления с температурами для периода 1961–1990 гг.;

ряд T_2 — аномалии температуры, полученные по двенадцати региональным палеорядам с годовым разрешением [7]. Данные калибровались по инструментальным данным за период 1902–1980 гг.

В связи с тем что аномалии температуры отсчитывались авторами этих рядов от различных периодов, данные ряды были стандартизированы, а для спектрального анализа ряды были еще и центрированы на линейный тренд.

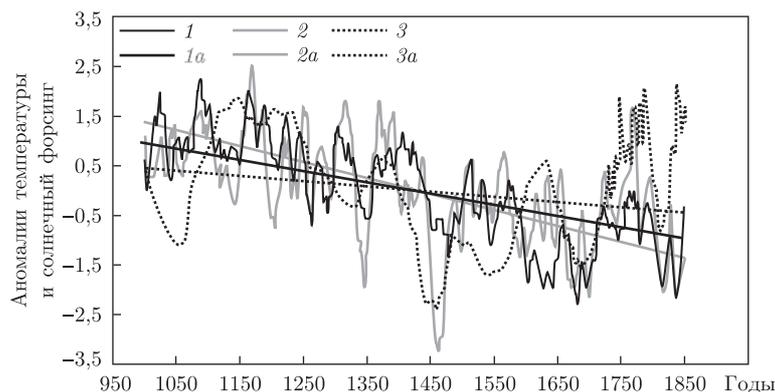


Рис. 3. Вековой ход нормированных аномалий приземной температуры (1 – ряд T_1 , 2 – ряд T_2 , 1a и 2a – линейный тренд для этих рядов соответственно) и солнечного форсинга (3 – значения в у.е. и 3a – линейный тренд) в Северном полушарии за период 1000–1850 .

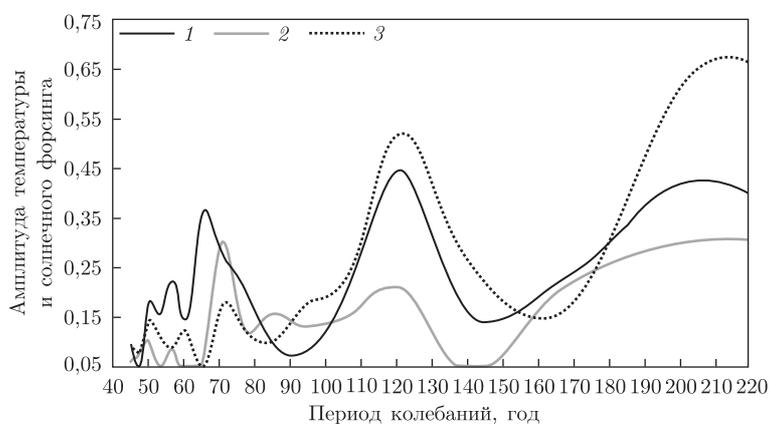


Рис. 4. Спектр Фурье аномалий приземной температуры (1 – ряд T_1 , 2 – ряд T_2) и солнечного форсинга (3) в Северном полушарии в последнем тысячелетии

На основе анализа модифицированных рядов векового хода приземной температуры за период 1000–1850 гг. получены оценки, близкие к оценкам, полученным ранее [8]. Таким образом, для климата последнего тысячелетия характерны:

крупномасштабное снижение глобальной температуры с темпом $\sim -0,2-0,3$ °C/1000 лет, связанное вероятнее всего с уменьшением эксцентриситета земной орбиты [8, 9]) (рис. 3);

долгопериодные квазипериодические колебания температуры с периодом около $(175 \pm \pm 25)$ лет, развивающиеся на фоне крупномасштабного снижения температуры: потепление в раннем средневековье (*малый климатический оптимум*) и похолодание в позднем средневековье (*малый ледниковый период*), а также квазипериодические колебания температуры с периодами около 50–70 лет, которые практически соответствуют и современным колебаниям температуры с периодом около 60 лет [8] (рис. 4).

Следует отметить, что при анализе векового хода глобальной приземной температуры, полученной путем прямых инструментальных наблюдений за период 1856–2010 гг. (представленных в публикации [10]), установлена практически линейная тенденция к потеплению с темпом $0,5-0,7$ °C/100 лет, на фоне которого проявились квазипериодические колебания с периодом около 60 лет [8, 11–13]. Однако амплитуда колебаний температуры для современ-

ного периода примерно на порядок выше амплитуды колебаний температуры для периода 1000–1850 гг., что связано, скорее всего, со сглаживанием палеоданных при обработке. Также возможно с этим связано и “расщепление” периода колебаний температуры ~60 лет на два ~50 и ~70 лет, которые имеют, видимо, одну физическую природу.

О физической природе колебаний климата в последнем тысячелетии. Колебания температурного режима планеты в последнем тысячелетии связывают с долгопериодными ритмами солнечной активности [1–4, 6–8, 13–15]. Установлено, что относительно теплый период раннего средневековья (*малый климатический оптимум*) совпадает со средневековым максимумом солнечной активности, а похолодание в позднем средневековье (*малый ледниковый период*) согласуется с минимумами солнечной активности (минимум Шпюрера и минимум Маундера) (см. рис. 1–4). Долгопериодные ритмы солнечной активности восстанавливают с помощью ^{14}C и ^{10}Be и уточняют с помощью данных визуальных наблюдений за солнечными пятнами и интенсивностью проявления полярных сияний, приведенных в исторических манускриптах [1, 4, 13–15].

Известно, что вариации ^{14}C и ^{10}Be в атмосфере имеют обратную связь с возмущениями магнитного поля Солнечной системы (эффект де Врие) [1]. В максимуме солнечной активности магнитное поле Солнца защищает Землю от проникновения высокоэнергетических космических протонов, что приводит к уменьшению образования радионуклидов в атмосфере и, наоборот, в минимуме солнечной активности магнитное поле ослабевает и больше пропускает галактических протонов в атмосферу, где и образуются радионуклиды. Доминирующий вклад в образование радиоизотопов типа ^{10}Be , ^{14}C и др. вносят именно космические протоны галактического происхождения, а солнечные протоны дают всего лишь 1–2% их общего содержания [1, 2].

В современной климатологии введено понятие солнечного форсинга как компонента радиационного форсинга (радиационное воздействие рассчитывается для условий восстановления стратосферных температур до радиационного баланса, но при фиксированных значениях всех тропосферных параметров) [10].

Солнечный форсинг определяется с учетом вариаций радиоизотопов ^{14}C и ^{10}Be , солнечных и геомагнитных модуляций [4, 14, 15]. Вековой ход солнечного форсинга в последнем тысячелетии рассчитан в [15].

Как видно из рис. 1, вариации ^{10}Be обратно пропорциональны значениям солнечного форсинга, вариации которого достаточно хорошо согласуются с колебаниями температуры в Северном полушарии для периода 1000–1850 гг. Результаты спектрального анализа, представленные на рис. 2, также указывают на совпадение периодов колебаний около (60 ± 10) , (100 ± 10) , (175 ± 25) лет как для ^{10}Be , так и для приземной температуры и солнечного форсинга.

Все это указывает на то, что долгопериодные ритмы солнечной активности действительно могут быть причиной определенных изменений климата. Основной контраргумент этого предположения — незначительное изменение энергии солнечного электромагнитного излучения, связанного с солнечными ритмами [1, 13]. Поэтому речь может идти не о прямом влиянии солнечной активности на климат (причинно-следственная связь), а об индикаторной связи: синхронное влияние неизвестного космического X-фактора или процесса как на процессы на Солнце, так и на процессы на ее планетах.

Эмпирическое распределение аномалий ^{10}Be и приземной температуры Северного полушария в последнем тысячелетии. Для подтверждения корреляционных связей в вековых колебаниях ^{10}Be , температуры и солнечного форсинга был проведен ана-

лиз их эмпирических распределений. Как показал анализ, эмпирическое распределение вариаций ^{10}Be , температуры и солнечного форсинга близко к нормальному, правда, с небольшой асимметрией для ^{10}Be в правой части, а для температуры — в левой части распределения. Значения коэффициента асимметрии (A) и эксцесса (E) для ^{10}Be : $A = -0,15$ и $-0,61$; $E = -0,75$ и $1,41$, для температуры: $A = 0,42$ и $0,41$; $E = 0,30$ и $-0,26$ (соответственно для каждого из рядов), а для солнечного форсинга: $A = -0,57$; $E = -0,38$.

Анализ эмпирических распределений аномалий ^{10}Be , солнечного форсинга и приземной температуры за период 1000–1850 гг. показал существование довольно тесной их корреляционной связи (коэффициент корреляции около 79–88%).

Таким образом, анализ векового хода аномалий ^{10}Be , приземной температуры и солнечного форсинга для последнего тысячелетия указывает на существование:

прямой корреляционной связи температуры и солнечного форсинга, а именно: установлена общая тенденция снижения температуры и солнечного форсинга на фоне колебаний с периодами около (60 ± 10) , (100 ± 10) и (175 ± 25) лет;

обратной корреляционной связи долгопериодных вариаций ^{10}Be , солнечного форсинга и приземной температуры.

Особый интерес представляют выявленные когерентные колебания с периодом приблизительно около 60 лет. Заметим, что и в вековом ходе современной температуры близкий период колебаний очень резко проявился. Согласно одной из гипотез, которая кажется наиболее вероятной, доминирующим фактором, формирующим колебания с периодом ~ 60 лет, является астрономический фактор — квазипериодические пространственные вариации центра инерции Солнечной системы (эффект Лапласа) [1, 13]. Главный цикл пространственного смещения центра Солнечной системы (повторение конфигурации стояния Солнца, Юпитера и Сатурна) имеет также период около 60 лет. Современные астрономические исследования показали, что Солнце, описывая незамкнутый трилистник вокруг центра инерции, имеет довольно сложные как квазипериодические движения с периодом около 175–200 лет, так и кажущиеся хаотичными движения, а, скорее всего, квазипериодические колебания с меньшими периодами [1]. Этот процесс в Солнечной системе может приводить к солнечным и геомагнитным модуляциям, колебаниям потока электромагнитного солнечного излучения, возмущению гравитационных полей и формированию ритмов тектонической и вулканической деятельности на планетах Солнечной системы и в том числе на Земле.

Выявленные квазипериодические колебания в вековом ходе ^{10}Be можно считать геофизическим индикатором квазипериодических колебаний приземной температуры с периодом ~ 60 лет, которые свойственны как для тысячелетнего периода, так и современного. Полученный результат важен еще и потому, что это вполне обоснованно позволяет закладывать в сценарии изменений температуры в 21 ст. колебания с периодом около 60 лет, которые явно носят природный характер и могут приводить в определенные периоды к еще большему усилению или, наоборот, некоторому нивелированию эффекта глобального потепления [8, 11].

1. Поток энергии Солнца и его изменения // Под ред. О. Уайта. — Москва: Мир, 1980. — 558 с.
2. Блинов А. В. Долгоживущие космогенные радионуклиды, индикаторы физических процессов в окружающей среде // Науч.-техн. ведомости СПбГПУ. — 2003. — № 4. — С. 108–138.
3. Bard E. G., Raisbeck F. Y., Jouzel J. Solar modulation of cosmogenic nuclide production over the last millennium: comparison between ^{14}C and ^{10}Be records // Earth and Planet. Sci. Lett. — 1997. — **150**. — P. 453–462.
4. Schmidt G., Jungclaus J., Ammann C. et al. Climate forcing reconstructions for use in PMIP simulations of the Last Millennium (v1.1) // Geoscientific Model Development. — 2012. — **5**. — P. 185–191.

5. *Delaygue G., Bard E.* An antarctic view of Beryllium – 10 and solar activity for the past millennium // *Clim. Dynam.* – 2011. – **36**. – P. 2201–2218.
6. *Crowley T. J.* Causes of climate change over the past 1000 years // *Science.* – 2000. – **289**. – P. 270–277.
7. *Mann M. E., Bradley R. S., Hughes M. K.* Northern hemisphere temperatures during the past millennium: Inferences, uncertainties and limitations // *Geophys. Res. Lett.* – 1999. – **26**. – P. 759–762.
8. *Бойченко С. Г.* Напівемпіричні моделі та сценарії глобальних і регіональних коливань змін клімату. – Київ: Наук. думка, 2008. – 310 с.
9. *Волощук В. М., Бойченко С. Г.* Особенности реакции климатических условий Земли на “орбитальный сигнал” // *Доп. НАН України.* – 2005. – № 10. – С. 121–125.
10. *Climate change 2007. – The scientific basis – Contribution of working Group I to the IPCC fourth assessment report, UNEP/WMO, 2007. – 250 p. – http://www.ipcc.ch/SPM2feb07.pdf.*
11. *Бойченко С. Г., Волощук В. М.* Основные закономерности современной динамики глобального температурного режима тропосферы // *Доп. НАН України.* – 2006. – № 5. – С. 104–110.
12. *Дацик Н. М., Монин А. С., Берестов А. А. и др.* О колебаниях глобального климата за последние 150 лет // *Докл. РАН.* – 2004. – **339**, № 2. – С. 253–256.
13. *Монин А. С., Сонечкин Д. М.* Колебания климата по данным наблюдений. Тройной солнечный и другие циклы. – Санкт-Петербург: Наука, 2005. – 194 с.
14. *Beer J.* Long-term indirect indices of solar variability // *Space Sci. Rev.* – 2000. – No 94. – P. 53–66.
15. *Mann M., Cane M., Zebiak S., Clement A.* Volcanic and solar forcing of the tropical pacific over the past 1000 years // *J. Climate.* – 2005. – **18**. – P. 447–456.

*Институт геофизики им. С. И. Субботина
НАН Украины, Киев*

Поступило в редакцию 01.11.2012

С. Г. Бойченко

Індикаторний зв'язок довгоперіодних коливань берилію-10 і приземної температури в останньому тисячолітті

Установлено квазіперіодичні коливання у віковому ході ^{10}Be , які можна вважати геофізичним індикатором квазіперіодичних коливань приземної температури. Отриманий результат важливий і тому, що він цілком обґрунтовано дозволяє закладати в сценарії змін температури в 21 ст. коливання з періодом близько 60 років, які явно носять природний характер і можуть призвести в певні періоди до ще більшого посилення або, навпаки, деякого нівелювання ефекту глобального потепління.

S. G. Boychenko

Indicator connection of long-time fluctuations of beryllium-10 and the ground temperature in the last millennium

The quasiperiodic fluctuations in a century course of ^{10}Be are established which can be counted as the geophysical indicator of quasiperiodic fluctuations of the ground temperature. The obtained result is important, since it allows one to set, in the scenarios of changes of temperature in the 21 century, fluctuations with the period about 60 years which obviously have natural character and can result in the certain periods in the even greater amplification or, on the contrary, in some leveling of the effect of global warming.