

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПРИЧИН ГЛОБАЛЬНОГО И РЕГИОНАЛЬНОГО КЛИМАТИЧЕСКИХ ОТКЛИКОВ НА ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

¹О.М. Распопов, ²В.А. Дергачев, ³О.В. Козырева, ⁴Т. Колстром, ^{4,5}Е.В. Лопатин, ⁶Б. Лукман

INTERPRETATION OF PHYSICAL FACTORS RESPONSIBLE FOR GLOBAL AND REGIONAL CLIMATIC RESPONSES TO LONG-TERM SOLAR ACTIVITY VARIATIONS

¹O.M. Raspopov, ²V.A. Dergachev, ³O.V. Kozyreva, ⁴T. Kolström, ^{4,5}E.V. Lopatin, ⁶B. Luckman

Проанализировано воздействие ~200-летних солнечных периодичностей (deVries cycle) на климатические параметры для различных регионов земного шара. Экспериментально подтвержден нелинейный характер отклика системы атмосфера–океан на солнечное воздействие. На земной поверхности имеются регионы, где такой отклик имеет четкий характер как положительного, так и отрицательного знака, и пограничные регионы, где он может отсутствовать или иметь неустойчивый характер. Местоположение пограничных районов может изменяться как во времени, так и в пространстве, отражая глобальную перестройку климатических процессов.

The influence of ~200-year solar periodicities (deVries cycle) on climatic parameters has been analyzed for different regions of the Earth. A nonlinear character of the response of the atmosphere–ocean system to solar activity has been experimentally verified. Regions characterized by pronounced positive and negative responses have been found to exist at the Earth's surface. There are also boundary regions with no response or having an unstable character. The locations of boundary regions can vary both in time and space, reflecting the global rearrangement of climatic processes.

Постановка задачи

Проблема глобального потепления, зафиксированного в последние десятилетия, привлекает в настоящее время внимание как научной, так и широкой аудитории. Это связано, с одной стороны, с большим социальным воздействием последствий потепления и, с другой стороны, с необходимостью понять механизмы, формирующие глобальные изменения. Наиболее распространенным толкованием физических причин глобального потепления является антропогенное возрастание парниковых газов (CO₂, метан и т. д.) в атмосфере. Однако полученная в последнее время информация об эффективности солнечного воздействия на климатические параметры обусловила скептицизм по отношению к столь однозначному толкованию механизма глобального потепления и подтвердила предположения, что глобальное потепление связано и с естественными причинами, в том числе с воздействием солнечной активности.

Предметом настоящей работы является изучение климатического отклика на ~200-летнюю цикличность солнечной активности (deVries cycle) [1] в последнем тысячелетии. Выбор квазидвухсотлетней солнечной цикличности связан, во-первых, с тем, что возрастанию температуры в прошлом столетии сопутствовала возрастающая ветвь 200-летнего солнечного цикла [2] и, во-вторых, анализ внутренних периодичностей климатической системы атмосфера–океан свидетельствует, что их периоды не превышают 60–70 лет [3]. Это означает, что ~200-летние климатические периодичности, скорее всего, должны быть связаны с внешним воздействием на систему атмосфера–океан.

Данные и методика

Палеоклиматические данные

В настоящей работе были использованы палеоклиматические данные за последнее тысячелетие из шести районов земного шара (рис. 1). Выбор районов определялся различием их климатических условий, что, как можно было ожидать, могло при-

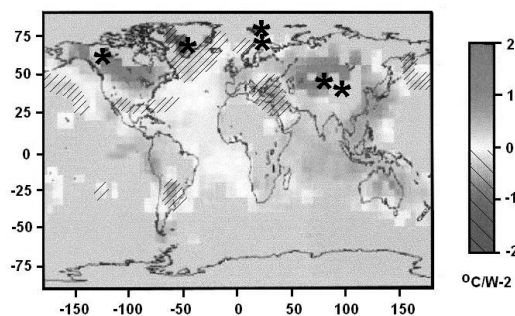


Рис. 1. Карта, на которую нанесены результаты моделирования отклика приземных температур на воздействие долговременных вариаций солнечной иррадиации [11]. На карте звездочками указано местоположение районов, из которых взяты палеоклиматические данные.

вести к различиям в климатическом отклике на долговременное солнечное воздействие. Для анализа были отобраны следующие данные:

1. Реконструкция вариаций летних температур для двух районов Тянь-Шаня [4].
2. Реконструкция вариаций осадков на Тибетском плато [5].
3. Реконструкция вариаций летних температур в западной Канаде в районе Скалистых гор [6].
4. Реконструкция вариаций летних температур в Северной Скандинавии (Финская Лапландия) [7]. Вышеназванные реконструкции проводились по вариациям ширины колец деревьев и имеют, следовательно, годичное разрешение.
5. Вариации атмосферной циркуляции в Гренландии, реконструированные по содержанию континентальных и океанических аэрозолей в кернах льда [8]. Временное разрешение этих данных ~2.4 года.
6. Вариации среднегодовых температур на Шпицбергене, реконструированные по содержанию изотопа ¹⁸O в кернах льда. Эти данные имеют практически ежегодное разрешение [9].

Палеоклиматические данные из районов Тянь-Шаня, Тибета, Западной Канады и Северной Скандинавии были подвергнуты вейвлет-трансформации

(базис Морле) в диапазоне периодов 100–300 лет. Результаты этой трансформации представлены на рис. 2. На этом же рисунке приведены результаты спектрально-временного анализа вариаций содержания континентальных и океанических аэрозолей в керне гренландского льда в диапазоне периодов 100–300 лет и результаты вейвлет-анализа (базис МНАТ) реконструкции ежегодных температур на основе анализа вариаций содержания ^{18}O в двух ледниках на Шпицбергене.

Данные о солнечной активности

Для тысячелетнего временного интервала, который анализируется в настоящей работе, отсутствуют прямые наблюдения солнечной активности. Поэтому выявление ~200-летней солнечной активности (deVries cycle) в этом временном интервале было сделано на основе анализа вариаций содержания космогенного изотопа ^{14}C . Генерация ^{14}C происходит в атмосфере под воздействием высокоэнергичных космических лучей. В свою очередь, интенсивность потока космических лучей в земной атмосфере зависит от степени турбулизации солнечного ветра и, следовательно, от солнечной активности. В настоящей работе были использованы данные по концентрации ^{14}C в датированных кольцах деревьев ($\Delta^{14}\text{C}$), представленные в [10]. Эти данные имеют временное разрешение от года до 10 лет. Так же как палеоклиматические данные, они были подвергнуты вейвлет-трансформации (базис Морле) в диапазоне периодов 100–300 лет. Результаты вейвлет-трансформации $\Delta^{14}\text{C}$ представлены на рис. 2, а с целью их сопоставления с результатами анализа палеоклиматических данных.

Обсуждение результатов

Представленные на рис. 2 результаты вейвлет- и спектрально-временного (греландские данные) ана-

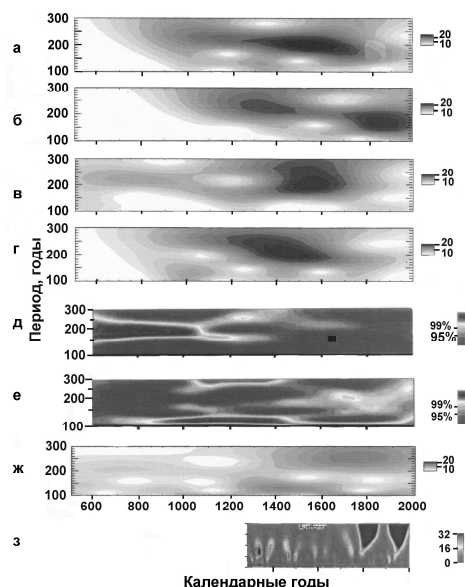


Рис. 2. Результаты вейвлет-анализа (базис Морле) в диапазоне периодов 100–300 лет изменений $\Delta^{14}\text{C}$ (а), вариаций летних температур на Тянь-Шане (б), вариаций осадков в Тибете (в), летних температур в Западной Канаде (г) и летних температур в Северной Скандинавии (ж). Результаты спектрально-временного анализа содержания континентальных (д) и морских аэрозолей (е) во льду Гренландии. Результаты вейвлет-анализа (базис МНАТ) вариаций годовых температур на Шпицбергене (з). Амплитуда сигнала в спектрограммах приведена в относительных единицах.

лиза вариаций солнечной активности и палеоклиматических данных ($\Delta^{14}\text{C}$) свидетельствуют о четком развитии квазидвухлетних периодичностей как в солнечном, так климатических сигналах. В результате вейвлет-анализа данных (рис. 2) прослеживается уменьшение периода колебаний как у солнечных вариаций (рис. 2, а), так и у вариаций летних температур на Тянь-Шане (рис. 2, б) и в Западной Канаде (рис. 2, г), что указывает на их взаимосвязь. Динамический спектр вариаций осадков на Тибетском плато также демонстрирует наличие ~200-летних вариаций (рис. 2, в).

С целью количественной оценки степени идентичности развития ~200-летних климатических колебаний с колебаниями солнечной активности была проведена фильтрация исходных данных для Тянь-Шаня, Тибета, Западной Канады и данных по концентрации $\Delta^{14}\text{C}$ в диапазоне периодов 180–230 лет и вычислены коэффициенты корреляции R между солнечными и палеоклиматическими кривыми. Значения коэффициентов R оказались следующими: $\Delta^{14}\text{C}$ – тянь-шаньская хронология – 0.94; $\Delta^{14}\text{C}$ – тибетская хронология – 0.73; $\Delta^{14}\text{C}$ – хронология для Западной Канады – 0.95. Таким образом, анализ, проведенный для двух регионов Центральной Азии и Западной Канады, показал, что имеет место отчетливый климатический отклик на ~200-летние вариации солнечной активности.

Рассмотрим теперь эту проблему для Гренландии и двух регионов Северной Атлантики (Северная Скандинавия и Шпицберген). На рис. 2 д, е приведены результаты спектрально-временного анализа концентрации континентальных и морских аэрозолей во льду Гренландии, дающие информацию о долговременных вариациях атмосферной циркуляции над Гренландией. На рисунках видно, что 200-летние климатические вариации присутствуют в течение всего рассматриваемого временного интервала. Правда, около 1400–1600-х гг. произошло изменение характера атмосферной циркуляции: около 400 лет тому назад вынос континентальных аэрозолей (ssK) стал преобладающим, а поступление океанических аэрозолей (ssNa) уменьшилось. Вместе с тем приведенные данные свидетельствуют о стабильном климатическом отклике на 200-летние вариации солнечной активности в районе Гренландии.

Иная картина имеет место для двух районов, примыкающих к Северной Атлантике: Северная Скандинавия и Шпицберген. Для этих регионов взаимосвязь климатических и солнечных периодичностей имеет неоднозначный характер. На рис. 2, ж, где приведены результаты вейвлет-анализа вариаций летних температур в Финской Лапландии, видно, что развитие 200-летних климатических вариаций происходит лишь во второй половине прошлого тысячелетия. Аналогичная картина имеет место для 200-летних климатических вариаций в районе Шпицбергена. На рис. 2, з приведены результаты вейвлет-анализа вариаций среднегодовых температур на ледниках Шпицбергена, видно, что 200-летние вариации температур, так же как в Скандинавии, появляются только в конце прошлого столетия. Заметим, что появление 200-летних вариаций в двух районах, примыкающих к Северной Атлантике, совпадает с временным интервалом переме-

ны направления атмосферной циркуляции над Гренландией и, по-видимому, является отражением этого процесса. Необходимо обратить внимание также на то, что появление 200-летних климатических вариаций в районе Шпицбергена несколько запаздывает относительно регистрации аналогичных вариаций в Северной Скандинавии. Таким образом, граница региона, где имеется и отсутствует климатический отклик на внешнее воздействие долговременных солнечных вариаций, может изменять свое географическое положение в зависимости от крупномасштабных процессов в системе атмосфера–океан.

Выявленные в настоящей работе географические (региональные) особенности климатического отклика системы атмосфера–океан на глобальное солнечное воздействие могут быть интерпретированы с позиций нелинейного отклика системы атмосфера–океан на внешнее воздействие. На рис. 1 приведена карта с результатами моделирования температурного отклика системы атмосфера–океан на долговременные вариации солнечной иррадиации [11]. На карту нанесено местоположение районов, из которых получены палеоклиматические данные, использованные для анализа. Как видно на карте, районы Центральной Азии и Западной Канады располагаются в регионах четкого положительного отклика на солнечную периодичность, что и было экспериментально подтверждено в работе. Район Гренландии находится в регионе отчетливого отрицательного отклика на солнечное воздействие. Наличие устойчивого режима ~200-летней периодичности атмосферной циркуляции в этом регионе экспериментально подтверждает чувствительность климатических процессов в регионе к солнечному воздействию вне зависимости от знака температурного отклика системы атмосфера–океан.

Как видно на карте (см. рис. 1), Северо-Атлантический регион является граничным регионом между районами положительного и отрицательного откликов на долговременные вариации солнечного сигнала. Поэтому климатический отклик на солнечное воздействие может быть неустойчивым или же совсем отсутствовать, что и было экспериментально подтверждено на примере палеоклиматических данных для Северной Скандинавии и Шпицбергена.

В заключение заметим, что временной интервал 1400–1600-х гг., когда изменилось направление долговременной атмосферной циркуляции над Гренландией, является временем перехода от Средневекового температурного оптимума ко времени Малого ледникового периода и отмеченная в работе перестройка атмосферных процессов в Северной Атлантике является отражением глобальной перестройки климатических процессов в этот временной интервал.

Выводы

Проделанный в настоящей работе анализ воздействия ~200-летних солнечных периодичностей (deVries cycle) на климатические параметры экспериментально подтвердил нелинейный характер отклика системы атмосфера–океан на солнечное воздействие. На земной поверхности имеются регионы, где такой отклик имеет четкий характер как положительного, так и отрицательного знака, и пограничные регионы, где он может отсутствовать или иметь неустойчивый характер. Положение погра-

ничных районов может изменяться как во времени, так и в пространстве, отражая глобальную перестройку климатических процессов.

Полученные результаты свидетельствуют об отчетливом климатическом отклике на квазидвухсотлетнюю солнечную периодичность. Эта закономерность, по нашему мнению, подтверждает необходимость более детальной оценки солнечного воздействия на процессы, связанные с глобальным потеплением в прошлом столетии.

Работа выполнена при поддержке Президиума РАН (Программа «Изменение окружающей среды и климата»), Президиума Санкт-Петербургского научного центра РАН, Европейской комиссии (Проект «КАМБИФОРУС») и РФФИ (проекты 06-04-48792а, 06-02-16268а, 06-04-64200а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев С.С., Дергачев В.А., Распопов О.М. Источники крупномасштабных вариаций концентрации радиоуглерода в атмосфере Земли // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 39, № 6. С. 80–89.
2. Распопов О.М., Дергачев В.А. Экстремальные солнечные события в прошлом и настоящем столетии как проявление долговременных вариаций солнечной активности // Там же. 2005. Т. 45, № 3. С. 324–328.
3. Максимов Е.Б., Гребенюк А.К. Изменчивость природной обстановки высокогорной зоны Зеравшанского хребта за последние 800 лет // Известия АН СССР. Серия географическая. 1972. № 2. С. 105–106.
4. Delmworth T.L., Manabe S., Stouffer R.J. Multidecadal climate variability in the Greenland Sea and surrounding regions: a coupled model simulation // Geophys. Res. Lett. 1997. V. 24. P. 257–260.
5. Shao X., Liang E., Huang I., Wang I. A 1437-year precipitation history from Qilian juniper in the northwestern Qinghai-Tibetan Plateau // PAGES News. 2005. V. 13, N 2. P. 14–15.
6. Luckman B.H., Wilson R.J.S. Summer temperatures in the Canadian Rockies during the last millennium: a revised record // Climate Dynamics. 2005. V. 24. P. 131–144.
7. Lindholm M., Eronen M. A reconstruction of mid-summer temperatures from ring-width of Scots pine since AD 50 in northern Fennoscandia // Geografica Annaler. 2000. V. 82A. P. 527–535.
8. Meeker I.D., Mayewski P.A. A 1400-year high-resolution record of atmospheric circulation over the North Atlantic and Asia // The Holocene. 2002. V. 12.3. P. 257–266.
9. Isaksson E., Divine D., Kohler J., et al. Climate oscillations as recorded in Svalbard ice core $\delta^{18}\text{O}$ records between AD 1200 and 1997 // Geografiska Annaler. 2005. V. 87A, N 1. P. 203–213.
10. Stuiver M., Reimer P.J., Braziunas T.F. High-precision radiocarbon age calibration for terrestrial and marine samples // Radiocarbon. 1998. V. 40? N 3. P. 1127–1152.
11. Waple F.M., Mann M.E., Bradley R.S. Long-term pattern of solar irradiation forcing in model experiments and proxy based surface temperature reconstruction // Climate Dynamics. 2002. V. 18. P. 563–778.

¹Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Санкт-Петербургский

²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Москва

³Объединенный институт физики Земли РАН, Москва

⁴Исследовательская станция Мекриярви, Университет Йюенсуу, Финляндия

⁵Институт биологии Коми научного центра, УрО РАН, Сыктывкар

⁶Географический департамент Университета Западного Онтарио, Канада.