

УДК 551.590.2

ПРОЯВЛЕНИЕ ВАРИАЦИЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ 70–45 млн лет назад

© 2013 г. О.М. Распопов¹, В.А. Дергачев², П.Б. Дмитриев², О.В. Козырева³

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

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

³ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

Проанализированы уникальные палеоклиматические данные (ширина колец ископаемых окаменевших деревьев) с годичным временным разрешением на предмет исследования периодичности климатических процессов в интервале 70–45 млн лет назад. Выявленные периодичности сопоставлены с солнечными и климатическими периодичностями, регистрируемыми в настоящее время. Показано, что в прошлом (70–45 млн лет назад) в климатических колебаниях с наибольшей интенсивностью проявляется квазидвухсотлетняя и квазивековая периодичности, которые можно интерпретировать как воздействие солнечных цикличностей Зюсса–де Фриза (Suess–de Vries) и Глайсберга (Gleissberg). В спектрах проанализированных палеоклиматических данных проявляются периодичности, характерные для солнечной активности: квазидвадцатилетняя – цикл Хейла (Hale) и 11-летняя – цикл Швабе (Schwabe), установленные по инструментальным данным и историческим наблюдениям солнечных пятен. Делается вывод, что анализ климатических периодичностей с помощью палеодендрохронологии дает информацию о солнечной цикличности, недоступную при исследованиях другими методами. Выявленные палеопериодичности близки по значениям современной периодичности солнечной активности.

Ключевые слова: вариации солнечной активности, климатические изменения, климат Земли.

Введение

Инструментальные наблюдения за вариациями солнечной активности (СА) – число солнечных пятен и групп пятен – получены на временном интервале последних ~ 400 лет. Для оценки вариаций СА в более ранние эпохи используются данные о содержании космогенных изотопов ^{14}C , ^{10}Be и др. в земных «архивах» (кольца деревьев, слоистые структуры ледяных покровов и донных осадков и др.). Генерация космогенных изотопов в атмосфере Земли происходит под воздействием потоков космических лучей (КЛ). В свою очередь, интенсивность потоков КЛ определяется уровнем СА, ко-

торый меняется из-за рассеяния КЛ на неоднородностях солнечного ветра. Образовавшиеся в атмосфере космогенные изотопы после обменных процессов в земных резервуарах (атмосфера и океан) оседают в природных «архивах». Таким образом, вариации концентрации изотопов дают информацию о периодичности СА, а с учетом поправок на обменные процессы – о ее уровне.

Время полураспада космогенных изотопов определяет временной масштаб, в котором возможно восстановление и анализ СА на основе данного изотопа. Так, ^{14}C имеет время полураспада 5730 лет, что позволяет судить об изменчивости СА на масштабах времени до нескольких десятков тысяч лет. Время полураспада ^{10}Be – около 1.5 млн лет и, следовательно, по его содержанию информацию о СА можно в принципе получить для интервала в несколько миллионов лет при условии высокого временного разрешения используемых данных. В то же время детальные данные по измерению концентрации ^{10}Be не превышают последние 50 000 лет [Wagner et al., 2001]. Для интервала в сотни тысяч и миллионы лет индикатором изучения периодического характера СА может служить климатический индикатор, дающий информацию о климатическом отклике системы атмосфера–океан на периодичность СА.

Еще в 1882 г. русский ученый Ф.Н. Шведов обратил внимание на зависимость годичного прироста древесины от величины атмосферных осадков и сделал вывод о повторяемости засух на юго-западе России. Ф.Н. Шведов предложил дендрологический метод датировки условий увлажнения, полагая, что он даст возможность проследить изменения климата за продолжительное время [Шведов, 1892].

Основатель дендрохронологии А. Дуглас в начале XX в. обратил внимание на существование ~11-летней цикличности в радиальном приросте деревьев. Он отождествил эту периодичность с климатическим откликом на воздействие 11-летнего солнечного цикла Швабе (Schwabe) [Douglass, 1919, 1928, 1936]. А. Дуглас и другие исследователи на основе анализа дендрологических и других палеоклиматических данных, а также объектов, обладающих слоистой структурой (ленточные глины в озерных отложениях, ледяные купола Гренландии и Антарктиды и др.), выявили проявление климатических вариаций, соответствующих фундаментальным циклам СА [Шиятов, 1962, 1975; Костин, 1965; Ловелиус, 1979; Мазена, 1986; Дергачев, Чистяков, 1993; Дергачев, 1996; Cook et al., 1997; Hoyt, Schatten, 1997; Распопов и др., 2001, 2005; Roig et al., 2001; Vasiliev, Dergachev, 2002; Ogurtsov et al., 2002; Васильев и др., 2004; Raspopov et al., 2004b, 2008; Дергачев, 2006; Дергачев и др., 2007; Дергачев, Распопов, 2008]. Следует отметить, что в климатических периодичностях, кроме солнечных, достаточно часто прослеживаются и периодичности около 30 и 17–18 лет. Первая из них носит название цикла Брюкнера (Bruckner). Интерпретацию 17–18-летней периодичности можно дать с позиций воздействия цикличности лунных приливов (лунный цикл Сароса – 18.6 лет) [Currie, 1993; Cook et al., 1997; Hoyt, Schatten, 1997]. С другой стороны, обе эти периодичности близки к комбинационным частотам солнечных циклов и циклов Глайсберга (Gleissberg) и Хейла (Hale) [Распопов и др., 2001].

Таким образом, ряд климатических индикаторов – объектов, обладающих тонкой слоистой структурой и имеющих точную временную привязку, позволяет достаточно точно оценивать солнечное воздействие на изучаемые природные объекты, что значительно расширяет получение информации о СА за пределами инструментальных наблюдений.

Целью настоящей работы является анализ уникальных палеоклиматических данных в интервалах 70–68 и около 45 млн лет назад, имеющих временное разрешение в 1 год. Такими данными являются вариации ширины колец окаменевшего кипариса (возраст

~ 68–70 млн лет), обнаруженного в угольной шахте в провинции Альберта (Канада) (см. сайт в Интернете http://www/technology.gov.ab.ca/en/student_projects_265.cfm) и окаменевшего хвойного дерева (возраст ~ 45 млн лет), представленного в музее заповедника «The Petrified Forest» («Окаменевший лес») в Калифорнии (США) (см. сайт в Интернете www.petrifiedforest.org).

Отметим, что первый из названных объектов произрастал накануне драматического события в истории Земли: глобального вымирания животного и растительного мира на границе мезозойской и кайнозойской эр (~ 65 млн лет назад). Тогда вымерли динозавры, погибло 16 % семейств морских и 18 % сухопутных животных. Ряд исследователей связывают эти резкие климатические изменения с падением в это время на Землю астероида размером ~ 10 км в районе современного п-ова Юкатан в Мексике и образованием кратера Чиксулуб [Ясаматов, 1985; Keller et al., 2004; Tynell, 2004; Короновский и др., 2006].

Необходимо подчеркнуть, что оба ископаемых окаменевших дерева произрастали в условиях, когда климат существенно отличался от современного и циркуляционные процессы в системе атмосфера–океан имели отличную от современной структуру.

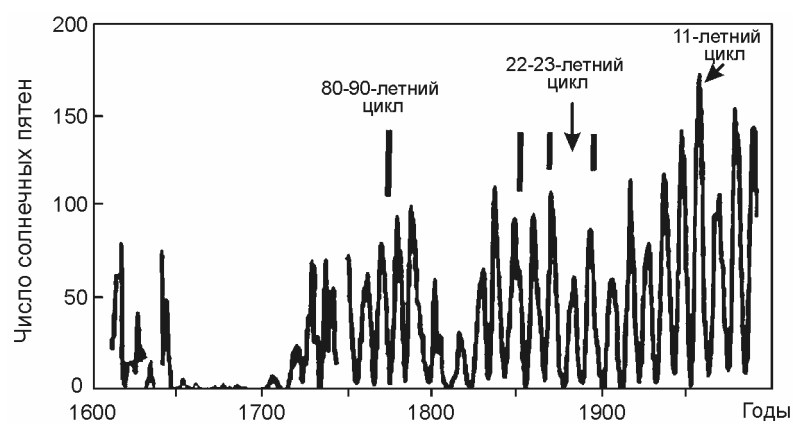
В рамках настоящей работы палеоклиматические данные – вариации ширины колец ископаемых окаменевших деревьев – были подвергнуты спектральному и вейвлет-анализу с целью выявления периодичностей в климатических изменениях в прошлом. Полученные данные были сопоставлены с периодичностями солнечной активности и климатических изменений в настоящее время.

Вариации солнечной активности и их климатический отклик в современное время и тысячи лет назад

Фундаментальные периодичности солнечной активности

На рис. 1, а приведены результаты инструментальных наблюдений за изменением СА (число солнечных пятен) за последние 400 лет. Видно, что в XVII в. наблюдался глубокий минимум СА, который получил название маундеровского, а затем до настоящего времени прослеживается четкая ~11-летняя цикличность СА (цикл Швабе). Вариация амплитуды 11-летних циклов свидетельствует о наличии в СА так называемого векового цикла, или цикла Глайсберга ($T \sim 80\text{--}90$ лет). Кроме того, имеются различия в амплитудах четных и нечетных циклов СА. Эта периодичность связана с изменением полярности магнитного поля Солнца и получила название цикла Хейла. Она имеет удвоенный по сравнению с циклом Швабе период – 22–23 года.

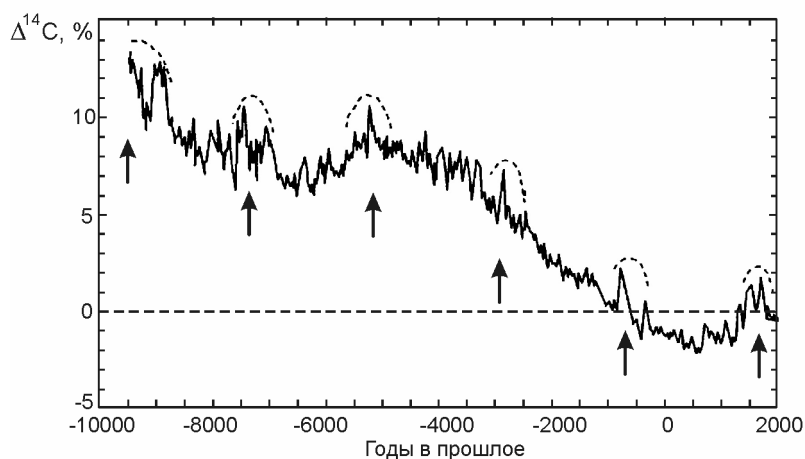
Как указывалось ранее, для прослеживания изменений СА в доинструментальный период используются данные о концентрации космогенных изотопов в земных «архивах». На рис. 1, б приведена реконструкция СА в интервале 850–2000 лет назад по данным о концентрации ^{10}Be во льдах Гренландии и Антарктиды и концентрации ^{14}C в кольцах деревьев, а также усредненные по 11-летним интервалам инструментальные данные о СА [Usoskin et al., 2003]. На рисунке обозначены времена больших минимумов СА: Оорта, Вольфа, Шпёрера, Маундера и Дальтона, а также средневекового максимума СА. Из представленных графиков видно, что временная повторяемость больших минимумов СА составляет примерно 200 лет. Такой цикл солнечной активности получил название цикла Зюсса–де Фриза.



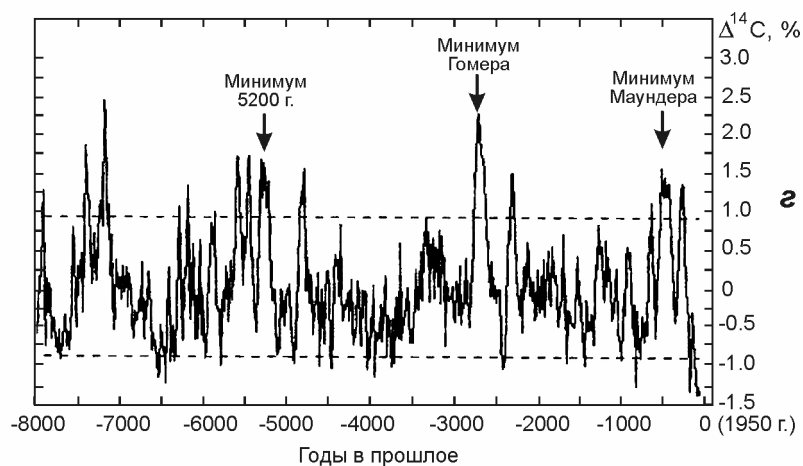
а



б



в



г

На рис. 1, *в* приведена кривая концентрации ^{14}C ($\Delta^{14}\text{C}$) в кольцах деревьев за последние 11 400 лет [Stuiver, Plicht van der, 1998]. Кроме отклика на воздействие СА, заметен долговременный тренд, связанный с временными изменениями величины магнитного поля Земли, которое экранирует потоки космических лучей. Вариации концентрации ^{14}C после исключения тренда, связанного с изменением величины геомагнитного поля, показаны на рис. 1, *г*. Как на рис. 1, *в*, так и на рис. 1, *г* видна 2300–2400-летняя повторяемость глубоких минимумов СА. 2300–2400-летняя солнечная цикличность получила название цикла Гальштат (Hallstatt).

Необходимо подчеркнуть, что периоды различных циклов СА не являются постоянными. Инструментальные данные свидетельствуют об изменениях продолжительности квазиодиннадцатилетнего цикла Швабе от 9 до 14 лет. Анализ изменения продолжительности солнечного цикла Хейла во временном интервале вблизи маундеровского минимума и в течение него свидетельствует об изменении периода от 20 до 26–28 лет [Raspopov et al., 2004a]. М.Г. Огурцовым с соавторами [Ogurtsov et al., 2002] при анализе цикличности Глайсберга было показано, что этот цикл может расщепляться в некоторых временных интервалах на две ветви: 60–70 и 100–120 лет. Изменение периода квазидвухсотлетнего цикла с 230 до 180 лет было зафиксировано в последнем тысячелетии [Raspopov et al., 2007, 2008].

Климатический отклик на солнечную активность

Как уже отмечалось, А. Дуглас [Douglass, 1919] установил отклик 11-летнего солнечного цикла в вариациях ширины колец деревьев. В дальнейшем в палеоклиматических данных различными исследователями было отмечено проявление фундаментальных периодичностей СА. Приведем в этом плане несколько примеров.

На рис. 2, *а* и 2, *б* представлены спектры Фурье радиального прироста сосны (*Pinus sylvestris* L.) в Лапландии (Северная Финляндия) [Ogurtsov et al., 2002] и на Кольском п-ове (Россия) [Raspopov et al., 2004b]. Видно, что периодичность радиального прироста сосны в двух близко расположенных районах имеет одинаковую структуру. В обоих спектрах прослеживаются периоды около 90 лет, что может быть отражением воздействия солнечного цикла Глайсберга, периоды около 23 лет, которые могут отражать воздействие цикла Хейла, а также периодичность в 11 лет. Кроме того, в обоих спектрах присутствуют периоды около 33, 18 и 13 лет. Тридцатилетний климатический цикл носит наименование цикла Брюкнера; в современную эпоху зафиксировано его проявление в различных климатических параметрах. Периодичности в 13 и 17–18 лет зарегистрированы в вариациях температуры в г. Мурманске и могут быть связаны с внутренними процессами в системе атмосфера–океан в арктическом регионе [Raspopov и др., 2013].



Рис. 1. Результаты инструментальных наблюдений за солнечной активностью (число солнечных пятен) за последние 400 лет (*а*); реконструкция солнечной активности в интервале от 850 до 2000 лет по данным о содержании ^{10}Be во льдах Гренландии и Антарктиды (*1*), концентрации ^{14}C в кольцах деревьев (*3*) и усредненным по 11-летним интервалам инструментальным данным (*2*) (по: [Usoskin et al., 2003]) (*б*); вариации концентрации $\Delta^{14}\text{C}$ в кольцах деревьев за последние 11 400 лет (по: [Stuiver, Plicht van der, 1998]) (*в*) (стрелками указаны максимумы СА) и за последние 8000 лет после исключения долговременного тренда, связанного с изменениями величины магнитного поля Земли (*г*)

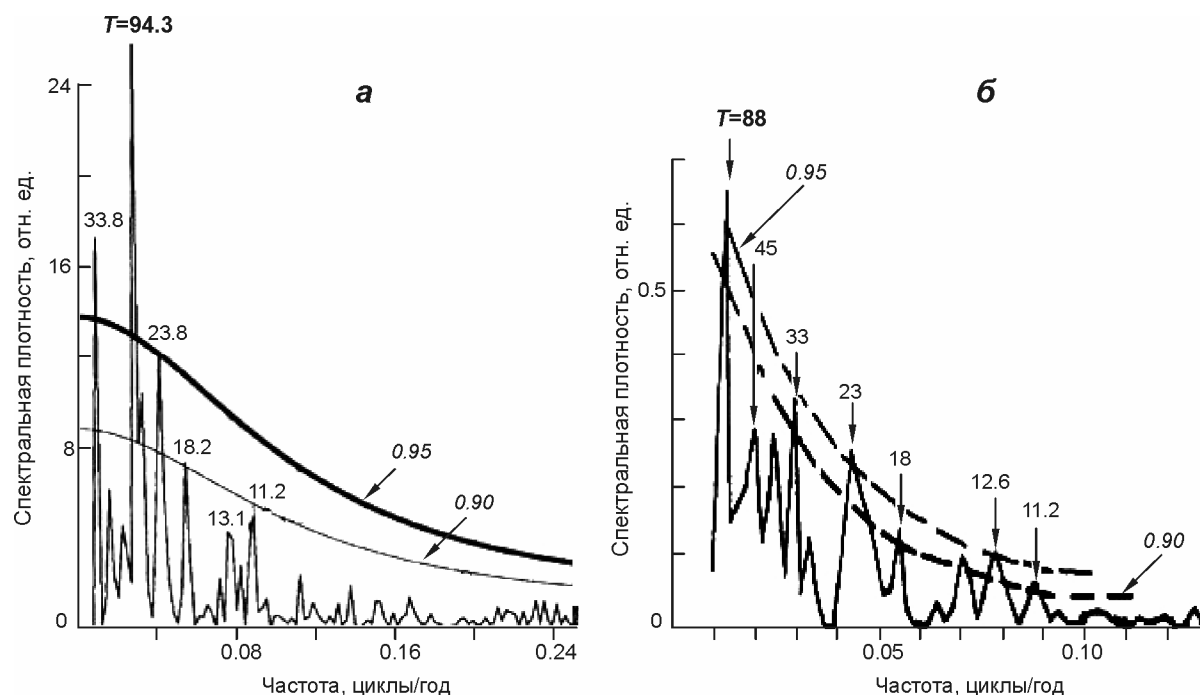


Рис. 2. Фурье-спектры радиального прироста сосны (*Pinus sylvestris* L.) в Лапландии (Северная Финляндия) [Ogurtsov et al., 2008] (а) и на Кольском п-ове (Россия) [Raspopov et al., 2004] (б)

На рис. 3, б приведены результаты вейвлет-анализа (базис Морле) вариаций годовичных донных отложений оз. Блинден (Blinden) в Дании в интервале 6500–2500 лет назад [Olsen, 2007]. На рис. 3, а показаны результаты фильтрации кривой $\Delta^{14}\text{C}$, представленной на рис. 1, з, в диапазоне периодов 210 лет. Из приведенных данных видно, что климатические вариации имеют такую же периодичность, что и солнечные и, кроме того, их амплитуда нарастает при увеличении амплитуды $\Delta^{14}\text{C}$. Климатические вариации, отраженные в донных осадках оз. Блинден, имеют периодичность не только в ~200-летнем диапазоне. Около 5000–4500 лет назад появляются вариации с периодом порядка 100 и 70–80 лет, что может свидетельствовать о климатическом отклике на солнечную цикличность Глайсберга.

Для последнего тысячелетия была выявлена квазидвухсотлетняя периодичность радиального прироста можжевельника в районах Тянь-Шаня и на Тибетском плато, а также сосны в Скалистых горах в Западной Канаде. Эта периодичность имела высокую степень корреляции с ~200-летней периодичностью СА (коэффициент корреляции от 0.73 до 0.94) [Raspopov et al., 2007, 2008].

Приведем результаты спектрального анализа радиального прироста деревьев возрастом в тысячи лет – остистой сосны (*Bristlecone pine*), произрастающей в горах Калифорнии (США). На рис. 4, а показан самый старый живой организм на планете – остистая сосна «Муфусаил». Она начала расти в 2832 г. до н.э. На рис. 4, б приведены результаты спектрального анализа вариаций $\Delta^{14}\text{C}$ и радиального прироста этой сосны, проделанного еще в 1984 г. [Sonett, Suess, 1984]. Спектры отчетливо показывают ~200-летнюю периодичность в обеих кривых.

О высокой степени корреляции между климатическими и солнечными вариациями в голоцене свидетельствуют результаты обработки палеоклиматических данных (прирост

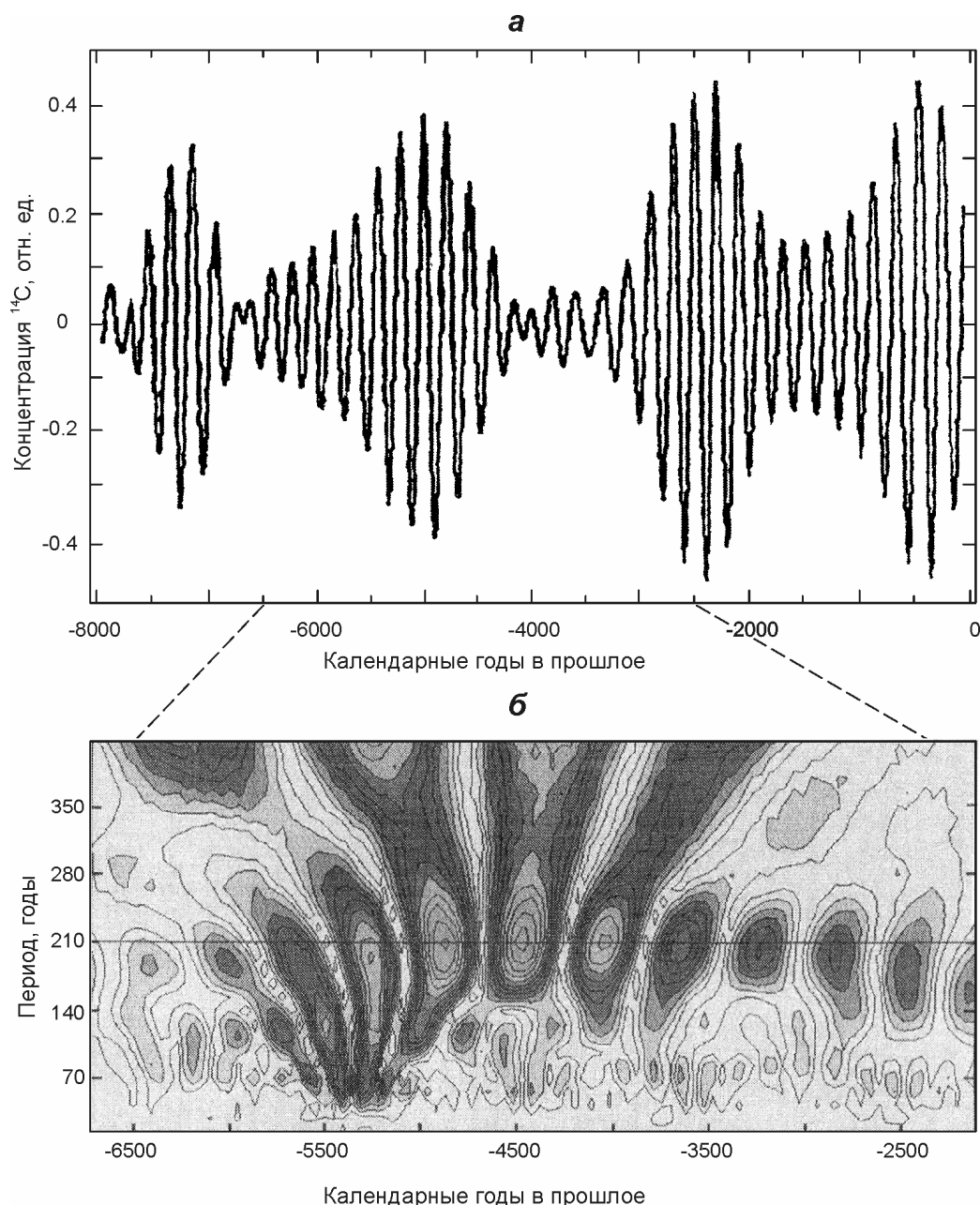


Рис. 3. Результаты фильтрации кривой $\Delta^{14}\text{C}$, представленной на рис. 1, z , в течение 210 лет (а) и вейвлет-анализа (базис Морле) вариаций годовых донных отложений оз. Блинден (Blinden) в Дании в интервале от 6500–2500 лет назад [Olsen, 2007] (б)

сталактитов в пещерах Омана) и изменение содержания радиоуглерода. На рис. 5 приведено сопоставление вариаций $\Delta^{14}\text{C}$ и вариаций содержания кислорода ^{18}O ($\delta^{18}\text{O}$) в интервале 9600–6200 лет назад [Neff et al., 2001]. Вариации $\delta^{18}\text{O}$ применительно к данному случаю характеризуют интенсивность осадков. Авторы проведенного исследования подчеркивают высокую степень корреляции между вариациями солнечной активности и климатическими.

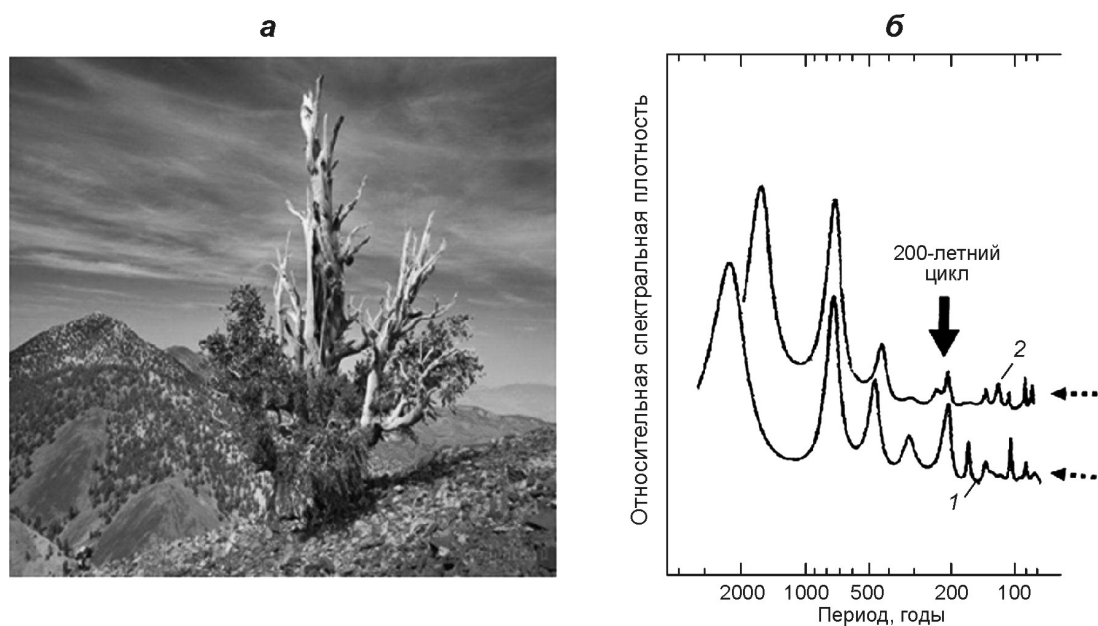


Рис. 4. Самый старый (свыше 4840 лет) живой организм на планете – остистая сосна «Мифусаил» (а) и результаты спектрального анализа вариаций $\Delta^{14}\text{C}$ (1) и радиального прироста остистой сосны (2) [Sonett, Suess, 1984] (б)

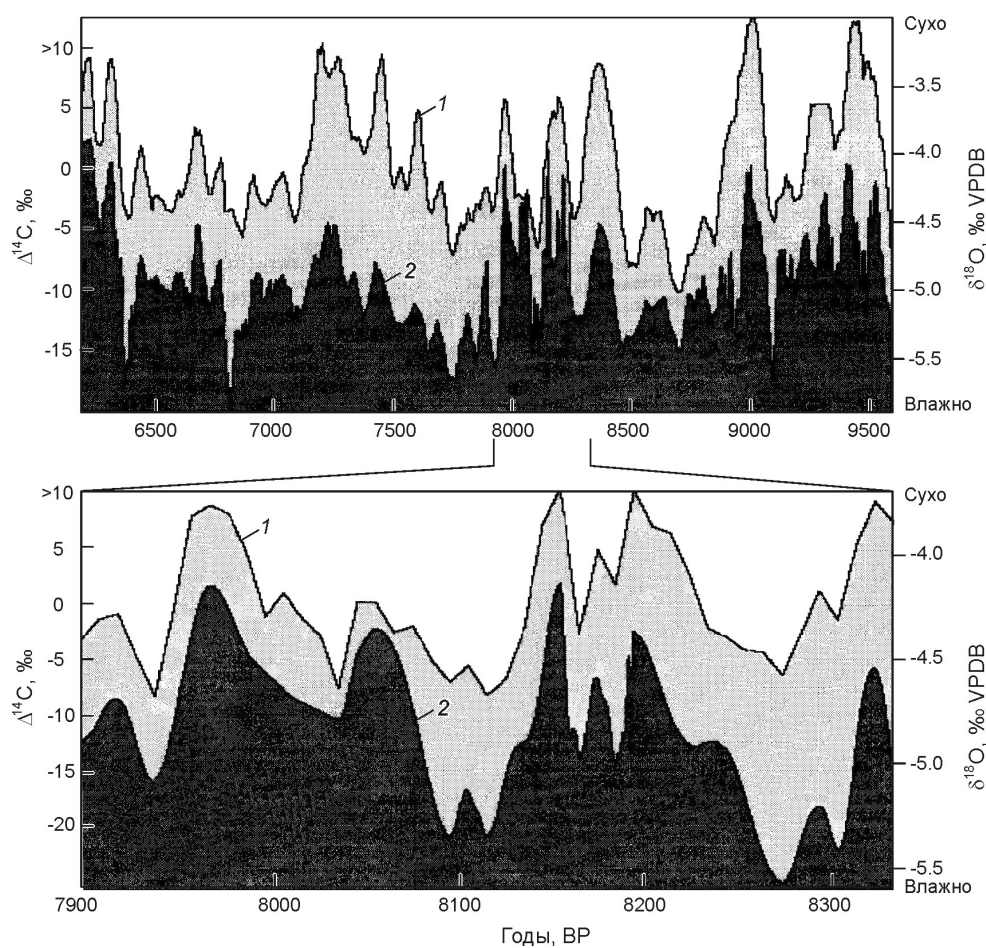


Рис. 5. Вариации содержания $\Delta^{14}\text{C}$ (1) и кислорода ^{18}O ($\delta^{18}\text{O}$) (2) в сталактитах (пещера в Омане) за временной интервал 9600–6200 лет назад [Neff et al., 2001]

Таким образом, приведенные выше данные, а также результаты других исследований убедительно свидетельствуют о том, что палеоклиматические данные, в первую очередь вариации радиального прироста деревьев и годовичные вариации толщины донных осадков, могут быть использованы как климатические индикаторы вариаций солнечной активности.

Климатические индикаторы вариаций солнечной активности в интервале 45–70 млн лет назад

На возможность использования вариаций ширины колец окаменевших деревьев для изучения климатической изменчивости было обращено внимание еще в начале XX в. На рис. 6, а приведены годовичные кольца ствола окаменевшего хвойного дерева *Protopiceoxylon exstinctum*, найденного на Земле короля Карла в архипелаге Шпицберген во время полярной экспедиции под руководством А.Г. Натгорста (A.G. Nathorst) в 1898 г. [Gothan, 1907, 1912; Schwarbach, 1950]. В. Готан [Gothan, 1912] провел специальное исследование, чтобы удостовериться в том, что кольца окаменевшего дерева отражают именно годовичные климатические изменения. Возможно, это было первое исследование подобного рода в столь высоких широтах. Возраст ископаемого дерева оценивается как конец юрского—начало мелового периода, т.е. около 150–140 млн лет назад. В это время климат Земли был значительно теплее современного, а в средних широтах преобладала тропическая растительность. Однако формирование годовичных колец у хвойного дерева в высоких широтах свидетельствует, что там происходили смены времен года. На рис. 6, а изменение ширины колец дерева прослеживается довольно четко. При этом число колец от меньших значений ширины до больших составляет 10. Если полагать, что дальнейшее изменение толщины колец является периодическим, то период окажется равным ~ 20 лет, что может служить климатическим индикатором солнечного цикла Хейла в данный временной интервал.

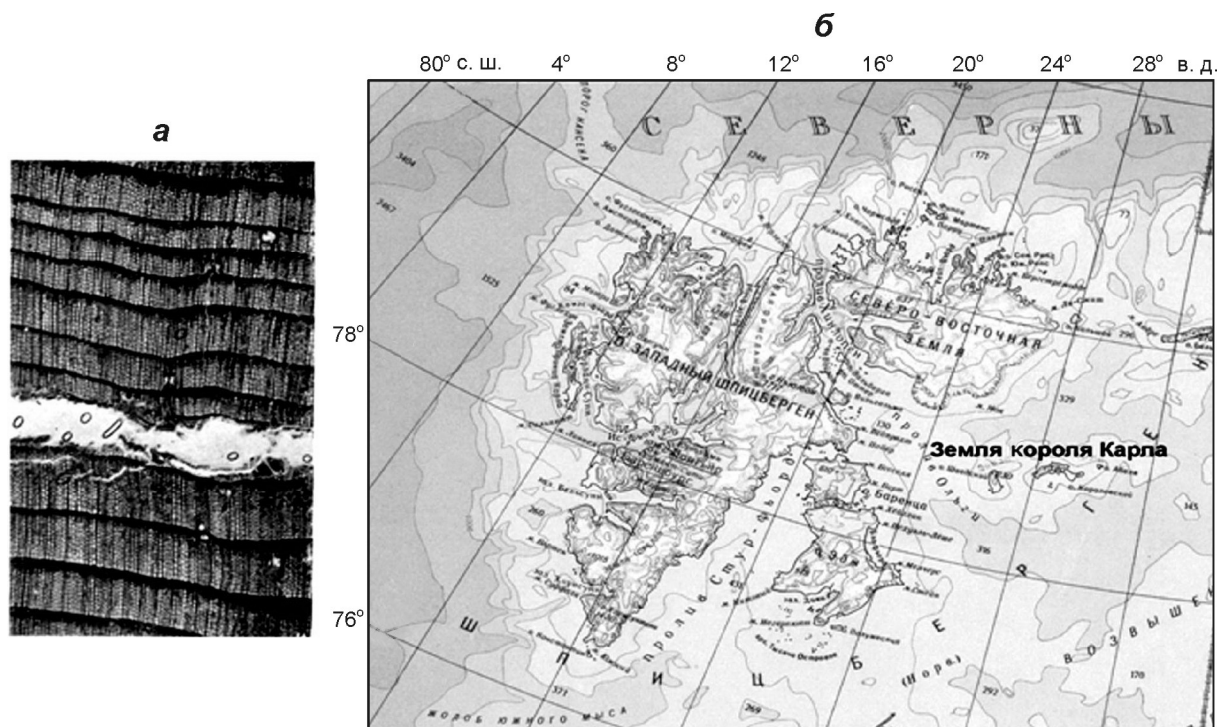


Рис. 6. Фотография среза ствола окаменевшего хвойного дерева *Protopiceoxylon exstinctum*, найденного на Земле короля Карла (78°55' с.ш., 28°10' в.д.) в 1898 г. (а) и местоположение Земли короля Карла в архипелаге Шпицберген (б)

Авторы настоящей статьи располагают данными для двух образцов ископаемых деревьев. Одно из них – древний кипарис, произраставший в Северной Америке на территории современной провинции Альберта (Канада) (см. сайт в Интернете http://www.technology.gov.ab.ca/en/student_projects_265.cfm) (рис. 7, а). Окаменевший кипарис был поднят из угольной шахты, расположенной вблизи от электростанции Батл Ривер в восточной части провинции Альберта (53° с.ш., 114° з.д.). Возраст кипариса датируется поздним мелом (70–68 млн лет назад).



Рис. 7. Части ствола окаменевшего кипариса, поднятого из угольной шахты, расположенной в восточной части провинции Альберта (Канада) (53° с.ш., 114° з.д.) (а) и образец среза хвойного дерева из музея заповедника «The Petrified Forest» («Окаменевший лес») в Калифорнии (США) (б)

Второй образец ископаемого дерева был сфотографирован О.М. Распоповым в музее заповедника «The Petrified Forest» («Окаменевший лес»), расположенного в Калифорнии (США) (см. сайт в Интернете www.petrifiedforest.org) (рис. 7, б). По информации, полученной от менеджера заповедника доцента Д. Строка (D. Stroock), этот образец имеет возраст около 45 млн лет и был привезен из района Орегон/Невада (США) (~ 42° с.ш., ~ 118° з.д.), т.е. из района, расположенного примерно на той же долготе, что и первый из рассматриваемых нами образцов, но на 1000 км южнее.

Время произрастания ископаемого кипариса (около 66 млн лет назад; граница К–Т) – это время повсеместной гибели значительного в процентном отношении состава животного и растительного мира, включая динозавров [Ясаматов, 1985; Russell, 1979, 1982; Crowley, North, 1991; Короновский и др., 2006]. Эти события обычно связывают с падением на п-ов Юкатан в Мексике громадного астероида. Но могли быть и другие причины, связанные с дрейфом континентов, перестройкой климатической системы, а также с усилением вулканической деятельности в этот период [Crowley, North, 1991; Keller et al., 2004].

На рис. 8 приведены оценки изменения температуры на Земле, начиная с К–Т границы (см.: [R.A. Rohde // Сайт в Интернете <http://www.globalwarmingart.com/>; Zachos et al., 2001]). Отметим, что для определения изменения температуры в прошлом используется отношение концентраций тяжелого ^{18}O и легкого ^{16}O в исследуемых образцах. Кислород является одним из наиболее значимых определителей в расшифровке прошлых климатов; его содержание в природных объектах изменяется с изменением климата. Экспериментально установлена корреляция между концентрацией ^{18}O , а также дейтерия в осадках и температурой воздуха. Относительное количество этих двух изотопов в образцах воды, льда, дерева, породы, человека и др. является функцией климата или окружающей среды (см., например, [Jouzel et al., 1997]).

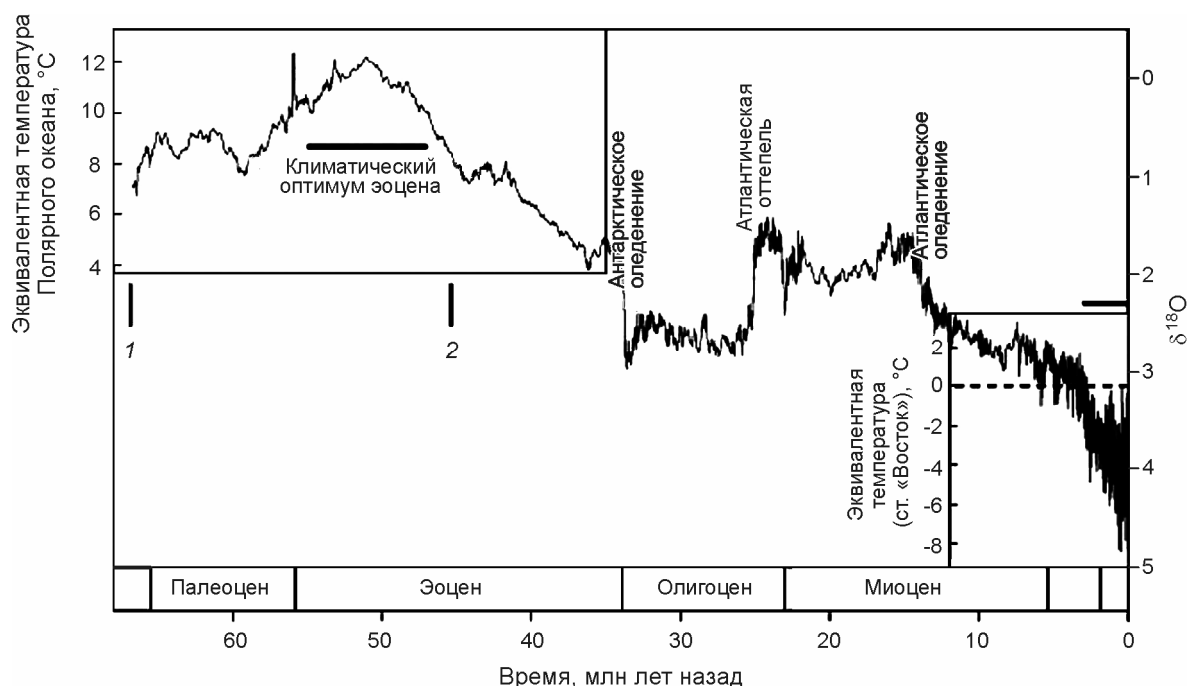


Рис. 8. Изменения средней годовой температуры на Земле с 66 млн лет назад по настоящее время. Указано временное положение обнаруженных остатков ископаемых деревьев: 68–70 (1) и ~48 (2) млн лет назад

Из данных, приведенных на рис. 8, видно, что оба рассматриваемых нами ископаемых дерева произрастали в условиях более теплого, чем в настоящее время, климата – температура была примерно на 10° выше современной. Об условиях произрастания ископаемого кипариса мы можем судить, в частности, по тому, что кипарисы того же вида произрастают в настоящее время южнее, на $21\text{--}23^{\circ}$ с.ш. в Калифорнии и Флориде.

На рис. 9, а показано расположение континентов в конце мелового периода [Scotese, 2001] и местоположение региона, где был найден ископаемый кипарис. К провинции Альберта простирался вдоль Скалистых гор большой залив, что способствовало развитию здесь теплого и влажного климата, о чем, в частности, свидетельствуют большие поперечные размеры ствола дерева. На рис. 9, б приведен график вариаций ширины колец ископаемого кипариса. График построен на основе 380 значений ширины колец дерева А. Куком (A. Cook) (см. сайт в Интернете http://www.technology.gov.ab.ca/en/student_projects_265.cfm). Обратим внимание на одну особенность в радиальном приросте ископаемого кипариса: в течение первых 80–100 лет наблюдается возрастание ширины колец, после чего происходит уменьшение их ширины. У современных хвойных деревьев ширина колец обычно равномерно убывает с возрастом.

Аномальный характер долговременных изменений ширины колец ископаемого кипариса может быть проиллюстрирован сопоставлением с графиком долговременных (1500 лет) изменений в радиальном приросте сосны из Северной Швеции [Grudd, 2008]. На рис. 10 приведена осредненная кривая долговременного изменения радиального прироста сосны, начиная с первого года роста. График построен на основании обработки данных 600 деревьев. Видно, что ширина колец дерева возрастает только в первые несколько лет, а затем начинает достаточно быстро убывать в течение 50–70 лет. На рисунке также приведен график изменения ширины колец ископаемого кипариса, из которого видно, что его радиальный прирост имеет противоположную тенденцию: ширина колец возрастает в течение первых 80–100 лет. Можно предположить, что подобное

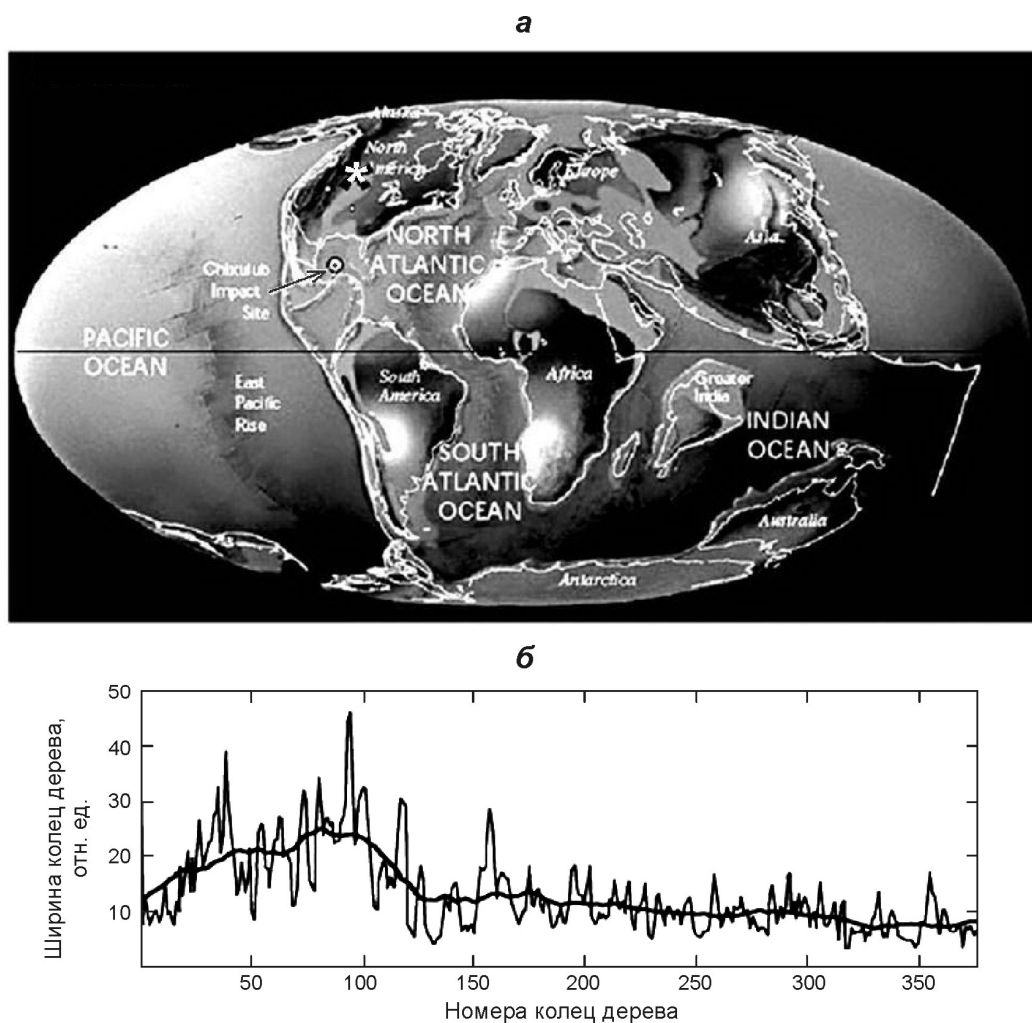


Рис. 9. Расположение континентов в конце мелового периода (а) (стрелкой указано местоположение региона, где был найден окаменевший кипарис) и график вариаций ширины колец окаменевшего кипариса (б)

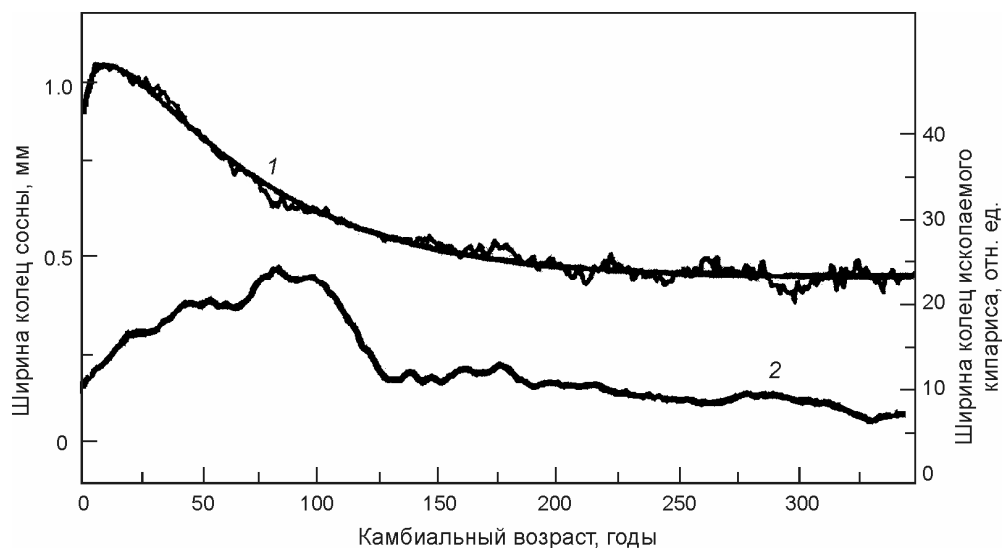


Рис. 10. Региональная кривая изменения ширины колец деревьев для Северной Скандинавии, базирующаяся на анализе 620 экз. сосны (*Pinus sylvestris* L.), произраставших во временном интервале 500–2004 лет (1) и осредненная по скользящим 45-летним интервалам кривая ширины колец окаменевшего ископаемого кипариса (Калифорния, США) (2)

долговременное изменение радиального прироста кипариса связано с улучшением природных условий существования дерева, т.е. с климатическими изменениями.

Представленный на рис. 9, б ряд был подвергнут вейвлет-анализу (базис Морле) и анализу скрытых периодичностей. Результаты вейвлет-анализа показаны на рис. 11. Они свидетельствуют о проявлении в спектре вариаций ширины колец ископаемого кипариса периодичностей в ~ 100–120, 60, 20–22 и 9 лет. Два первых из названных циклов соответствуют солнечным циклам Глайсберга и Хейла. Ранее было упомянуто, что солнечная цикличность Глайсберга в современную эпоху может расщепляться в отдельные временные интервалы на две ветви: 60–70 и 100–120 лет [Ogurtsov *et al.*, 2002]. По-видимому, подобные процессы имели место и в прошлом.

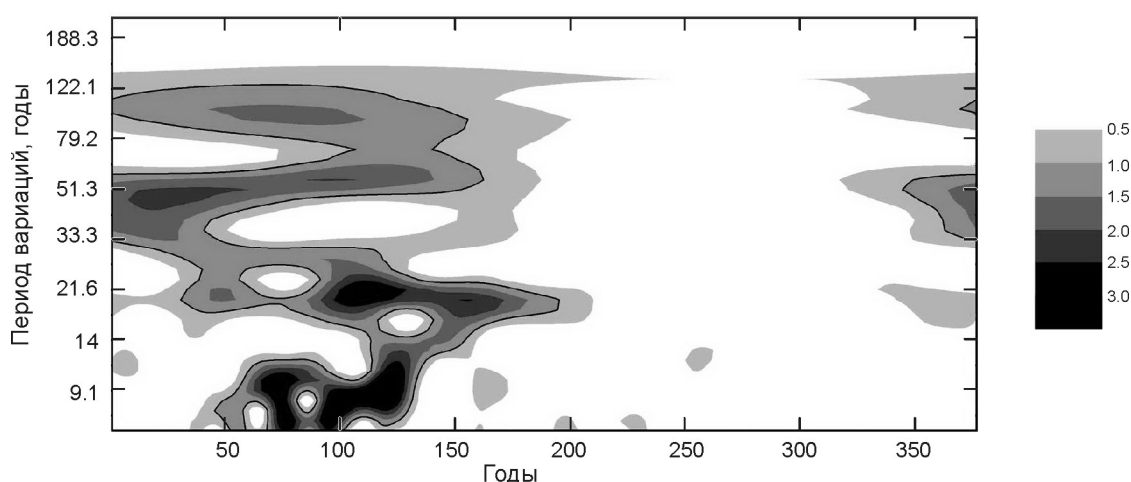


Рис. 11. Результаты вейвлет-анализа (базис Морле) вариаций ширины колец окаменевшего ископаемого кипариса (Калифорния, США)

Интерпретация 9-летнего цикла неоднозначна. Диапазон изменений периода цикла Швабе охватывает и период в 9 лет. Однако для этого нужно предположить, что высокая солнечная активность сохранялась, как следует из результатов вейвлет-анализа, в течение более 50 лет. Поэтому можно предположить, что проявление 9-летнего цикла скорее связано с внутренними процессами в системе атмосфера–океан.

На рис. 12 приведена периодограмма, построенная модифицированным методом спектрального анализа, применяемым для выявления скрытых периодичностей. Кратко суть модификации общепринятого метода состоит в следующем (более подробно см. работу [Распопов и др., 2013]).

Выборочная оценка нормированной спектральной плотности [Дженкинс, Ваттс, 1972] для исходных временных рядов вычислялась в зависимости не от частоты, а от пробного периода, что обуславливается постановкой задачи о выявлении скрытой периодичности в исходных данных [Серебренников, Первозванский, 1965]. В основе этой задачи лежит предположение, что исходный временной ряд состоит из двух составляющих: полигармонической – с конечным числом гармоник, имеющих различные амплитуды и периоды, и «помех», причем к последним относят как случайные, так и любые другие детерминированные сигналы, но не содержащие гармоник первой полигармонической составляющей. Поиск числа гармоник полигармонической части исходного сигнала и значений их периодов организовывался при помощи так называемого пробного периода, значения которого перебираются из диапазона возможных значений, определяемого физическими условиями изучаемого явления.

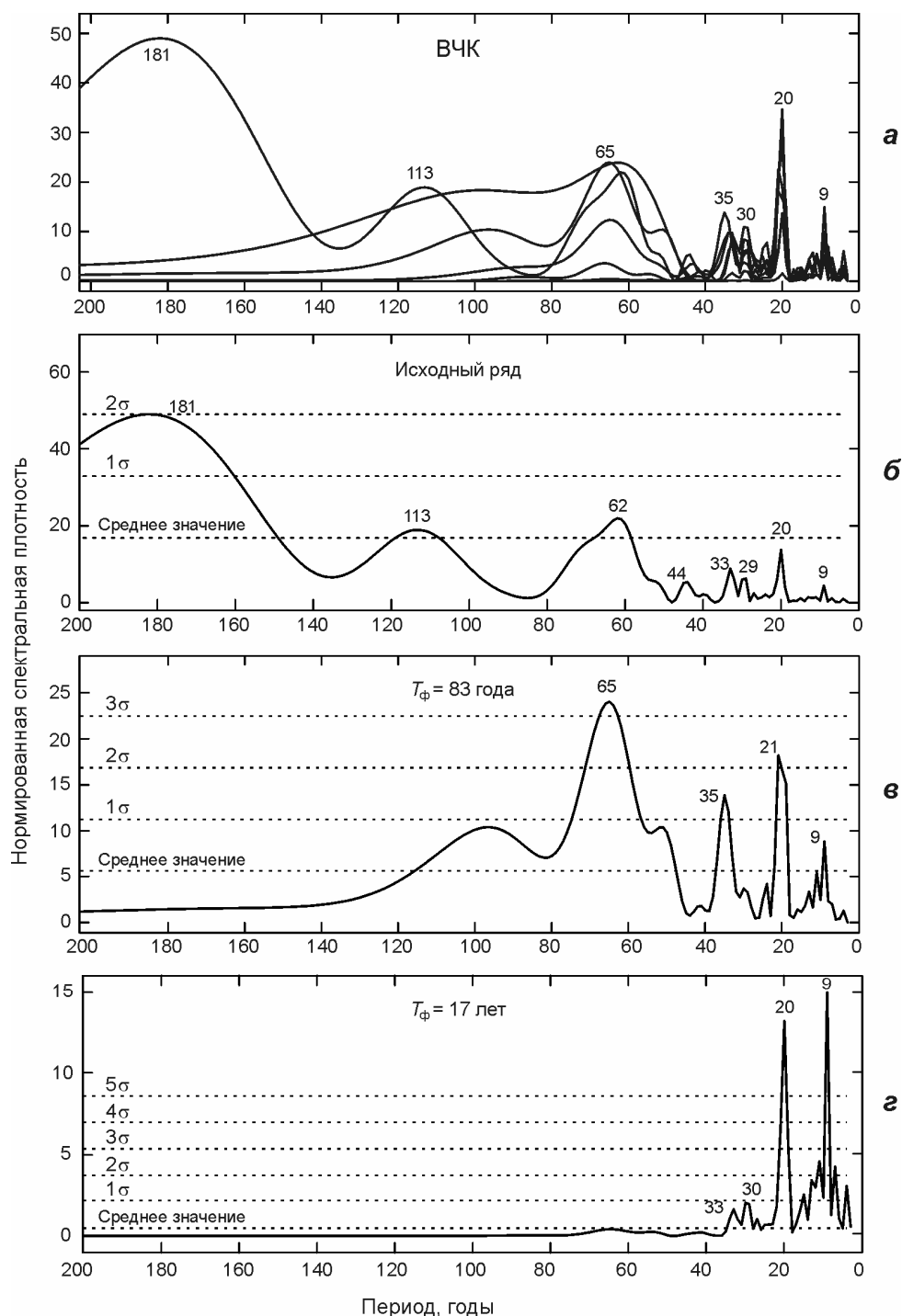


Рис. 12. Периодограмма вариаций ширины колец окаменевшего ископаемого кипариса, построенная модифицированным методом спектрального анализа, используемого для выявления скрытых периодичностей

Объединенные графики: *а* – для исходных данных и для отфильтрованных кривых с T_ϕ , равной 7, 17, 31, 53, 83, 127 и 179 лет; *б* – только для исходных данных; *в* – для отфильтрованных данных с $T_\phi = 83$ года; *г* – для отфильтрованных данных с $T_\phi = 17$ лет. Горизонтальные линии показывают среднюю величину и уровень достоверности от 1σ до 5σ

Далее исходные ряды подвергались предварительной высокочастотной фильтрации [Alavi, Jenkins, 1965] с заранее заданной частотой «среза» фильтра на половине мощности сигнала, которой во временной области соответствует величина «разделительного» периода T_ϕ . Серия значений параметра T_ϕ обычно выбирается из физических условий рас-

смаатриваемой задачи: характерных особенностей временной структуры обрабатываемых данных и гипотетического предположения о возможности существования в них тех или иных групп периодических компонентов. Фильтрация исходных данных осуществлялась с целью устранения в них тренда и более мощных низкочастотных компонентов.

Затем для каждого отфильтрованного со своим конкретным значением параметра T_{ϕ} высокочастотного компонента (ВЧК) снова вычислялась оценка нормированной спектральной плотности от периода и, наконец, все эти оценки, вычисленные для различных значений параметра T_{ϕ} , накладывались друг на друга на одном и том же поле графика, образуя комбинированную спектральную периодограмму (КСП).

Такая модификация общепринятого метода спектрального анализа позволяет исследовать стабильность положения выявленного периода на периодограмме. Это происходит за счет устранения из исходного сигнала тренда и более мощных долгопериодических составляющих, которые дают основной вклад в дисперсию сигнала.

Как видно из периодограммы, представленной на рис. 12, в дополнение к вышеназванным периодичностям в спектре присутствуют периодичность около 30 лет (цикл Брюкнера), а также четко выраженная квазидвухсотлетняя периодичность (цикл Зюсса–де Фриза).

На рис. 13 приведены результаты фильтрации исходной кривой вариаций ширины колец ископаемого кипариса в диапазонах периодов, выявленных на периодограмме. Во всех частотных диапазонах фильтрации прослеживается модуляция амплитуды сигнала с периодом около 200 лет. Это позволяет предположить, что цикличности в диапазонах периодов 8–10, 18–22 и 28–30 испытывают воздействие СА.

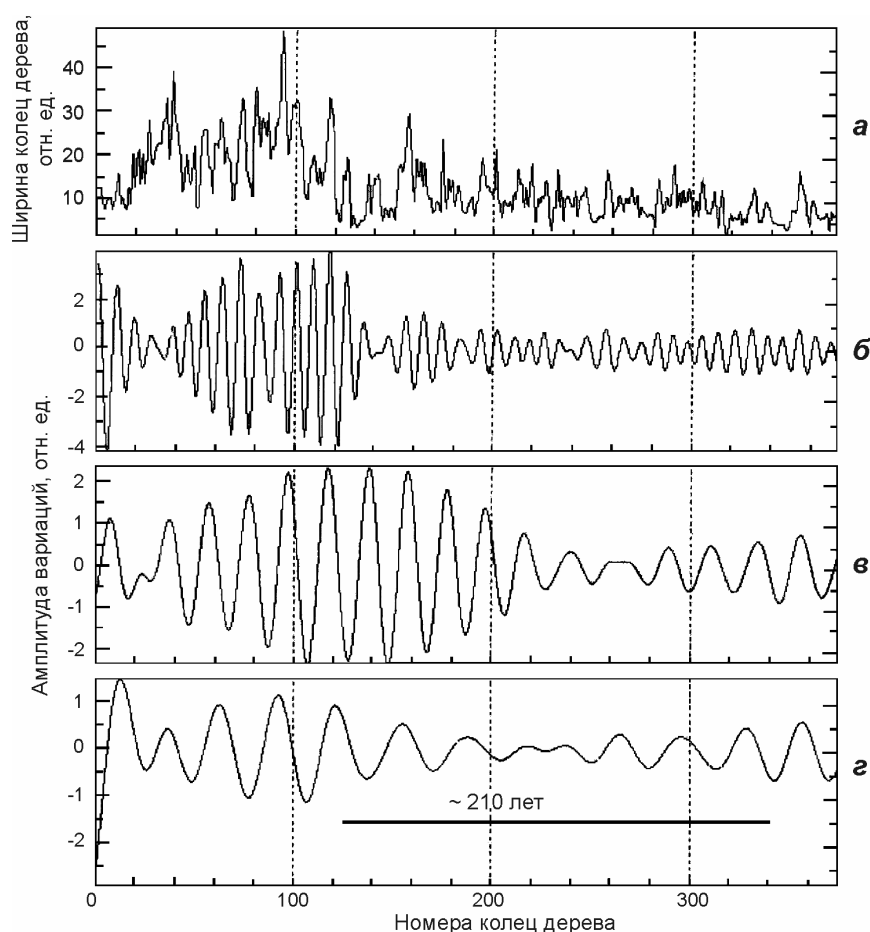


Рис. 13. Исходная кривая изменения ширины колец окаменевшего ископаемого кипариса (а) и результаты фильтрации исходной кривой в диапазонах периодов 8–10 (б), 18–22 (в) и 28–30 (з) лет

Следует заметить, что обнаруженный нами и показанный на рис. 13 эффект 200-летней модуляции (если исходить из наблюдаемого эффекта увеличенной интенсивности сигнала в диапазоне до 100-летней отметки по сравнению с его остальной частью) допускает и альтернативную интерпретацию. На рис. 13, *а* хорошо видно, что дисперсия исходной кривой значительно повышена в окрестности 100-летней отметки, но затем спадает к концу ряда. Если частотный состав сигнала остается приблизительно постоянным на всем протяжении наблюдений, то упомянутое уменьшение дисперсии неизбежно будет проявляться и на всех отфильтрованных кривых, т.е. во всех диапазонах периодов, что хорошо прослеживается на рис. 13, *б–г*. Так как явное увеличение дисперсии происходит всего лишь один раз на протяжении всей области измерения сигнала, то неясно, как бы дисперсия изменялась до или после проанализированного интервала, если бы ряд данных мог быть продолжен. То есть в действительности период может оказаться не 200-летним, а более длительным. К сожалению, длина изучаемого нами ряда недостаточна для того, чтобы уверенно судить о наличии именно 200-летней периодичности, а не единичного всплеска дисперсии, который привел к наблюдаемому эффекту модуляции амплитуды отфильтрованных сигналов.

На рис. 14, *а* показано расположение континентов в середине эоцена (50 млн лет назад), т.е. во временном интервале произрастания второго изучаемого нами ископаемого хвойного дерева (см. рис. 7, *б*). В это время большой залив, простиравшейся 66 млн лет назад вдоль Скалистых гор, прекратил свое существование, что способствовало уменьшению влажности климата в регионе, хотя средние температуры заметно превышали современные.

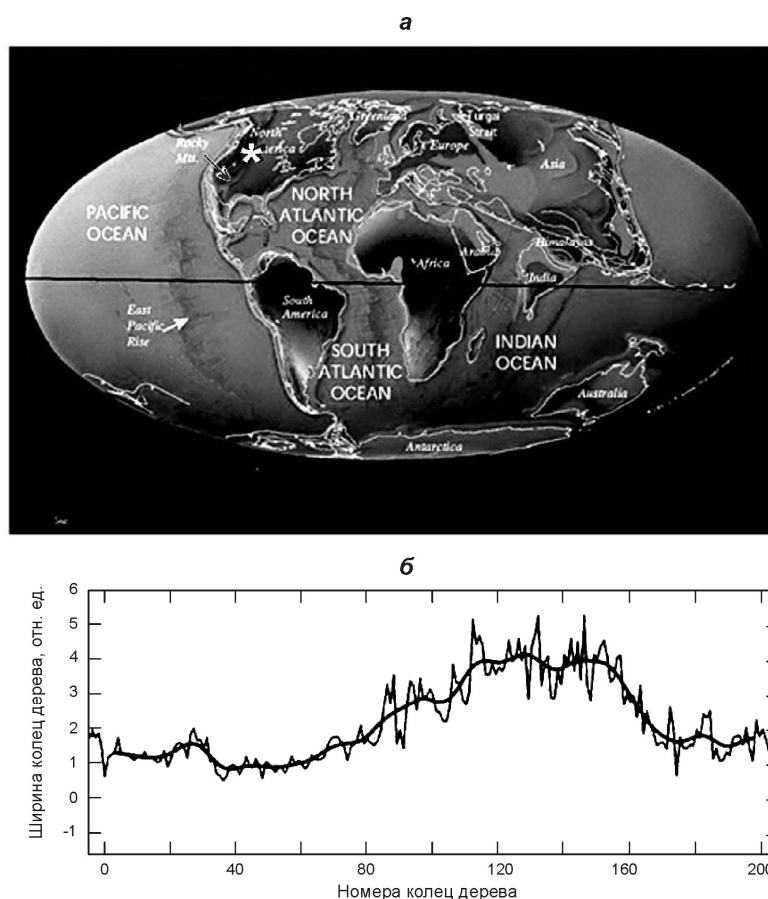


Рис. 14. Расположение континентов в середине эоцена (*а*) и график вариаций ширины колец окаменевшего хвойного дерева (*б*)

Звездочкой на рис. 14, *а* указано местоположение региона, где было найдено окаменевшее хвойное дерево

На рис. 14, б приведен график вариаций ширины колец ископаемого дерева, который содержит данные о ширине 211 колец и построен на основе осреднения двух кривых. К сожалению, из-за особенностей окаменелости (см. рис. 7, б) график не содержит сведений о первых годах радиального прироста дерева.

Так же как и в случае с рассмотренным выше кипарисом, кривая радиального прироста хвойного дерева была подвергнута вейвлет-анализу (базис Морле) и спектральному анализу по выявлению скрытых периодичностей. Результаты вейвлет-анализа в диапазонах периодов 10–200 и 5–50 лет показаны на рис. 15. Установлено, что наиболее интенсивной является периодичность порядка 110–120 лет. Кроме того, существовали периодичности около 30, 20, 17–18, а также около 9 и 7 лет.

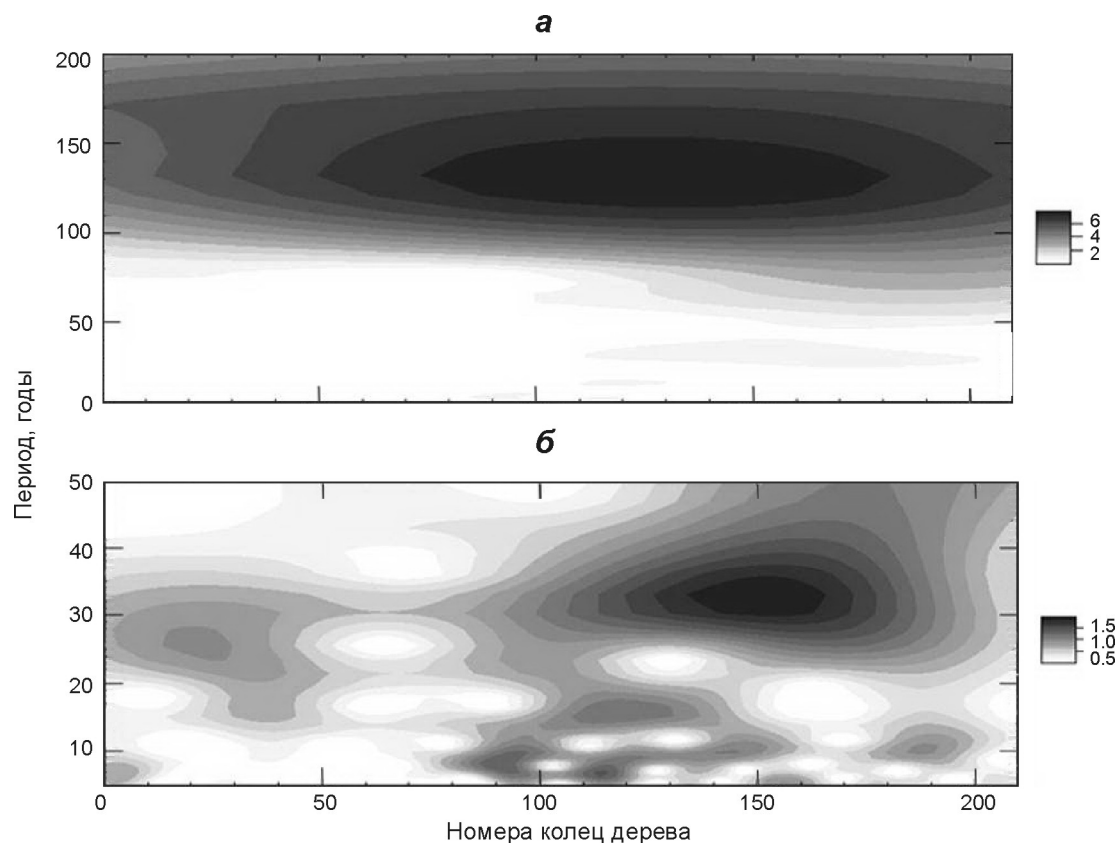


Рис. 15. Результаты вейвлет-анализа (базис Морле) вариаций ширины колец окаменевшего хвойного дерева в диапазоне 10–200 (а) и 5–50 (б) лет

Результаты вейвлет-анализа подтверждаются результатами построения периодограммы, полученной методом выявления скрытых периодичностей (рис. 16). На периодограмме заметно увеличение спектральной плотности сигнала на периодах около 100 лет, что соответствует цикличности Глайсберга. Также следует обратить внимание на существование в периодограмме пика с периодом около 60 лет. Ранее указывалось, что солнечный цикл Глайсберга может расщепляться на две ветви, одна из которых имеет периодичность в 60–70 лет. Значительную амплитуду в периодограмме имеет периодичность Брюкнера (32 года), а также периодичность около 22 лет, которую можно отождествить с воздействием цикла Хейла. В то же время 11-летний цикл, хотя и присутствует на периодограмме, выражен очень слабо, зато обращают на себя внимание четко проявившиеся периодичности около 17, 14, 9, 7 и 5 лет. Периодичности в 17 и 14 лет близки к представленным на рис. 2 периодичностям в 18 и 13 лет, которые

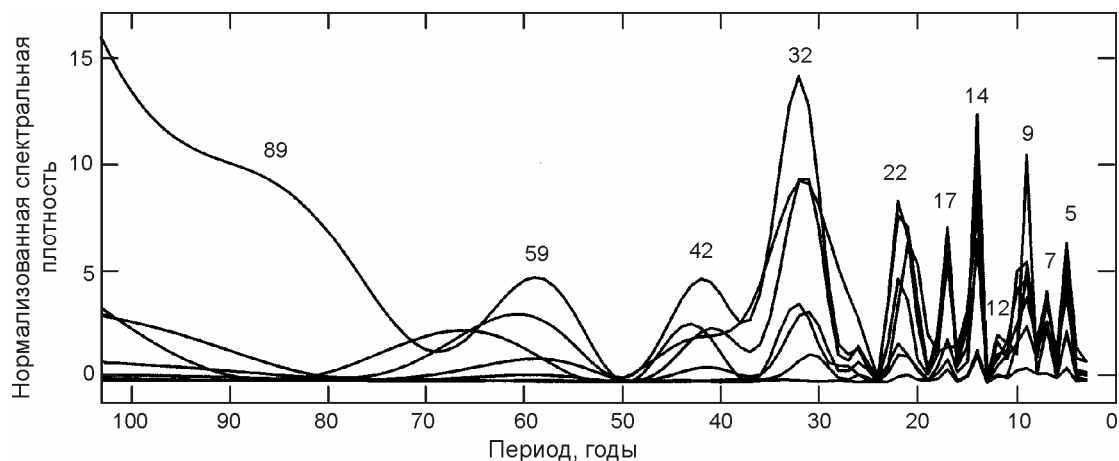


Рис. 16. Периодограмма вариаций ширины колец окаменевшего хвойного дерева, построенная модифицированным методом спектрального анализа, используемого для выявления скрытых периодичностей. Приведены объединенные графики для отфильтрованных кривых с $T_{\Phi} = 7, 13, 19, 29, 37$ и 61 год

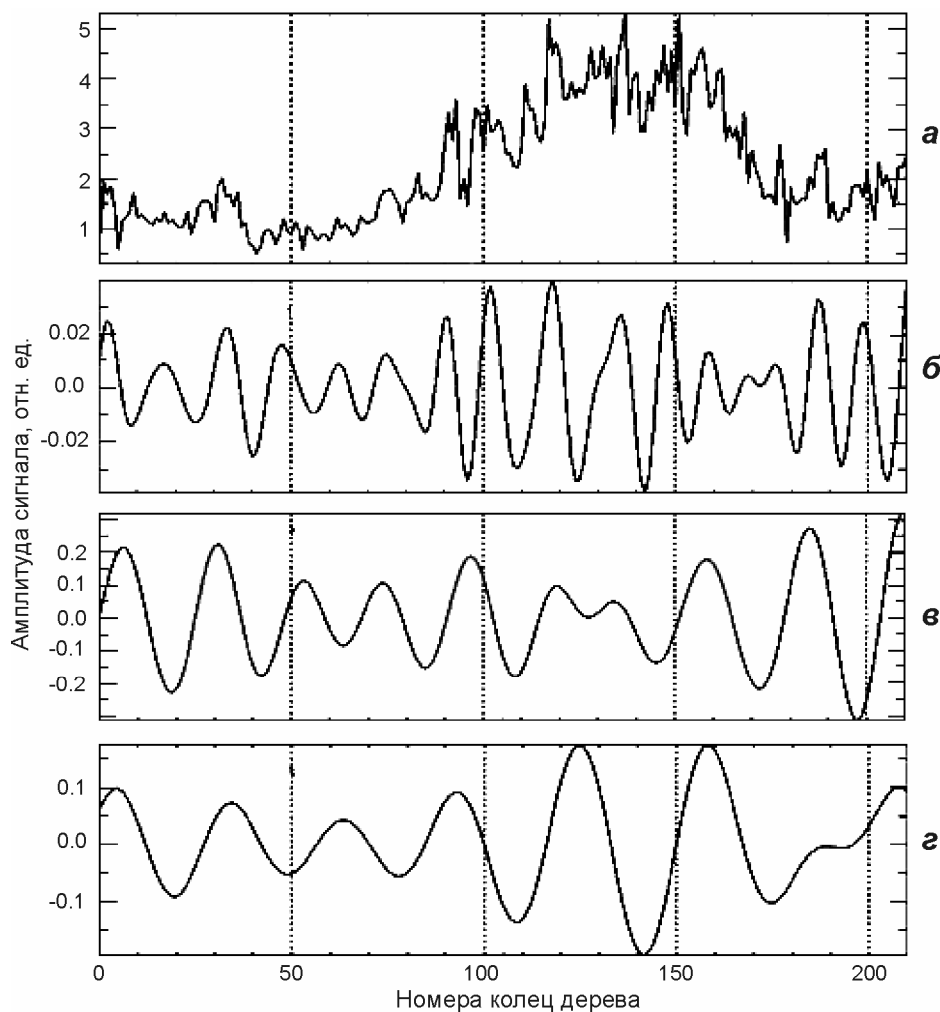


Рис. 17. Исходная кривая изменения ширины колец окаменевшего хвойного дерева (а) и результаты ее фильтрации в диапазонах 10–20 (б), 20–30 (в) и 30–40 (г) лет

проявляются в настоящее время. Ранее указывалось, что эти периодичности могут быть связаны и с внутренними процессами в системе атмосфера–океан.

На рис. 17 приведены результаты фильтрации исходного ряда (см. рис. 17, *а*) вариаций ширины колец окаменевшего хвойного дерева (см. рис. 14, *б*) в диапазонах 30–40, 20–30 и 10–20 лет. На рис. 17, *б–г* прослеживается модуляция величины ширины колец деревьев с периодом 100–105 лет. Этот результат указывает, по нашему мнению, на воздействие долговременной СА на характер протекания климатических процессов в системе атмосфера–океан в целом.

В работе [Распопов и др., 2013] проанализированы результаты спектрального анализа вариаций радиального прироста хвойных деревьев в современную эпоху в северо-восточном регионе России (Республика Коми), а также вариаций температуры в г. Мурманске (Кольский п-ов) и ледового покрова в Баренцевом море. Установлено, что в настоящее время четко прослеживаются климатические вариации с периодами 5, 7–8, 9 лет, а также 13–14 и 17–19 лет. Таким образом, эти данные и результаты настоящей работы свидетельствуют о том, что периодичности, проявляющиеся в современную эпоху, действовали и 45 млн лет назад, несмотря на общую климатическую разницу эпох и изменение конфигурации континентов.

Заключение

Резюмируя, можно сказать следующее.

В прошлом (70–45 млн лет назад) в климатических колебаниях с наибольшей интенсивностью проявлялись квазидвухсотлетняя и квазивековая периодичности. Можно с уверенностью утверждать, что эти климатические осцилляции связаны с воздействием солнечной цикличности Зюсса–де Фриза и Глайсберга на климатические процессы, поскольку климатический отклик на это солнечное воздействие проявляется вне зависимости от конфигурации континентов и, следовательно, от проявления внутренних процессов в системе атмосфера–океан. В спектрах проанализированных палеоклиматических данных проявляются цикличности, характерные для СА и в настоящее время, – это квазидвадцатилетняя и 11-летняя периодичности. Отсюда следует вывод, что анализ климатических периодичностей во временном интервале 70–45 млн лет назад дает информацию о солнечной цикличности, что невозможно установить при исследовании другими методами.

Нужно подчеркнуть, что в климатических колебаниях вне зависимости от условий на земной поверхности проявляется периодичность Брюкнера (около 30 лет) и вариации с периодом в 17–18 лет. По нашему мнению, эти периодичности могут быть связаны с внешним воздействием на систему атмосфера–океан, а не с внутренними процессами в этой системе. Для 17–18-летних колебаний возможным источником является лунное воздействие [Gurrie, 1993; Cook et al., 1997]. Другой интерпретацией генерации этих колебаний, так же как цикла Брюкнера, является их солнечное происхождение: обе цикличности являются первыми комбинационными частотами циклов Глайсберга (80–90 лет) и Хейла (22–23 года) [Распопов и др., 2001].

В климатическом спектре 45 млн лет назад четко прослеживаются периодичности в 5, 7 и 9 лет. Периодичность в 9 лет выявлена и в ископаемой древесине возрастом 68–70 млн лет. Аналогичные периодичности прослеживаются в полярных регионах и в настоящее время. Исследования свидетельствуют, что эти периодичности связаны с внутренними процессами в системе атмосфера–океан. Однако для сопоставления современных климатических условий и климатов в прошлом необходимы дополнитель-

ные исследования. Так, например, 5- и 9-летняя периодичности прослеживаются в настоящее время в вариациях ледового покрова в Баренцевом море. Однако 70–45 млн лет назад климат был значительно теплее, чем сейчас, и, по-видимому, не только, а возможно, и не столько ледовый покров в арктическом регионе формировал эту климатическую периодичность.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Программы № 22 фундаментальных исследований Президиума РАН «Фундаментальные проблемы исследований и освоения Солнечной системы» (грант РФФИ № 13-02-00277). Авторы благодарят сотрудников СПбФ ИЗМИРАН Л.А. Баткову и Е.Э. Благовещенскую за помощь в обработке материалов.

Литература

- Васильев С.С., Дергачев В.А., Распопов О.М. Реконструкция температуры Гренландии за последнее тысячелетие, солнечная активность и Северо-Атлантические осцилляции // Геомагнетизм и аэрономия. 2004. Т. 44, № 1. С. 123–128.
- Дергачев В.А. Концентрация космогенного радиоуглерода в земной атмосфере и солнечная активность в течение последних тысячелетий // Геомагнетизм и аэрономия. 1996. Т. 36, № 2. С. 49–60.
- Дергачев В.А. Воздействие солнечной активности на климат // Изв. РАН. Сер. физич. 2006. Т. 70, № 10. С. 1544–1548.
- Дергачев В.А., Распопов О.М. Долговременная солнечная активность – контролирующий фактор глобального потепления 20-го века // Солнечно-земная физика. 2008. Вып. 12, Т. 2. С. 272–275.
- Дергачев В.А., Чистяков В.Ф. 210- и 2400-летние солнечные циклы и колебания климата // Солнечный цикл. СПб.: ФТИ, 1993. С. 112–130.
- Дергачев В.А., Картавых Ю.Ю., Огурцов М.Г., Распопов О.М. Дендроиндикация воздействия солнечной активности на климат в последнем тысячелетии // Изв. РАН. Сер. географ. 2007. № 3 (май–июнь). С. 107–114.
- Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1972. 288 с.
- Короновский Н.В., Хаин В.Е., Ясаматов Н.А. Историческая геология. М.: Академия, 2006. 464 с.
- Костин С.Н. Связь колебаний прироста деревьев с солнечной активностью // Лесн. хозяйство. 1965. № 4. С. 12–14.
- Ловелиус Н.В. Изменчивость прироста деревьев: Дендроиндикация природных процессов и антропогенных воздействий. Л.: Наука, 1979. 230 с.
- Мазепа В.С. Использование спектрального представления и линейной фильтрации стационарных последовательностей при анализе цикличности в дендрохронологических рядах // Дендрохронология и дендроклиматология. Новосибирск: Наука, 1986. С. 49–68.
- Распопов О.М., Шумилов О.И., Касаткина Е.А., Турунен У., Линдхолм М., Колстрем Т. Нелинейный характер воздействия солнечной активности на климатические процессы // Геомагнетизм и аэрономия. 2001. Т. 41, № 4. С. 407–412.
- Распопов О.М., Дергачев В.А., Колстрем Т. Вариации космических лучей и климатические изменения в высоких широтах в последние 500 лет // Изв. РАН. Сер. физич. 2005. Т. 69 (6). С. 893–895.
- Распопов О.М., Лопатин Е.В., Колстрем Т., Дергачев В.А., Дмитриев П.Б., Кале Х.-П., Спиекер Х. Пространственная структура периодичности радиального прироста хвойных деревьев на территории Республики Коми // Геофизические процессы и биосфера. 2013. Т. 12, № 1. С. 44–61.

- Серебрянников М.Г., Первозванский А.А. Выявление скрытых периодичностей. М.: Наука, 1965. 244 с.
- Шведов Ф.Н. Дерево как летопись засух // Метеорологический вестник. 1892. № 5.
- Шиятов С.Г. Верхняя граница леса на Полярном Урале и ее динамика в связи с изменением климата // Доклады Первой научной конференции молодых специалистов-биологов. Свердловск, 1962. С. 37–48.
- Шиятов С.Г. Сверхвековой цикл в колебаниях индекса прироста лиственницы (*Larix sibirica*) на полярной границе леса // Биоэкологические основы дендрохронологии. Вильнюс; Л., 1975. С. 47–53.
- Ясаматов Н.А. Древние климаты Земли. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 295 с.
- Alavi A.S., Jenkins G.M. An example of digital filtering // Appl. Statist. 1965. V. 14. P. 70–74.
- Cook E.R., Meko D.M., Stockton C.W. A new assessment of possible solar and lunar forcing of the bidecadal drought rhythm in the western United States // J. Climate. 1997. V. 10. P. 1343–1356.
- Crowley T.J., North G.R. Paleoclimatology. N.Y.: Oxford University Press, 1991. 349 p.
- Currie R.G. Lunar-solar 18.6- and solar 10–11-year signals in USA air temperature record // Int. J. of Climatology. 1993. V. 13. P. 31–50.
- Göthan W. Die fossilen Hölzer von König Karls Land. // Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens Handlingar. 1907. Bd. 42, N 10. P. 1–44.
- Göthan W. Die Frage der Klimadifferenzierung im Jura und der Kreideformation im Lichte paläobotanischer Tatsachen // Jahrbuch der Königlich Preussischen Geologischen Landesanstalt zu Berlin für das Jahr. 1908. Berlin, 1912. Bd. XXIX, Tl. II. P. 220–242.
- Grüdd H. Torneträsk tree-ring width and density AD 500–2004: A test of climate sensitivity and a new 1500-year reconstruction of north Fennoscandian summers // Climate Dynamics. 2008. V. 31. P. 843–857.
- Douglas A.E. Climatic cycles and tree growth: A study of the annual rings of trees in relation to climate and solar activity. Washington: Carnegie Inst., 1919. V. 1. 127 p.; 1928. V. 2. 166 p.; 1936. V. 3. 171 p.
- Jouzel J., Alley R.V., Cuffey K.M., Dansgaard W., Grootes P., Hoffman G., Johnsen S.J., Koster R.D., Peel D., Shuman C.A., Stievenard M., Stuiver M., White J. Validity of the temperature reconstruction from water isotopes in ice cores // JGR. 1997. V. 102, N C12. P. 26471–26487.
- Hoyt D.V., Schatten R.H. The role of the Sun in climate change. N.Y.: Oxford University Press, 1997. 279 p.
- Keller G., Adatte T., Stinnesbeck W., Stüben D., Berner Z., Kramar U., Harting M. More evidence that the Chicxulub impact predates the K/T mass extinction // Meteoritics and Planet. Sci. 2004. V. 39, N 7. P. 1127–1144.
- Neff U., Burns S.J., Mangini A., Mudelsee M., Fleitmann D., Matter A. Strong coherence between solar variability and the monsoon in Oman between 9 and 6 kyr ago // Nature. 2001. V. 411. P. 290–293.
- Olsen J. Stable isotope mass spectrometry and AMS dating applied to a multi-proxy climate record from the Bliden Lake, Denmark: Ph. d. thesis. University of Aarhus, Department of Physics and Astronomy AMS ¹⁴C Dating Centre, 2007.
- Ogurtsov M.G., Kocharov G.E., Lindholm M., Meriläinen J., Eronen M., Nagovitsyn Yu.A. Evidence of solar variations in tree-ring based climate reconstruction // Solar Physics. 2002. V. 205. P. 403–417.
- Peristykh A.N., Damon P.E. Modulation of atmospheric ¹⁴C concentration by the solar wind and irradiance components of the Hale and Schwabe solar cycles // Solar Physics. 1998. V. 177. P. 343–355.
- Raspopov O.M., Dergachev V.A., Kolström T. Hale cyclicity of solar activity and its relation to climate variability // Solar Physics. 2004a. V. 224. P. 455–463.
- Raspopov O.M., Dergachev V.A., Kolström T. Periodicity of climate conditions and solar variability derived from dendrochronological and other palaeo climatic data in high latitudes // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 2004b. V. 208. P. 127–139.

- Raspopov O.M., Dergachev V.A., Kuzmin A.V., Kozyreva O.V., Ogurtsov M.G., Kolström T., Lopatin E. Regional tropospheric responses to long-term solar activity variations // *Advances in Space Res.* 2007. V. 40. P. 1167–1172.
- Raspopov O.M., Dergachev V.A., Esper J., Kozyreva O.V., Frank D., Ogurtsov M.G., Kolström T., Shao X. The influence of the de Vries (~ 200-year) solar cycle on climate variability: Result from the Central Asian Mountains and their global link // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2008. V. 259. P. 6–10.
- Roig F.A., Le Quesne C., Boninsegna J.A., Briffa K.R., Lara A., Grudd H., Jones Ph., Villagran G. Climate variability 50 000 years ago in mid-latitude Chile as reconstructed from tree rings // *Nature*. 2001. V. 410. P. 567–570.
- Russell D.A. The enigma of the extinction of the dinosaurs // *Ann. Rev. Earth Plan. Sci.* 1979. V. 7. P. 163–182.
- Russell D.A. The mass extinctions of the Late Mesozoic // *Sci. Amer.* 1982. V. 246. P. 48–55.
- Schwarbach M. Das Klima der Vorzeit. Stuttgart, 1950. (Рус. изд.: Шварцбах М. Климаты прошлого. М.: Изд-во иностр. лит., 1955. 383 с.).
- Scotese C.R. Atlas of Earth history. Arlington, Texas: PALEOMAP Project, 2001. 52 p.
- Sonett C.P., Suess H.E. Correlation of bristlecone pine ring widths with atmospheric carbon-14 variations: A climate-sun relation // *Nature*. 1984. V. 308. P. 141–143.
- Tynell D. Did a comet swarm kill the dinosaurs? // *Sky and Telescope*. 2004. May 14.
- Stuiver M., van der Plicht J. (eds). INTCALIB98: Calibration is. // *Radiocarbon*. 1998. V. 40, N 3. P. 1041–1164.
- Usoskin I., Solanki S.K., Schüssler M., Mursula K., Alanko K. Millennium-scale sunspot number reconstruction: Evidence for an unusually active Sun since the 1940s. // *Phys. Rev. Lett.* 2003. V. 91, N 21. P. 211101 (1–4).
- Vasiliev S.S., Dergachev V.A. The ~2400-year cycle in atmospheric radiocarbon concentration: bispectrum of ^{14}C data over the last 8000 years // *Ann. Geoph.* 2002. V. 20. P. 115–120.
- Wagner G., Beer J., Masarik J., Muscheler R., Kubik P.W., Mende W., Laj C., Raisbek G.M., Yiou F. Presence of the solar de Vries cycle (~205 years) during the last ice age // *Geophys. Res. Lett.* 2001. V. 28(2). P. 303–306.
- Zachos J., Pagani M., Sloan L., Thomas E., Billups K. Trends, rhythms and aberrations in global climate 65 Ma to Present // *Science*. 2001. V. 292 (5517). P. 686–693. doi:10.1126/science.1059412.

Сведения об авторах

РАСПОПОВ Олег Михайлович – доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, главный научный сотрудник, Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН. 191023, г. Санкт-Петербург, Мучной пер., д. 2. Тел.: +7 (812) 552-85-00. E-mail: oleg@or6074.spb.edu

ДЕРГАЧЕВ Валентин Андреевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН. 194021, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 26. Тел.: +7 (812) 297-79-28. E-mail: v.dergachev@mail.ioffe.ru

ДМИТРИЕВ Павел Борисович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН. 194021, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 26. E-mail: Paul.D@mail.ioffe.ru

КОЗЫРЕВА Ольга Васильевна – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, г. Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10. E-mail: kozyreva@ifz.ru

MANIFESTATION OF SOLAR ACTIVITY VARIATIONS 70–45 million years ago

O.M. Raspopov¹, V.A. Dergachev², P.B. Dmitriev², O.V. Kozyreva³

¹ St.-Petersburg Filial of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radiowave Propagation, Russian Academy of Sciences, St.-Petersburg, Russia

² Ioffe Physical-Technical Institute, Russian Academy of Sciences, St.-Petersburg, Russia

³ Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. Unique palaeoclimatic data (ring widths of fossil trees) with a temporal resolution of 1 year are analyzed with the aim of revealing periodicities in climatic processes during the time interval 70–45 million years ago. The periodicities thus obtained are compared with the solar and climatic periodicities observed at present. It is shown that in the past (70–45 million years ago) quasi-two-hundred-year and quasi-secular periodicities in climatic oscillations that can be attributed to the influence of solar Suess–deVries and Gleissberg cycles manifest themselves in the most intense manner. The spectra of the palaeoclimatic data analyzed exhibit the periodicities typical of solar activity, i.e., the quasi-20-year (the Hale cycle) and 11-year (Schwabe cycle) ones derived from the instrumental data and historical observations of sunspots. It can be concluded, that obtained by paleodendrochronology climatic periodicities for the time interval 70–45 million years ago give information on the solar cyclicity, which cannot be achieved by other methods. Note that these periodicities are similar to the modern solar activity periodicity.

Keywords: variations of solar activity, climate changes, climate of the Earth.