

УДК 551.583.7

СВИДЕТЕЛЬСТВО ВНУТРЕННЕЙ УПОРЯДОЧЕННОСТИ КОЛЕБАНИЙ КЛИМАТА В ГОЛОЦЕНЕ

© 2003 г. Н. В. Вакуленко, академик А. С. Монин, Д. М. Сонечкин

Поступило 22.02.2002 г.

Мы анализируем дендроклиматический ряд “Тропа Мафусаила”, характеризующий изменения климата начиная с 6000 лет д. н. э. до 1980-х годов XX века (период среднего и позднего голоцена). В противоположность еще недавно бытовавшим представлениям о его большой стабильности климат голоцена, оказывается, был изменчивым в очень широком диапазоне временных масштабов. Удастся выделить почти регулярные и взаимосвязанные его колебания с периодами около 70, 170, 370 и 800 лет. Особенно мощно и регулярно колебание с периодом около 1600 лет, модулирующее прочие указанные колебания. Последний по времени цикл 1600-летнего колебания начинается с так называемого средневекового теплого периода (VII–XIII века), включает хорошо известный малый ледниковый период (XIV–XIX века) и завершается современным глобальным потеплением. Есть определенное сходство этого цикла с циклом, продолжавшимся примерно с 4000-х по 2400-е годы д. н. э. в среднем голоцене, называемом иногда временем климатического оптимума.

Дендрохронология “Тропа Мафусаила” построена американским палеоклиматологом Д. Грейбиллом [9] по срезам остистых сосен из Калифорнии. Значения этого ряда представляют собой толщины годовых приростов сосен, из которых вычтена величина, характеризующая средний прирост деревьев данного вида в зависимости от возраста. Эта процедура называется в дендроклиматологии стандартизацией. Рост сосен зависел от климатических условий – не только от температуры воздуха, но и от осадков, особенно в период вегетации. На него влияли также многие локальные неклиматические факторы. Поэтому этот ряд, как и все другие дендрохронологии, нельзя рассматривать как ряд абсолютно калиброванных температур или осадков даже в локальном плане. Так, недавно было показано [5], что стандартизация может приводить к сильному сглаживанию

столетних и более долгопериодных климатических колебаний. Принято все же считать, что ряды дендроклиматических индексов могут дать представление об относительных изменениях климата (теплый и влажный или холодный и сухой) не только для района произрастания деревьев, но и в больших пространственных масштабах. Поскольку при скейлинговом анализе пространственно-временных вариаций приземной температуры воздуха было показано [10, 12], что в рядах даже инструментальных измерений температуры сигнал глобальных изменений доминирует над локальными сигналами только начиная с масштаба 400–500 лет, эти представления могут относиться только к очень большим временным масштабам. Именно такая информация является наиболее ценной при изучении современного глобального потепления в контексте естественных вариаций палеоклиматов. По этой причине дендрохронологии были использованы во всех построенных к настоящему времени реконструкциях тысячелетнего хода средней температуры воздуха северного полушария, а самая последняя такая реконструкция [7] построена исключительно на них. Причина в том, что все другие косвенные оценки хода палеотемператур воздуха еще более сложны в интерпретации.

Дендрохронология “Тропа Мафусаила” является самой длинной и потому особенно ценна как индикатор глобальных колебаний климата в голоцене. Ее репрезентативность видна из рис. 1, где этот ряд показан одновременно с почти столь же длинным дендроклиматическим рядом “Хозяин Белых гор” из соседнего района Калифорнии (расстояние между районами всего две минуты широты, авторы С. Фергесон и др. [9]) и рядом абсолютно калиброванных температур, построенным по данным о содержании дейтерия-18 в донных отложениях оз. Тингстедетреск (шведский о. Готланд) [11]. Поскольку озерный ряд имеет очень низкое временное разрешение, а главное, учитывая выше сказанное о доминировании крупномасштабного сигнала только в очень долгопериодных колебаниях локальных температур, все три сравниваемых ряда показаны после их 500-летнего скользящего сглаживания. Отметим,

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова
Российской Академии наук, Москва*

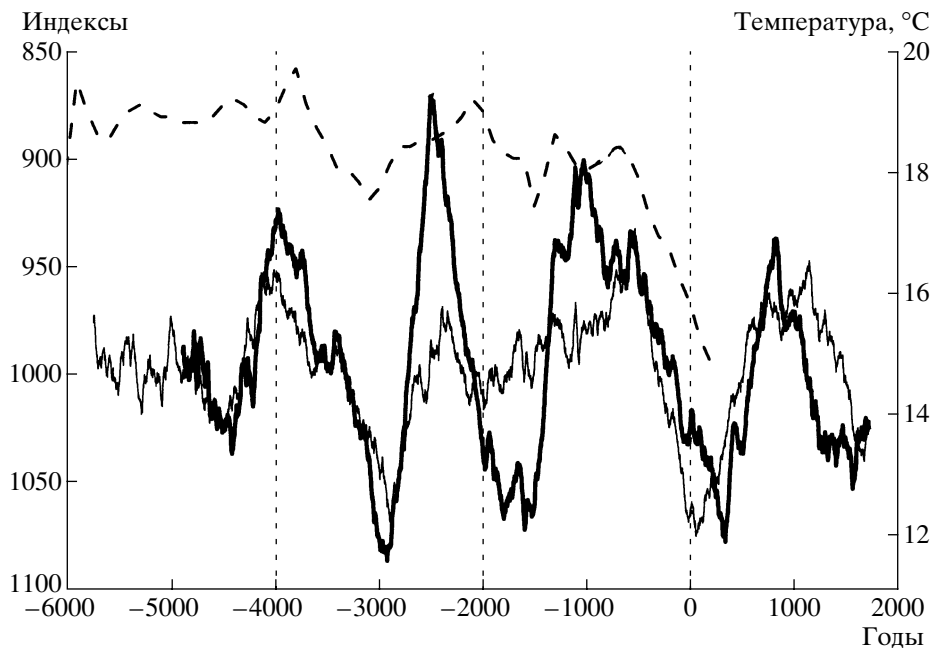


Рис. 1. Дендроклиматические ряды “Тропа Мафусаила” (тонкая сплошная линия) и “Хозяин Белых гор” (жирная сплошная линия), построенные по срезам остистых сосен из Калифорнии [9], показанные после их 500-летнего скользящего осреднения, и ряд абсолютно калиброванных температур (штриховая линия), построенный по донным отложениям в оз. Тингстедетреск (о. Готланд, Швеция) [11].

что коэффициент корреляции между синхронными величинами индексов несглаженных дендроклиматических рядов равен 0.85, т.е. эти ряды довольно похожи. Рисунок 1 подтверждает это сходство в том, что касается масштабов столетий и тысячелетий. Исключением является временной интервал от 2500 до 500 лет д. н. э., где эти ряды имеют сходство только в высокочастотных деталях. Это, вероятно, вызвано различиями в технике построения дендрохронологий авторами сравниваемых рядов и представительности использованных ими исходных данных (числа и возраста древесных срезов), наиболее различающихся именно в этом конкретном временном периоде. Важно, что в обеих, географически очень близких, дендрохронологиях и в ряду озерных отложений из противоположной половины северного полушария видно почти синхронное колебание с периодом 1500–2000 лет. Сравнить амплитуду этого колебания в дендрохронологиях и в ряду Готланда нельзя из-за вышесказанного о качественном характере связей дендроклиматических индексов с температурой воздуха, но само наличие и синхронность этого колебания во всех трех рядах свидетельствуют о его глобальности. Отметим еще различие в трендах между рядом Готланда и дендрохронологиями. В ряду Готланда видно понижение температуры на 2–3°C от начала голоцена к нашей эре, что подтверждается многими другими палеоклиматическими данными. Дендроклиматические же ряды не содержат никакого

тренда, что обусловлено, вероятно, их стандартизацией. Представляется все же возможным рассматривать ряд “Тропа Мафусаила” как индикатор долгопериодных глобальных колебаний климата в голоцене. Недаром этот ряд использован в новейшей реконструкции тысячелетнего хода средней температуры воздуха северного полушария [7] наряду с 13 другими столь же длинными дендрохронологиями, которые, к сожалению, нам недоступны.

Обе дендрохронологии уже были подвергнуты спектральному анализу в [3], показавшему, что их фурье-спектры в очень широком диапазоне масштабов следуют закону $-1/3$ (тип фликер-шума, хорошо известного в радиофизике) и имеют нечетко выраженные пики спектральной плотности, которые трудно отнести к каким-либо известным источникам внешнего форсирования климата. Здесь мы хотим рассмотреть колебания в дендрохронологии “Тропа Мафусаила” как с точки зрения их спектрального состава, так и с точки зрения временной локализации отдельных циклов колебаний. Для этого хорошо подходит популярная сейчас в самых разных приложениях техника вейвлетного преобразования (ВП) временных рядов

$$W(b, a) = a^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} T(t) G\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (1)$$

$$a > 0, \quad b > 0,$$

где $T(t)$ – преобразуемый ряд, $G\left(\frac{t-b}{a}\right)$, $a > 0$, $b > 0$, – семейство функций, получаемых всевозможными сдвигами (b) и перемасштабированиями (a) из единственной “материнской” вейвлетной функции $G(t)$. “Материнская” функция обязана быть квадратично интегрируемой,

$$\int_{-\infty}^{\infty} (G(t))^2 dt < \infty, \quad (2)$$

и ее первый или даже несколько первых моментов должны быть нулевыми:

$$\int_{-\infty}^{\infty} t^r G(t) dt = 0, \quad R \geq r \geq 1. \quad (3)$$

Поэтому, в отличие от преобразования Фурье (ФП), ВП не чувствительно к постоянной составляющей, а в случае равенства нулю моментов второго (или даже более высокого) порядка не чувствительно также к линейным (квадратичным и т.д.) трендам ряда. Из-за этих свойств ВП удобно для анализа нестационарных рядов. Автомодельность семейства вейвлетных функций позволяет изучать свойства внутреннего самоподобия колебаний в преобразуемом ряду. Строго говоря, оба эти достоинства существуют только у ВП рядов бесконечной длительности, так как условие (3) нарушается при ВП реальных конечных рядов, почему значения ВП для начала и конца ряда искажаются трендами. Это будет видно ниже при анализе результатов ВП ряда “Тропа Мафусаила”. Мы использовали две разные “материнские” вейвлетные функции: широкоизвестную функцию Морле

$$G\left(\frac{t-b}{a}\right) = \exp(iCt) \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right)$$

с частотной характеристикой $C = 2\pi$, при которой масштаб ВП почти точно эквивалентен масштабу преобразуемого ряда, и так называемую [6] двугорбую вейвлетную функцию

$$G\left(\frac{t-b}{a}\right) = (\exp(iC_1t) + \exp(iC_2t)) \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right),$$

равную сумме двух функций Морле с разными частотными характеристиками ($C_1 = 2\pi$ и $C_2 = 2\pi M$).

Если с использованием функции Морле преобразуется ряд, представляющий собой простое гармоническое колебание, то в картине амплитуд ВП $|W(b, a)|$ на полуплоскости (время b , масштаб a) появляются полосы постоянной амплитуды ($|W(b, a)| = \text{const}$) вдоль линий постоянной масштаба ($a = \text{const}$). Максимальна амплитуда полосы в масштабе, равном периоду преобразуемой гармоники. Амплитуда прогрессивно убывает в

полосах, соответствующих большему и меньшему масштабам. Фаза гармонического колебания преобразуется в линейно растущую со временем фа-

зу ВП $\left(\arctg \frac{\text{Re } W(b, a)}{\text{Im } W(b, a)}\right)$. Скорость роста обратно

пропорциональна периоду гармоники. Если преобразуемый ряд есть сумма гармоник, то амплитуды и фазы ВП для каждого масштаба ВП равны взвешенным суммам амплитуд и фаз ВП всех гармоник, периоды которых близки к этому масштабу. Осреднение по времени квадратов амплитуд ВП дает сглаженную оценку энергетического спектра ряда. Если одна из гармоник имеет наибольшую амплитуду (ей соответствует пик в энергетическом спектре), то ее период может быть оценен по двум признакам: во-первых, по масштабу полосы повышенной амплитуды в картине амплитуд ВП; во-вторых, по скорости роста фазы ВП внутри этой полосы. Скорость роста фазы ВП будет заниженной для немного меньших масштабов и завышенной для больших масштабов. Удобно заранее выгнать из значений всех фаз ВП величины, соответствующие специфическому для каждого масштаба росту фазы. Тогда масштаб максимальной гармоники будет виден по смене полосы отрицательного прироста фазы ВП на полосу положительного ее прироста при рассмотрении картины фаз ВП от малых масштабов к большим. Поэтому ВП – более надежное средство выявления спектральных пиков, чем ФП, хотя оно и уступает ему по разрешающей способности спектрального анализа. Если у гармоники преобразуемого ряда амплитуда модулирована (АМ), то амплитуда ВП в соответствующей полосе осциллирует с периодом модуляции, то же относится к полосам изменения фазы ВП. При частотной модуляции (ЧМ) полоса повышенной амплитуды ВП тоже осциллирует, но уже за счет поочередных смещений этой полосы в большие и меньшие масштабы. В возможности обнаруживать АМ и ЧМ состоит второе положительное отличие ВП от ФП. На практике различить АМ и ЧМ, пользуясь функцией Морле, довольно трудно. Лучше подходит для этого двугорбая вейвлетная функция, дающая к тому же возможность обнаруживать синхронизацию разных гармоник ряда. Когда эта функция используется для математического анализа музыки и речи [6], чтобы выделять музыкальные аккорды, то берется $M = 2.00$ (октава западной музыки). Картина амплитуд ВП гармонического колебания при использовании двугорбой функции такая же, как и получающаяся при ВП с функцией Морле ряда, состоящего из двух гармоник. Но если периоды этих гармоник различаются в M раз, то амплитуда ВП резко возрастает, когда гармоники находятся в фазе или противофазе. По этому признаку можно распознать “аккорд” синхронных

колебаний нескольких гармоник. Характер изменения во времени фазы ВП с двугорбой функцией не зависит от масштаба и потому неинформативен. Как подчеркнули сами разработчики [6], распознавание “аккордов”, скорее, качественное, чем количественное. Никаких тестов для оценки статистической значимости такого распознавания еще нет.

На рис. 2 даны результаты ВП с функцией Морле ряда “Тропа Мафусаила”: рис. 2а – сам ряд (при 40-летнем скользящем сглаживании для лучшего визуального восприятия); рис. 2б – картина амплитуд его ВП с зачернением областей больших значений, тем большим, чем больше амплитуда; рис. 2в – вейвлетный спектр ряда в диапазоне масштабов от ~20 до ~1260 лет. Снизу (для масштабов более 1260 лет) и с боков (рис. 2б) видна сильно зачерненная область очень больших амплитуд ВП, возникшая из-за упомянутых краевых искажений. Внутри неискаженной области выделяется последовательность из 5 зачерненных областей (амплитуды ВП более 10) в горизонтальной полосе между масштабами 112 и 224 года (средний масштаб около 170 лет). Самая первая область относится к моменту времени около 5500 лет д. н. э., самая недавняя – 500–1000 годы н. э. Все расстояния между соседними областями примерно одинаковы (около 1600 лет). Из-за довольно строгой приуроченности всех областей к масштабам между 112 и 224 годами этой полосе соответствует пик в вейвлетном спектре (показан жирной линией на рис. 2в). Другой столь же мощный пик виден в этом спектре на масштабе 896 лет и еще два более слабых пика на масштабах около 448 лет и между 56 и 112 годами (средний масштаб 80 лет). Для сравнения на рис. 2в показан также (со сдвигом по размаху спектральной плотности, чтобы избежать перекрытия графиков спектров) обычный фурье-спектр ряда. Всем пикам вейвлетного спектра неплохо соответствуют группы пиков в фурье-спектре, так что оба спектра друг другу не противоречат, хотя фурье-спектр выглядит очень изрезанным, а вейвлетный спектр очень сглаженным. В [3] уже было показано, что ряд “Тропа Мафусаила” очень близок к белому шуму и все его пики находятся на пределе статистической значимости. Что же касается вейвлетного спектра этого ряда, то при оценке по методике [14] его четыре указанных выше пика являются значимыми. Из картины амплитуд ВП (рис. 2б) видно, что эти пики вейвлетного спектра (пик масштаба 896 лет, возможно, является исключением) суть следствие редких, но значительных временных увеличений амплитуд соответствующих гармоник (периодов около 80, 170 и 448 лет). В остальное время эти гармоники не выделяются своими амплитудами из гармоник близких периодов. Таким образом, существует АМ дендроклиматических колеба-

ний. Многочисленность пиков фурье-спектра как раз и проистекает из факта АМ. АМ каждой несущей частоты соответствуют по крайней мере две гармоники в фурье-спектре на сумме и разности этой несущей и модулирующей частот. Поскольку все несущие частоты на порядок больше одинаковой для всех модулирующей частоты в 1600 обратных лет, наиболее мощный пик в фурье-спектре получается примерно на частоте модуляции. Период этого пика выходит за пределы диапазона масштабов, в котором возможно ВП, поэтому сам этот фурье-пик не показан на рис. 2в. Статистическая достоверность его сомнительна (рассматриваемая дендрохронология слишком коротка в масштабе тысячелетий).

Чтобы доказать существование амплитудной модуляции столетних колебаний в анализируемом ряду, рассмотрим срез картины амплитуд ВП по масштабу 170 лет – центральному для отмеченной последовательности областей особо больших амплитуд ВП. Амплитуда ВП на этом срезе четырежды резко увеличивается (в три раза выше среднего ее уровня) и столь же резко спадает. Пятое такое возрастание, различимое на двумерной картине рис. 2б, здесь маскируется краевыми искажениями. Эти возрастания амплитуд почти эквидистантны и совпадают по времени с моментами максимального потепления климата, визуально различимыми в самом сглаженном ряду. При расчете фурье-спектра данного среза получается пик на частоте около 1600 обратных лет, значимый на 95%-ном уровне. Таким образом, с помощью ВП удается даже формально статистически доказать существование 1500-летнего цикла в голоцене, чего не удалось западным климатологам, рассчитывавшим только фурье-спектры исходных палеоклиматических рядов.

Анализ картины фаз ВП с функцией Морле подтверждает вывод об АМ столетних дендроклиматических колебаний. В этой картине, которую мы здесь не приводим, есть также некоторые нечеткие признаки ЧМ, но гораздо больше информации дает в этом последнем отношении картина амплитуд ВП с двугорбой вейвлетной функцией. Рисунок 3б показывает эту картину при отношении частотных характеристик двугорбой функции $M = 2.19$, когда пики вейвлетного спектра (рис. 3в) наиболее четкие. Средние периоды этих пиков приходятся на масштабы около 70, 170, 370 и 800 лет. Любопытно, что длина “октавы” 2.19 больше, чем принятая в западной музыке. Она больше длины от “до” и “до диез” и меньше длины от “до” до “ре” следующей музыкальной октавы, т.е. диссонансная в музыкальной терминологии и соответствует иррациональному отношению периодов рассматриваемых колебаний. Признаком ЧМ столетних дендроклиматических колебаний на рис. 3б являются осцилляции зачерненных областей больших амплитуд ВП

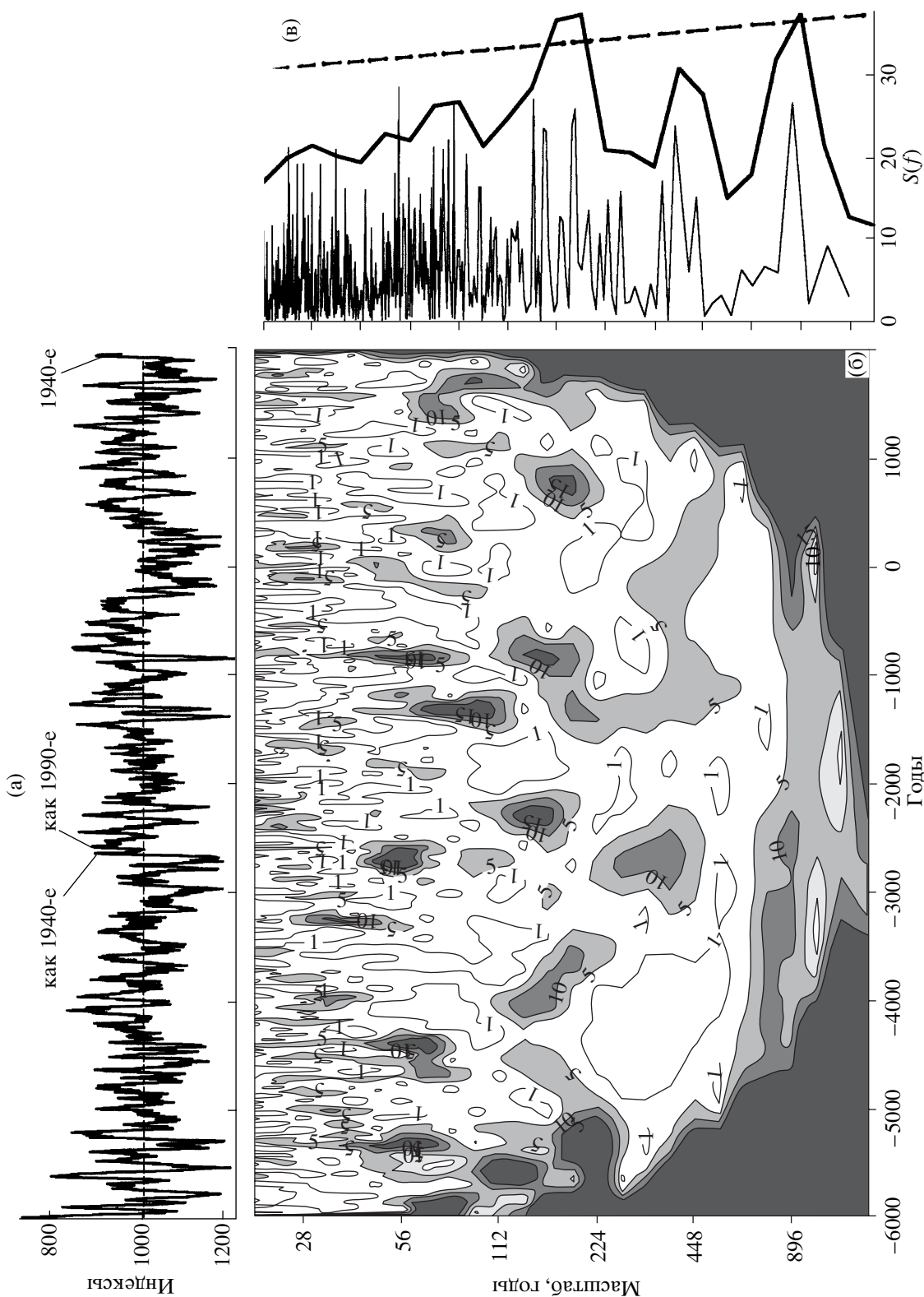


Рис. 2. Результаты ВП ряда дендроклиматических индексов "Тропа Мафусаила", характеризующих изменения климата Калифорнии, начиная с 6000-го г. д. н. э. и до 1980-х годов. а – преобразуемый ряд после его 40-летнего скользящего осреднения; резкое потепление 1940-х годов и аналогичные потепления 1940-х и 1990-х годов указаны стрелками. б – картина амплитуд ВП с использованием вейвлетной функции Морле; области больших амплитуд зачернены; сильно зачерненная область снизу и с боков отмечает, где результаты ВП искажены за счет конечности преобразуемого ряда. в – вейвлетный спектр (относительно жирная и гладкая линия), полученный путем суммирования по времени квадратов амплитуд ВП в полосах постоянного масштаба, с наложенным на него фурье-спектром (тонкая и сильно ломаная линия). Штриховая линия указывает 90%-ный доверительный уровень вейвлетного спектра.

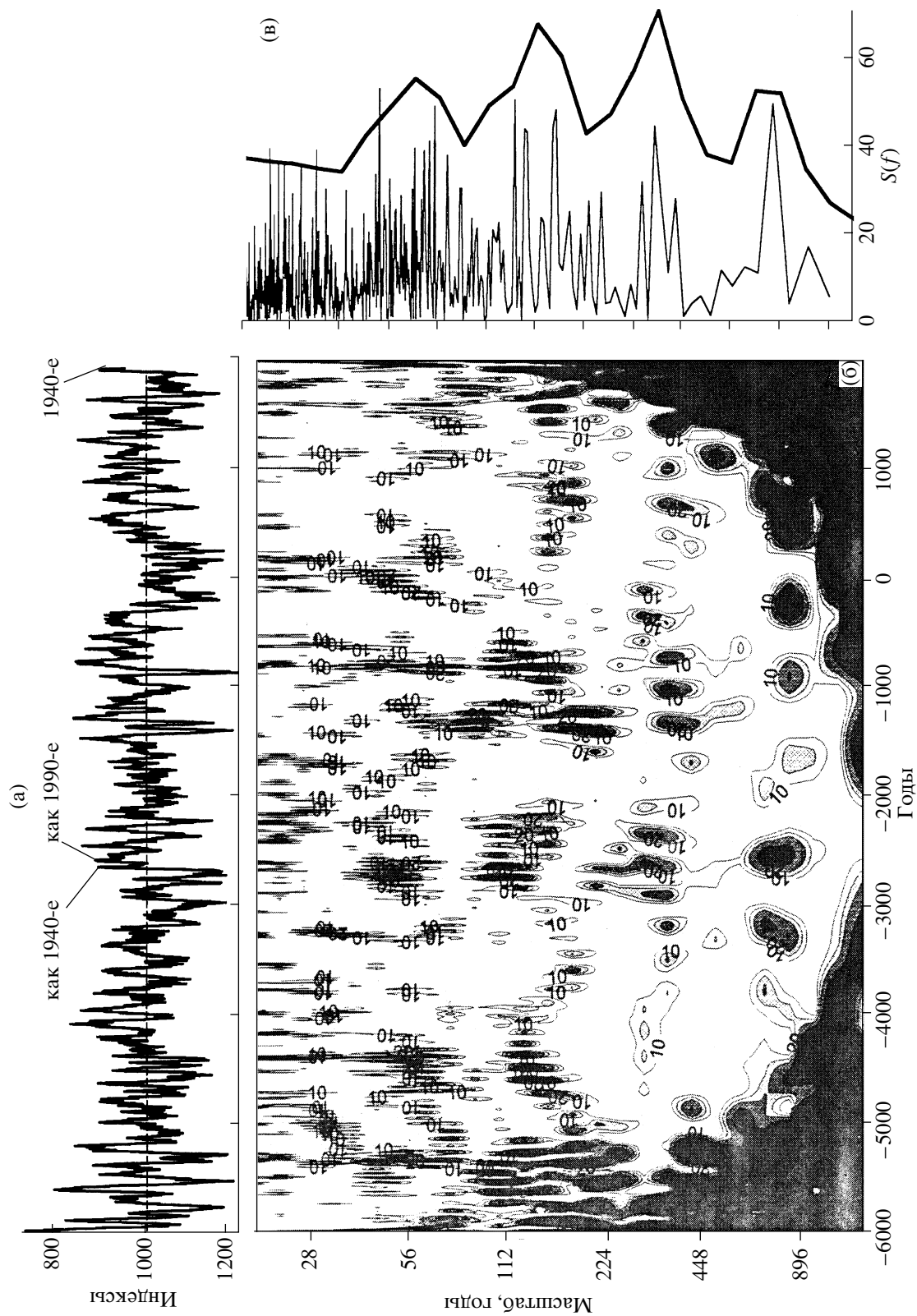


Рис. 3. То же, что на рис. 2, но с использованием двугорбой вейвлетной функции при отношении ее частотных характеристик 2.19, когда пики вейвлетного спектра наиболее четкие. Парные отношения масштабов ВП, соответствующие центрам пиков, равны 2.19.

в довольно широком диапазоне масштабов. Эти области отмечают моменты времени, когда колебания гармоник, относящихся к соседним парам пиков вейвлетного спектра, находятся в фазе или противофазе. ЧМ, как и ранее описанная АМ, имеет один и тот же период (около 1600 лет) для всех пар колебаний за исключением пары вблизи масштабов 896 и 448 лет, для которой период ЧМ кажется удвоенным.

Амплитуды, фазы и спектры ВП были вычислены также для ряда “Хозяин Белых гор” с похожими результатами относительно расположения пиков в вейвлетном спектре и наличия 1500-летней АМ и ЧМ столетних колебаний. Хотя картины получились менее четкие, они подтверждают результаты, приведенные выше для “Тропы Мафусаила”.

Все известные в нелинейной механике [4] и радиофизике [1] модели ЧМ требуют наличия некоторого периодического или квазипериодического источника внешнего возбуждения. В связи с этим укажем, что наиболее высокочастотный из выявленных пиков в вейвлетном спектре довольно хорошо соответствует известному пику Глейссберга (примерно 80-летнего периода [8]) в колебаниях солнечной активности. Недавние работы [13] указали также на наличие пиков солнечной активности на периодах в несколько столетий. Среди них 180-летняя осцилляция маундеровского типа, 220-летняя осцилляция типа Сперера и 420-летняя осцилляция, которую авторы [13] считают главной. Четыре интервала (примерно 6500–6000, 3200–2800, 900–100 лет д. н. э. и 1000–1700 гг. н. э.), названные авторами [13] тройственными, ибо в них почти совпадали осцилляции всех указанных типов, довольно хорошо соответствуют фазам длительных похолоданий в 1600-летних циклах, выявленных нами. Вопрос о связи тысячелетних колебаний климата в голоцене с солнечной активностью требует, конечно, тщательного рассмотрения. Альтернативные гипотезы связывают эти циклы с вулканической деятельностью и изменениями термохалинной циркуляции в Северной Атлантике и вблизи Антарктиды. Но вулканическая деятельность была весьма нерегулярной во времени, а обе области предположительного возбуждения тысячелетней изменчивости климата изменениями термохалинной циркуляции далеки от Калифорнии.

В заключение укажем на сходство в характере дендроклиматических колебаний 1600-летнего цикла, существовавшими в интервале от 4000 до 2400 лет д. н. э., и самым последним 1600-летним

циклом от примерно XIV века до настоящего времени. Эти циклы похожи как по характеру соответствующих им зачерненных областей больших амплитуд в картинах обоих ВП, так и по соответствующим им участкам самого ряда. Например, стрелками на рис. 2а и 3а указаны аналоги потеплений 1940-х и 1990-х годов, завершившие цикл среднего голоцена, а также само потепление 1940-х годов (еще более резкое потепление 1990-х годов уже за пределами ряда). Уместно отметить, что аналогичность этих двух 1500-летних циклов была замечена отечественными палеоклиматологами [2], а сам средний голоцен часто называют временем Климатического оптимума. Детальное рассмотрение этой аналогичности существенно для атрибуции современного потепления климата к естественным или антропогенным причинам.

Данная работа выполнена в рамках гранта РФФИ 02–05–64299.

Один из авторов (ДМС) благодарит также за финансовую поддержку Королевскую Шведскую академию наук.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Анго Ф.* Математика для электро- и радиоинженеров. М.: Наука, 1964. 772 с.
2. *Борзенкова И.И., Зубаков В.А.* // Метеорология и гидрология. 1984. № 8. С. 69–76.
3. *Вакуленко Н.В., Монин А.С.* // ДАН. 2001. Т. 378. № 6. С. 806–808.
4. *Найфэ А.* Введение в методы возмущений. М.: Мир, 1984. 535 с.
5. *Briffa K.R., Osborn T.J., Schweingruber F.H. et al.* // J. Geophys. Res. 2001. V. D3. P. 2929–2941.
6. *Wavelets / J.M. Combes, A. Grossmann, Ph.A. Tchamitchian.* Eds. B.: Springer, 1989. 315 p.
7. *Esper J., Cook E.R., Schweingruber F.H.* // Science. 2002. V. 295. P. 2250–2253.
8. *Gleissberg W.* // Terrest. Magnetism and Atmos. Electricity. 1944. V. 49. P. 243–244.
9. <http://www.ngdc.noaa.gov/paleo/ftp-treeting.html>.
10. *Lovejoy S., Schertzer D.* // Ann. Geophys. 1986. V. 4B. P. 401–410.
11. *Moerner N.-A., Wallin B.* // Palaeogeogr., Palaeoclim., Palaeoecol. 1976. V. 21. P. 113–138.
12. *Schmitt F., Lovejoy S., Schertzer D.* // Geophys. Res. Lett. 1995. V. 22. P. 1689–1692.
13. *Stuiver M., Braziunas T.F.* // Nature. 1989. V. 338. P. 405–408.
14. *Torrence C., Compo G.P.* // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 1997. V. 79. P. 61–78.