ГЛОБАЛЬНЫЙ ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ КРИЗИС: МИФЫ И РЕАЛЬНОСТЬ

УДК 551.583
ББК 26.23

П.А. Вайновский, В.Н. Малинин

ОБ ИЗМЕНЕНИЯХ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ ЗА ПОСЛЕДНИЕ 2000 ЛЕТ

Рассматриваются длительные изменения температуры воздуха за последние 2000 лет на основе данных Лундквиста. С помощью вейвлет-анализа выделены нестационарные по частоте и амплитуде 4 цикла, причем вклад 1000-летнего цикла в дисперсию исходного ряда достигает почти 58%. Предложен метод аппроксимации и долгосрочного прогноза временного ряда температуры воздуха с помощью комплекса сдвиговых авторегрессионных моделей вейвлет-коэффициентов. Обсуждаются возможные изменения климата до 2100 года.

Ключевые слова:
авторегрессионные модели, вейвлет-анализ, изменения климата, температура воздуха, циклы.

Вайновский П.А., Малинин В.Н. Об изменениях температуры воздуха северного полушария за последние 2000 лет // Общество. Среда. Развитие. – 2015, № 4. – С. 161–170.

© Вайновский Павел Антонович – кандидат географических наук, старший научный сотрудник, ООО «Прогноз», Санкт-Петербург; e-mail: pv974@yandex.ru
© Малинин Валерий Николаевич – доктор географических наук, профессор, Российский гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург; e-mail: malinin@rshu.ru

Проблема изменений климата, выявление их причин и оценка возможных последствий для человеческой цивилизации уже давно переросла чисто научные рамки, государственные границы и является предметом дискуссий на международных саммитах глав стран и в стенах ООН. Всемирная конференция по климату в Копенгагене в ноябре 2009 г., на которой присутствовали главы большинства государств мира, вследствие кардинальных расхождений взглядов на данную проблему, закончилась полным провалом. По мнению экспертов, его причиной стало то, что поскольку на «лечение» климата надо истратить к 2050 году примерно 45 триллионов долларов, то всемирное согласие становится просто невозможным.

Очевидно, что современные изменения климата являются результатом разбалансировки климатической системы Земли и не сводятся только к глобальному потеплению. Следствием разбалансировки, помимо потепления, может быть рост числа и силы различных (в первую очередь – локальных и региональных) погодно-климатических аномалий, неизбежно сопровождающих эту разбалансировку. Именно об этом свидетельствует быстрый рост беспрецедентных стихийных бедствий (крупномасштабные наводнения, засухи, тропические ураганы, штормовые циклоны, смерчи, торнадо и т.п.), наблюдающихся повсеместно в разных странах мира. Экономический ущерб, наносимый ими, огромен и, очевидно, он будет нарастать, по крайней мере, в ближайшие десятилетия. Вначале он может ежегодно составлять 5, а позже возможно даже до 20% от мирового ВВП.

Главным индикатором глобального климата является глобальная температура воздуха в приповерхностном слое атмосферы (ГТВ). Относительно надежные оценки ее изменений могут быть получены только на основе инструментальных измерений. Принципиальный момент, связанный с оценкой точности глобальных оценок ГТВ – это неопределенности, обусловленные крайне неравномерным покрытием данными земного шара, особенно океанических акваторий, и почти полным их отсутствием в XIX столетии.

Кроме того, неопределенности связаны со сложностями выявления и исключения в значениях температуры воздуха эффектов «очагов тепла» крупных городах, в пределах которых находится большинство стационарных метеорологических станций. Известно, что такой эффект проявляется даже в оценках тренда ГТВ. Однако полное исключение этих станций из архива, особенно имеющих длительные периоды наблюдений, резко снижает степень покрытия данными земного шара. Весьма спорной представляется также замена в архивах реанализа аномалий приводной температуры воздуха данными аномалий температуры поверхности океана (ТПО). Так, даже сравнительный анализ аномалий ТПО и аномалий температуры воздуха на судне погоды «М» показал их полную несогласованность [9]. Очевидно, что использование в массовых расчетах аномалий ТПО, полученных с коммерческих судов, точность которых является весьма низкой, еще более ухудшает ситуацию.

В принципе, перечень неопределенностей можно было бы продолжить, но в этом мало смысла, ибо получение ретроспективного временного ряда значений ГТВ с высокой точностью практически невозможно. Поэтому, используя эти данные в расчетах, следует иметь в виду, что чем дальше они отступают в прошлое, тем меньше их точность и тем приближеннее сделанные выводы. В настоящее время известно несколько временных рядов реконструкции ГТВ, но поскольку все они практически основаны на одних и тех же временных рядах температуры и близких по качеству моделях, по которым осуществляется ретроспективный расчет ГТВ, то естественно, что все они дают схожие результаты изменений глобального климата за последние полтора столетия. Считается достоверным, что, начиная с XX века, ГТВ растет, при этом линейный тренд описывает более 60% дисперсии ГТВ [7]. По сути, линейный тренд – это и есть глобальное потепление. Каковы же причины современных изменений климата?

В настоящее время существует огромное число исследований, посвященных анализу изменений климата и их возможных причин. Однако все они могут быть сведены в три большие группы. Наиболее многочисленную группу составляют исследования, в которых современные изменения климата объясняются антропогенным происхождением. Вторая группа, значи-

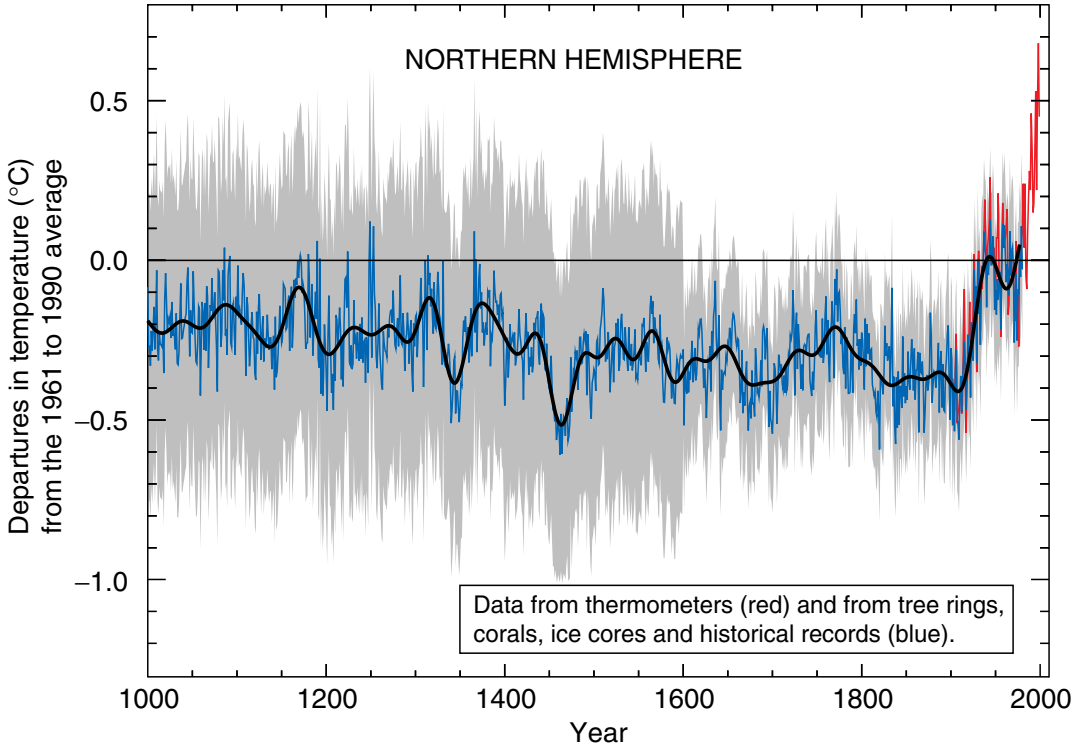

Рис. 1. Кривая эволюции глобальной температуры воздуха за последнюю тысячу лет по данным Третьего доклада IPCC в 2001 г. [13]. До 1960-х годов использованы палеоклиматические данные Mann, с 1960 по 2000 гг. – инструментальные данные. Серым показаны неопределенности в оценках температуры.

тельно более малочисленная, в которой считается, что глобального потепления как такового вообще не существует, а есть естественные циклы с фазами относительного потепления и похолодания. Наконец, третья группа – «промежуточная» точка зрения, в соответствии с которой современное потепление климата обусловлено не только ростом концентрации парниковых газов, но и естественными факторами.

Главным проводником идеи глобального потепления за счет воздействия антропогенных факторов, причем в «глобальном» масштабе, является межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК), которая была создана в 1988 году. Главной задачей МГЭИК является экспертный анализ состояния исследований по изменениям климата, их причин и возможных последствий, а также оценка потенциала по принятию адаптационных мер и снижению антропогенного воздействия на климатическую систему как на глобальном, так и на региональном уровнях. Уже в Первом отчете МГЭИК (1990 г.) сделан вывод, что глобальное потепление – это «результат CO_2, являющегося парниковым газом». Если в Третьем отчете (2001 г.) потепление климата, которое наблюдается с 50-х годов XX века, связывалось с антропогенным воздействием с вероятностью 60%, в Четвертом (2007 г.) с вероятностью 90%, то в последнем Пятом (2013 г.) уже с вероятностью 95–100%. По существу антропогенная ангажированность – главный лейтмотив деятельности МГЭИК.

Но если современные изменения климата происходят исключительно за счет антропогенного роста CO_2, то как тогда объяснить их причины до XIX века? На этот вопрос эксперты МГЭИК ответили в Третьем отчете (2001 г.) [13], в котором приведен ставший знаменитым график изменений ГТВ с 1000 г., (рис. 1) построенный Mann et al. [19] по палеоклиматическим данным (кольца деревьев, кораллы, архивные записи). Данный график вошел в историю как «хоккейная клюшка». Как видно из этого рисунка, какие-либо заметные изменения климата до начала XX века отсутствуют.

В этой реконструкции ГТВ «пропали» малый ледниковый период и средневековый теплый период, которые достаточно четко выделяются по данным архивных записей и другим палеоклиматическим реконструкциям, и проявляется лишь температурный пик XX века. По сути, это означает, что в течение последнего тысячелетия, помимо потепления в XX веке, не произошло никаких значимых изменений. Однако когда С. Макинтайр и Р. Маккитрик [20; 21] попробовали повторить про-

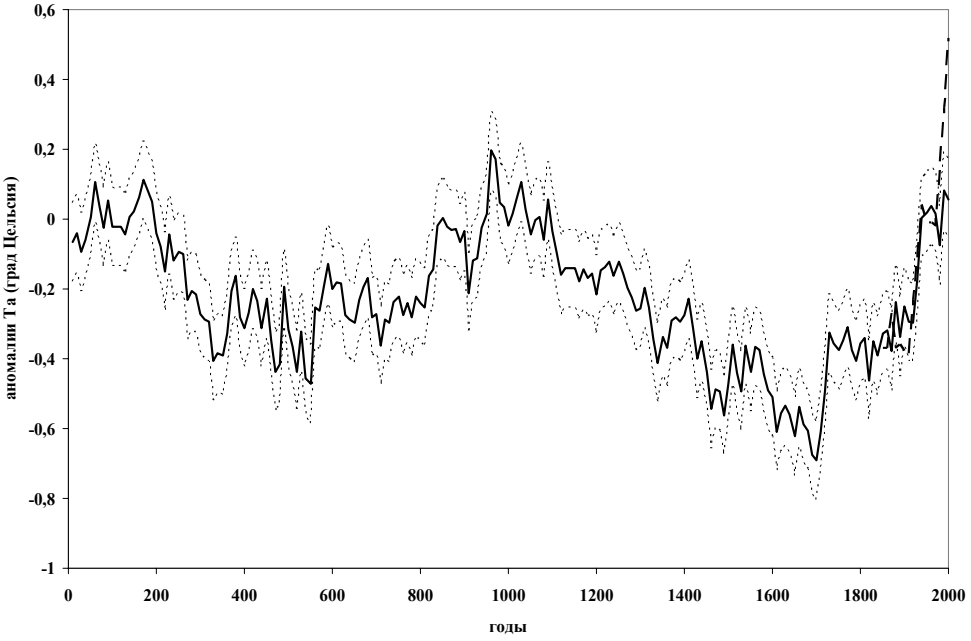

Рис. 2. Временной ход аномалий средних десятилетних значений температуры воздуха северного полушария (30–90° с.ш.) относительно базового периода 1961–1990 гг. по данным Лундквиста [16]. Пунктирные тонкие линии – среднеквадратические ошибки температуры. Серая линия – наблюденные декадные аномалии температуры воздуха по северному полушарию по данным по данным архива CRUTEM3+HadSST2

цедуры, проведенные Манном и др., то обнаружили, что их алгоритм генерирует «хоккейную клюшку» даже при введении в модель ряда случайных чисел. И потребовали от Манна представить точные данные по используемой выборке. В конце концов, Манну пришлось такие данные представить. В результате выяснилось, что из выборки в 32 дерева для построения графика аномалий температуры северного полушария использовалось только 10 стволов. Естественно, в последующих докладах IPCC про «хоккейную клюшку» забыли.

В 2010 г. шведский ученый Лундквист [16] предложил новую реконструкцию изменений температуры северного полушария (30–90° с.ш.) за последние 2000 лет, которая основана на тщательном анализе колец 30 деревьев (рис. 2), причем данные 16 колец используются уже с 1 года нашей эры. Как видно из рис. 2, он совсем не похож на хоккейную клюшку. Очень четко выделяются средневековый теплый период (X–XI вв.), малый ледниковый период (XVI–XVII вв.) и современное потепление в XX веке. Значения температуры имеют разрешение в десятилетие. Вскоре эта палеоклиматическая реконструкция была дополнена до 91 кольца деревьев, из них 26 датируются 1 годом нашей эры [11]. По сравнению с предыдущей реконструкцией эти данные по температуре имеют уже годовое разрешение. В новой реконструкции еще более резко проявляются средневековый теплый и малый ледниковый периоды. Максимальная температура в X в. превышает аналогичную оценку в [16] на 0,4°С, а минимальная ниже, чем в [16], на 0,5°С. Экстремальный характер реконструкции [11] проявляется также в том, что временной ряд температуры имеет очень высокую дисперсию, а ее значения, исключая X век, являются аномально низкими по сравнению с другими подобными реконструкциями [5; 15; 17; 22]. Принципиально важно, что почти во всех реконструкциях температуры воздуха, выполненных в XXI веке, исключая результаты Манна и др. [18], везде четко прослеживается средневековой теплый период.

В данной работе используются десятилетние значения палеоклиматической реконструкции температуры воздуха ($ТВ_{пр}$) [16]. Отметим, что в работе [4] представлены оценки коэффициентов корреляции между несколькими временными рядами температуры палеореконструкций. Корреляция ряда Лундквиста [16] с данными [4; 8; 15] является довольно высокой и составляет 0,50–0,62. Кроме, того, косвенным подтверждением надежности результатов Лундквиста является реконструкция уровня Мирового океана (УМО) за 200–2000 годы, выполненная в работе [12] на основе двух палеоклиматических рядов температуры воздуха. Дело в том, что УМО можно рассматривать как интегральный индикатор изменений глобального климата и прежде всего ГТВ [7]. По сути ГТВ определяет почти все уровнеобразующие факторы: испарение, осадки, изменение массы льда Антарктиды и Гренландии, стерические (плотностные) колебания уровня и др. Однако воздействие это разномасштабное. Если воздействие на испарение и осадки почти мгновенное, то на стерические колебания оно проявляется в течение нескольких десятилетий, а на изменения ледового баланса – через десятилетия и даже столетия. Как следует из работы [12] максимум УМО отмечался в 1150 году, а его минимум – в 1730 году, т.е. спустя столетие и 30-летие после соответствующих экстремумов на графике Лундквиста.

В статье Лундквиста отмечается, что коэффициент детерминации между палеоклиматическими и инструментальными (архив CRUTEM3) 10-летними значениями температуры за период 1850–2000 гг. составляет $R^2 = 0.90$. Однако лишь вскользь упоминается о некотором занижении глобального потепления в 90-е годы на том основании, что в реконструкции используется малое число колец деревьев. Дополнительная проверка сходства реконструированного ряда $ТВ_{пр}$ с данными наблюдений за температурой воздуха из других архивов (GISS, HadCRUT) показала, что расхождения между ними не превышают 0,15°С до 1980 года, но в последние два десятилетия они резко увеличиваются. На конец XX столетия занижение $ТВ_{пр}$ по сравнению с GISS уже достигает 0,5°С. Сравнение ряда Лукдквиста с другими палеоклиматическими реконструкциями, в том числе с [7], подтверждает его занижение в 90-е годы. Возможно, это связано как с несовершенством применяемого метода обработки, стандартизации и калибровки дендрохронологических рядов, так и с тем обстоятельством, что кольца деревьев отражают воздействие на них целого комплекса климатических параметров [6], а не только изменений температуры.

Рассмотрим теперь временную изменчивость ряда (n = 200) температуры воздуха Лундквиста ($ТВ_{пр}$) на основе следующей аддитивной модели:

$$X(t) = Tr(t) + C(t) + P(t), \qquad (1)$$

где $Tr(t)$ – трендовая составляющая; $C(t)$ – циклическая компонента, характеризующая регулярные (циклические) межгодовые колебания; $P(t)$ – остаточная часть, характеризующая случайные колебания.

Как видно из рис. 2, данному ряду свойствен отрицательный тренд, т.е. температура воздуха в течение 2000 лет медленно понижается со скоростью -0,0013 °С/10 лет (табл. 1). Данный тренд описывает 19% дисперсии исходного ряда. Возможно, что тренд является частью более длительного цикла, чем рассматриваемый нами период времени, или он характеризует общее направление движения климатической системы в сторону очередного ледникового периода. На фоне основного тренда можно выделить ряд локальных трендов, которые характеризуют эпохи относительного потепления и похолодания. Это две эпохи потепления (540–1000 и 1700–2000 гг.) и две эпохи похолодания (0–540 и 1000–1700 гг.) Характеристики локальных трендов также даны в табл. 1, причем все они являются значимыми по критерию Стьюдента. Наиболее мощным является тренд за последние 300 лет, который примерно в три раза меньше тренда в температуре северного полушария, вычисленного по данным наблюдений с 1860 года.

Для анализа циклической компоненты после удаления линейного тренда в разложении (1) мы воспользовались комплексом статистических методов: гармоническим, спектральным и вейвлет-анализом. Оказалось, что временной ряд температуры имеет довольно сложную полициклическую структуру. На рис. 3 приводится спектр временного ряда, рассчитанный методом быстрого преобразования Фурье без использования частотной весовой функции. Как и следовало ожидать, доминирует 1075-летняя гармоника, амплитуда которой превышает следующую за ней гармонику с периодом 444 лет почти в 5 раз. Кроме того, в значениях температуры отмечаются гармоники продолжительностью в 227 и 112 лет.

Таблица 1

Характеристики трендовой компоненты аномалий средних десятилетних значений температуры воздуха северного полушария, рассчитанных Лундквистом [16]

Период, годы	Статистические характеристики	
	R^2	Tr , °С/10лет
0–2000	0,19	-0,0013
0–540	0,71	-0,0087
540–1000	0,56	0,0077
1000–1700	0,86	-0,0091
1700–2000	0,73	0,0174

В табл. 2 даны статистические оценки этих гармоник. Вклад первой гармоники в дисперсию ряда температуры после удаления тренда составляет 70,8%, а в дисперсию исходного ряда – 57,8%. Данное обстоятельство является решающим аргументом в пользу достоверности данной гармоники. Вклад остальных гармоник меняется в пределах 2–4%. Значимость гармоник можно проверить по критерию Стьюдента. В работе [8] показано, что для достаточно длинных временных рядов при уровне значимости α = 0,05 критический вклад в дисперсию исходного ряда определяется как $k_{iкр} \approx 4/(n+2)$. Если $k_i > k_{iкр}$, то гармоника является значимой. Так как n = 200, то $k_{iкр} \approx 0{,}02$ или 2,0%. Из табл. 2 видно, что даже последняя гармоника 112 лет, несмотря на свою малость, оказывается на грани значимости. В результате на долю случайных колебаний приходится 14,3%.

Итак, исходя из оценок циклов, уравнение (1) в дисперсионном виде можно записать как:

$$D(\Delta ГТВ) = D(Tr) + D(C_{1075}) + D(C_{444}) + D(C_{227}) + D(C_{112}) + D(P) = 0{,}19 + 0{,}58 + 0{,}03 + 0{,}04 + 0{,}2 + 0{,}14 \qquad (2)$$

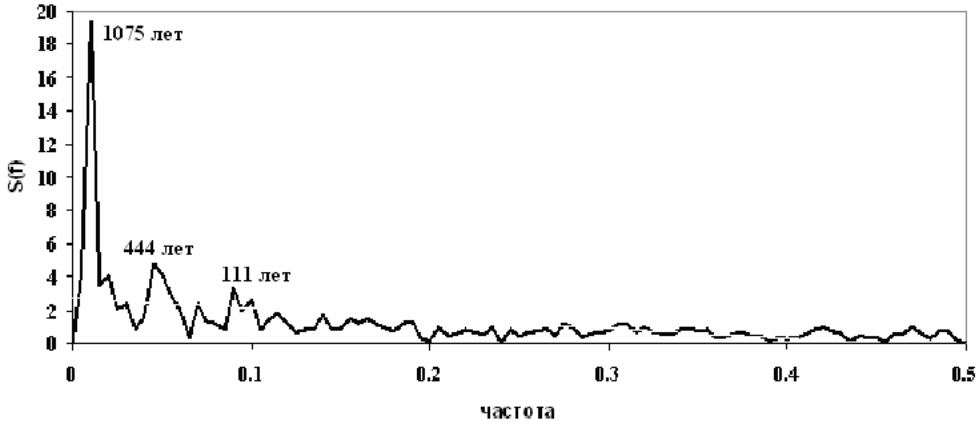

Рис. 3. Спектр временного ряда температуры воздуха Лундквиста, рассчитанный методом быстрого преобразования Фурье без использования частотной весовой функции. Периоды даны в десятилетиях.

Отметим, что в работе [4] приводится полученный методом максимальной энтропии спектр температуры воздуха северо-восточной Европы за 2000 лет. Квазитысячелетний цикл здесь отсутствует, хотя максимум температуры в начале XI века проявляется отчетливо. Очевидно, он ушел в тренд. Основным является полувековой цикл (499 лет). Кроме того, выражены также циклы 195, 73 и 48 лет. По мнению авторов [4] полувековой и двухсотлетний циклы вызваны солнечной активностью. В принципе, эти циклы близки к циклам, представленным на рис. 3.

Как известно, принципиальный недостаток спектрального анализа состоит в том, что он позволяет выделять только гармонические колебания в стационарном режиме, т.е. со строго постоянными во времени параметрами: амплитудой, периодом и фазой. Однако в действительности природные процессы являются, как правило, циклическими, параметры которых испытывают нерегулярные изменения во времени в пределах некоторого диапазона. Наиболее адекватным методом выделения циклических колебаний является вейвлет-анализ. После удаления из исходного ряда температуры тренда и 1075-летней гармоники было выполнено вейвлет-разложение методом Морле (рис. 4).

Таблица 2

Статистические характеристики различных компонент уравнения (1)

Компонента	Дисперсия, (Δ°C)²	Вклад в дисперсию исходного ряда, %
Исходный ряд	0,0337	100,0
Линейный тренд	0,0063	18,7
1075-летняя гармоника	0,0194	57,8
444-летняя гармоника	0,0011	3,3
227-летняя гармоника	0,0013	3,9
112-летняя гармоника	0,0007	2,0
Случайная компонента	0,0049	14,3

Как видно из рис. 4, указанные в табл. 2 циклы отчетливо проявляются при вейвлет-разложении. Но при этом они нестационарны по амплитуде и частоте (периоду). Особенно значительные изменения периода свойственны квазистолетнему циклу, который меняется в диапазоне 90–130 лет. Менее выражены изменения по частоте квазидвухсотлетнего и квазичетырехсотлетнего циклов. На первый взгляд, изменения циклов по амплитуде незначительны. Однако в действительности это не так. В этом легко убедиться, если обратиться к рис. 5, на котором приводится временной ход вейвлет-коэффициентов, соответству-

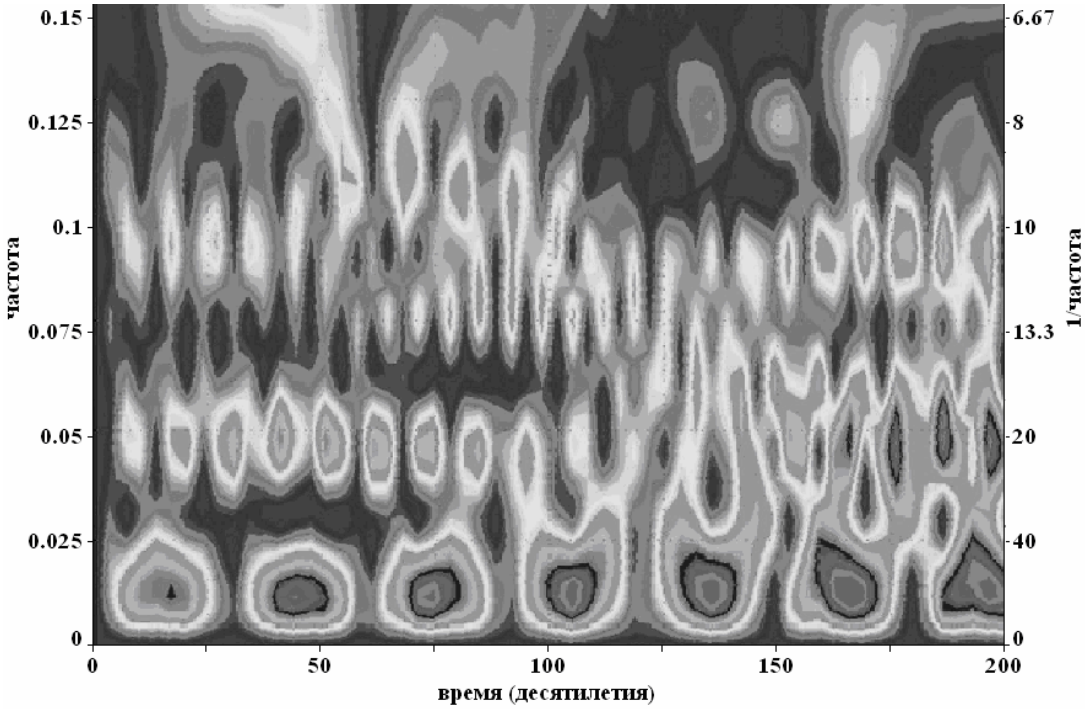

Рис. 4. Вейвлет-разложение методом Морле аномалий средних десятилетних значений температуры воздуха северного полушария за период 0–2000 гг. по данным [16]. Годы и периоды даны в десятилетиях.

ющих циклам, представленным в табл. 2. Квазичетырехсотлетний цикл наиболее ярко был выражен в первое тысячелетие. Затем вплоть до XVI века он практически не наблюдался. Максимальная интенсивность квазидвухсотлетнего цикла отмечалась, наоборот, начиная с XVI века, а его минимальная интенсивность – в XI–XV веках. Максимальные амплитуды столетнего цикла приурочены к IX–X и XIX–XX векам. Отметим, что периоды циклов также не оставались постоянными. Например, в первое тысячелетие период квазидвухсотлетнего цикла был несколько больше 200 лет (~ 240–250 лет), а когда он появился в XVI веке вновь, то его период стал близким к 200 годам. Итак, достаточно очевидно, что изменчивость периода циклов существенно ниже изменчивости их амплитуд.

Значительный научный и практический интерес представляет задача оценки возможных изменений ГТВ в текущем столетии. В настоящее время она решается преимущественно путем использования

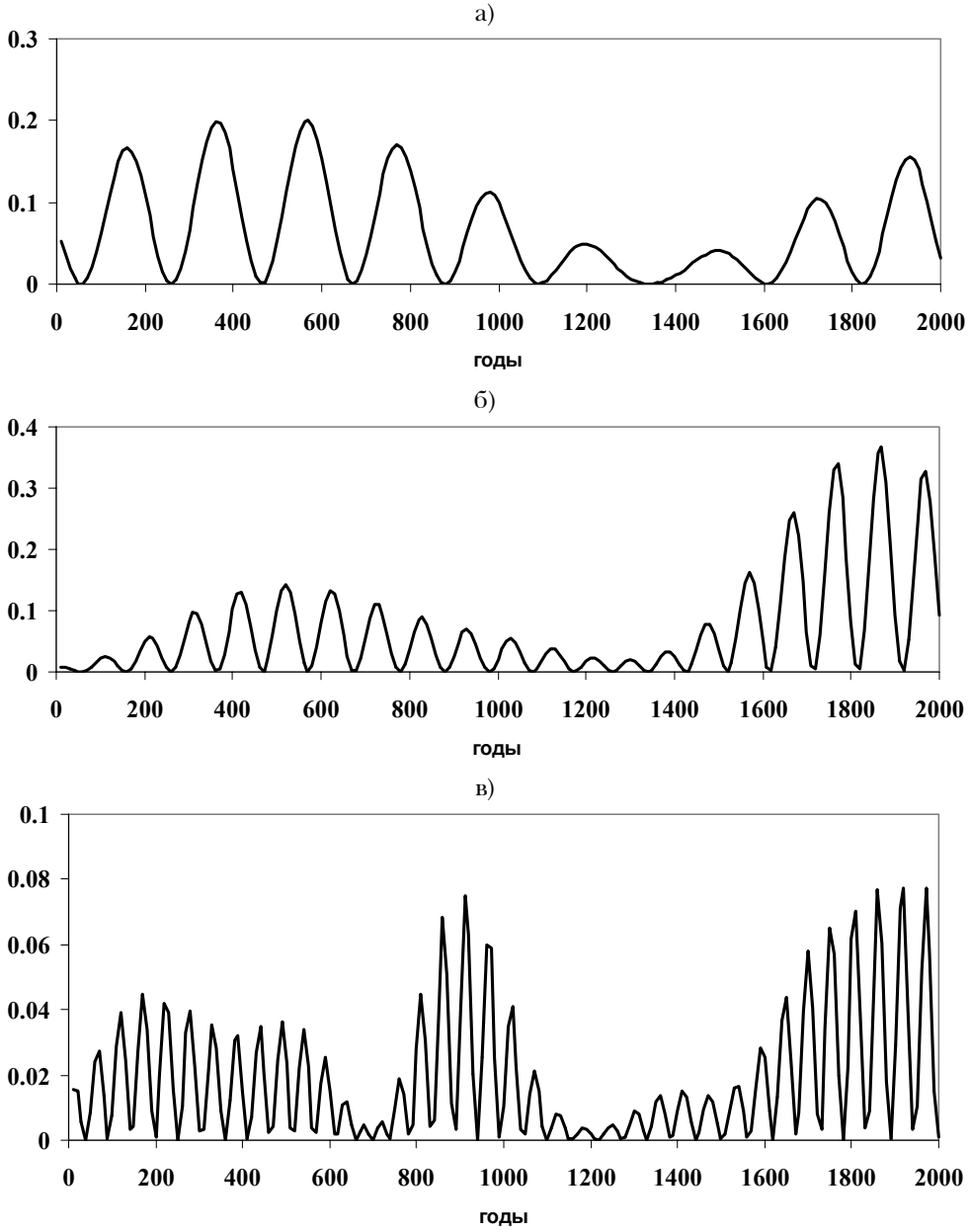

Рис. 5. Временной ход стандартизованных вейвлет-коэффициентов аномалий температуры воздуха за 0–2000 гг. для частот, соответствующих периодам 444 лет (а), 227 лет (б) и 112 лет (в).

моделей общей циркуляции атмосферы и океана и задания различных сценариев изменений климата, основанных главным образом на оценках возможного роста выбросов углекислого газа в атмосферу. При этом полностью отвергаются естественные колебания климата [14]. Однако, как мы видели выше, в доиндустриальный период изменчивость температуры воздуха формируется в основном за счет 4-х циклов. Это означает возможность использования палеоклиматических данных для сверхдолгосрочного прогноза температуры. В результате возникает необходимость в аппроксимации ряда Лундквиста. С этой целью использовался гармонический анализ в стационарном приближении по 4 гармоникам и вейвлет-разложение по выделенным циклам с учетом их явно выраженной нестационарности. Если расчет гармоник на любой момент времени тривиален и не составляет каких-либо затруднений, то расчет циклов по вейвлет-коэффициентам требует пояснений.

На первом этапе осуществлялся учет изменчивости амплитуд основных циклов, на следующем – учет изменчивости их частоты (периода). Из рис. 6 видно, что изменчивость амплитуд циклов носит очень сложный характер и только в последнее пятисотлетие можно отметить явный рост их амплитуд. Для каждого из 4-х временных рядов вейвлет-коэффициентов за период 0–1500 гг. (зависимая выборка n=150 значений) строилась классическая авторегрессионная модель порядка p в виде:

$$X^{\circ}(t) = \alpha_1 X^{\circ}(t-1) + \alpha_2 X^{\circ}(t-2) + \ldots + \alpha_p X^{\circ}(t-p) + Z(t), \quad (3)$$

где $X^{\circ}(t) = X(t) - \overline{X}$ центрированный случайный процесс, $Z(t)$ – белый шум.

Главная задача разложения (3) – нахождение оптимального порядка модели p. С этой целью использовался метод оптимальной линейной экстраполяции Ю.Алехина [1] в соответствии с которым рассчитывались первые 15 моделей авторегрессии и для каждой определялись среднеквадратическая ошибка и коэффициент детерминации R^2 между вычисленным и исходным временным рядом вейвлет-коэффициентов. Коэффициенты авторегрессии рассчитывались путем решения системы нормальных уравнений Юла-Уокера [2]. Было установлено, что для рассматриваемых циклов на зависимой выборке 0–1500 гг. в качестве оптимального порядка целесообразно принять p=6, при котором величина R^2 составила R^2 = 0,6–0,7. Далее для независимой выборки 1500–2000 гг. осуществлялся расчет вейвлет-коэффициентов с помощью сдвиговой авторегрессионной модели с шагом n=10. Суть сдвиговой авторегрессии заключалась в следующем. На первом шаге осуществлялась экстраполяция вейвлет-коэффициентов на 100 лет (1500–1600 гг.). После этого зависимая выборка сдвигалась на 10 значений (100–1600 гг.) и для нее процедура определения оптимальных моделей авторегрессии повторялась. По найденной оптимальной модели производилась экстраполяция вейвлет-коэффициентов на следующие сто лет. Затем выполнялся очередной сдвиг зависимой выборки (200–1700 гг.) и вся процедура повторялась. Использование данной процедуры диктовалось стремлением уменьшить вычислительные ошибки авторегрессионных моделей. Отметим, что всего таких расчетов было выполнено 20, но при этом каждый расчет требовал определения оптимального порядка модели p. Как правило, он находился в диапазоне p = 6–9.

В результате расчетов стало возможным составление матрицы вейвлет-коэффициентов размером 4×200. Далее использовалось обратное вейвлет-преобразование [3]:

$$X(t) = \frac{1}{K_\psi} \sum\sum C(a,b)\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)\frac{1}{a^{1/2}}\frac{\Delta a \Delta b}{a^2}, \quad (4)$$

где $X(t)$ – реконструированный ряд в момент времени t, $\psi(t\text{-}b)/a$ – вейвлет-функция Морле, $C(a,b)$ – вейвлет-коэффициенты, которые являются функцией сдвига времени b и масштаба вейвлета a, K_ψ – нормирующий коэффициент, зависящий от выбора вида вейвлет-функции. С помощью преобразования (4) несложно восстановить значения исходного временного ряда. Коэффициент детерминации между восстановленным и исходным рядом $ТВ_{пр}$ за 1500–2000 гг. составил R^2 = 0,61, а средняя квадратическая ошибка оценки $ТВ_{пр}$ оказалась равна 0,08°С (табл. 3). Как и следовало ожидать, точность такого способа расчета $ТВ_{пр}$ заметно выше по сравнению с гармоническим анализом (табл. 3).

Таблица 3

Статистические оценки сопоставления исходного и вычисленного различными способами ряда температуры воздуха северного полушария [16] для независимой выборки 1500–2000 гг.

Параметр	Гармонический анализ по 4-м гармоникам	Вейвлет-разложение	
		С учетом нестационарности по амплитуде	С учетом нестационарности по амплитуде и частоте
Коэффициент детерминации	0,53	0,61	0,79
Средняя квадратическая ошибка, °С	0,10	0,08	0,04

Однако точность аппроксимации ряда $ТВ_{л}$ по вейвлет-разложению только с учетом нестационарности циклов по амплитуде все же недостаточно высокая. Поэтому возникает необходимость в дополнительном учете изменчивости частоты циклов. Исходя из результатов вейвлет-разложения и спектрального анализа ряда Лундквиста, были выделены частоты, которые несут в себе информацию о циклах, представленных в табл. 2. Если основной 1075-летний цикл наилучшим образом проявляется на двух частотах (0,0097 и 0,0116), то наиболее изменчивый квазистолетний цикл – на 5 частотах. Поэтому дополнительно к 4-м основным временным рядам вейвлет-коэффициентов было выделено еще 10. Для каждого из них использовалась процедура сдвиговой авторегрессии. В результате была получена матрица вейвлет-коэффициентов размером 14×200. После этого с помощью обратного вейвлет-преобразования (4) рассчитан временной ряд температуры воздуха Лундквиста. В табл. 3 приводятся оценки коэффициента детерминации и средней квадратической ошибки для независимой выборки за 1500–2000 гг. Нетрудно видеть, что точность аппроксимации ряда ТВпр существенно выросла, причем его средняя квадратическая ошибка уменьшилась в 2 раза.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности приближенной оценки прогностических значений температуры воздуха до конца столетия. С использованием описанной выше процедуры (зависимая выборка 500–2000 гг., шаг n = 10), выполнен прогностический расчет $ТВ_{пр}$ на 100 лет, т.е. до 2100 года с учетом нестационарности циклов по амплитуде и частоте (рис. 6). Как видно из рис. 6, гармоническая «кривая» $ТВ_{пр}$ резко уходит вниз. Такое ее поведение обусловлено 1000-летним циклом, вклад которого в дисперсию исходного ряда превышает 50%. Очевидно, данный цикл отражает преимущественно естественные изменения климата, который после 2000 года приобретает тенденцию к похолоданию.

Более интересными представляются результаты, полученные по вейвлет-анализу. До середины столетия значения $ТВ_{пр}$ почти соответствуют температуре воздуха за период 1961–1990 гг. Однако затем вейвлет-кривая с учетом нестационарности по амплитуде идет вниз, а с учетом нестационарности по амплитуде и частоте, наоборот, возрастает. Возникает вопрос, как интерпретировать полученные результаты, т.е. как они могут соотноситься с инструментальными данными по температуре воздуха? Оставим этот вопрос открытым. Самое главное, что прогностические оценки $ТВ_{пр}$, отражающие преимущественно естественную изменчивость климата, не демонстрируют монотонного роста температуры, как это принимается экспертами МГЭИК. Можно отметить еще одно важное обстоятельство – величина тренда в температуре воздуха за период 1880–2000 гг. в данных Лундквиста занижена по сравнению с архивами реанализа в 2–2.5 раза. С одной стороны, достаточно очевидно, что значения $ТВ_{пр}$ не отражают адекватно современное глобальное потепление, но с другой стороны

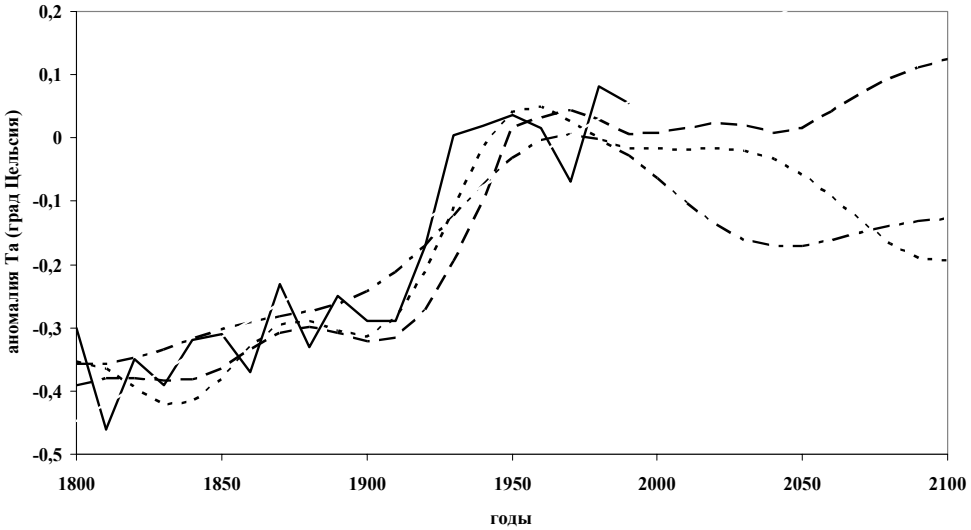

Рис. 6. Сопоставление до 2000 года палеоклиматических (сплошная кривая) и вычисленных разными способами: гармонический анализ – точки, вейвлет-анализ с учетом нестационарности циклов по амплитуде – штрих-пунктир, вейвлет-анализ с учетом нестационарности циклов по амплитуде и частоте – пунктир. Прогноз аномалий температуры воздуха Лундквиста до 2100 года.

могут возникать обоснованные подозрения в искусственном завышении тренда разработчиками архивов реанализа. Н-р, детальное сопоставление данных по температуре воздуха для территории России, используемых в архиве HadCRUT со всеми имеющимися в базе Росгидромета данными без проведения какого-либо их содержательного отбора показало, что «завышение масштабов потепления, осуществленное сотрудниками HadCRUT, для территории России с 1870-х годов по 1990-е годы можно оценить как минимум в 0,64 градуса С» [10].

Заключение

Выполнен статистический анализ изменений температуры северного полушария (30–90° с.ш.), рассчитанных Лундквистом за последние две тыс. лет по данным о кольцах деревьев. Выделены тренд и 4 циклических колебания, вклад которых в дисперсию исходного ряда составляет соответственно 19 и 67%. При этом основным является квазитысячелетний цикл, вклад которого достигает почти 58%. С помощью вейвлет-анализа установлено, что указанные циклы являются нестационарными по частоте и амплитуде. Предложен метод аппроксимации временного ряда температуры воздуха на основе комплекса сдвиговых авторегрессионных моделей вейвлет-коэффициентов, учитывающих нестационарность циклов, как по частоте, так и по амплитуде. Для независимой выборки 1500–2000 гг. показано, что коэффициент детерминации исходного ряда с вычисленным по моделям оставляет 79%, а среднеквадратическая ошибка оценки температуры воздуха равна 0,04°С. Это послужило основанием для прогностического расчета изменений температуры воздуха до конца XXI века. Показано, что прогностические оценки температуры, отражающие преимущественно естественную изменчивость климата, не демонстрируют ее монотонного роста, как это принимается экспертами МГЭИК.

Список литературы:

[1] Алехин Ю.М. Статистические прогнозы в геофизике. – Л.: Изд. ЛГУ, 1963. – 82 с.
[2] Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Прогноз и управление. Вып. 1. – М.: Мир, 1974. – 406 с.
[3] Дьяконов В.П. Вейвлеты: от теории к практике. – М.: СОЛОН-пресс, 2010. – 438 с.
[4] Клименко В.В., Мацковский В.В., Дальманн Д. Комплексная реконструкция температуры российской Арктики за последние два десятилетия // Арктика: экология и экономика. – 2013, № 4 (12). – С. 84–95.
[5] Клименко В.В., Слепцов А.М. Комплексная реконструкция климата Восточной Европы за последние 2000 лет // Изв. РГО. – 2003, вып. 6. – С. 45–53.
[6] Ловелиус Н.В. Изменения роста сосны в северо-восточной Европе за 600 лет // Общество. Среда. Развитие. – 2011, № 2. – С. 229–233.
[7] Малинин ВН. Уровень океана: настоящее и будущее. – СПб.: Изд. РГГМУ, 2012. – 259 с.
[8] Малинин. В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. – СПб.: Изд. РГГМУ, 2008. – 407 с.
[9] Малинин В.Н., Гордеева С.М. Физико-статистический метод прогноза океанологических характеристик.– Мурманск: ПИНРО, 2003. – 164 с.
[10] Пивоварова Н.А. Как делается потепление. Случай России. – М.: Институт экономического анализа, 2009. – 21 с.
[11] Christiansen B., Ljungqvist F.C. The extra-tropical Northern Hemisphere temperature in the last two millennia: Reconstructions of low-frequency variability // Clim. Past. – 2012, № 8. – P. 765–786.
[12] Grinsted A., Moore J.C., Jevrejeva S. Reconstructing sea level from paleo and projected temperatures 200 to 2100 AD // Clim. Dyn. – 2010, № 34. – P. 461–472.
[13] IPCC. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. Houghton, J.T. et al. – Cambridge; New York, Cambridge university press, 2001. – 881 p.
[14] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. Stocker T.F. at al. – Cambridge (UK); N. Y.: Cambridge University Press, 2013.– 1535 p.
[15] Kaufman D.S., Schneider D.P., McKay N.P. et al. Recent Warming Reverses Long-Term Arctic Cooling // Science. Vol. 325. – 2009, № 5945. – P. 1236–1239.
[16] Ljungqvist F.C. A new reconstruction of temperature variability in the extratropical northern hemisphere during the last two millennia. Geograf. Annal. – 2010, № 92. – P. 339–351.
[17] Loehle C., McCulloch J.H. Correction to: A 2000-year global temperature reconstruction based on non-tree ring proxies // Energy Environ. – 2008, № 19. – P. 93–100.
[18] Mann M.E., Zhang Z., Hughes M.K. et al. Proxybased reconstructions of hemispheric and global surface temperature variations over the past two millennia // PNAS. Vol. 105. – 2008, № 36. – P. 13252–13257.
[19] Mann, M.E., Bradley, R.S. and Hughes, M.K. Global-Scale Temperature Patterns and Climate Forcing Over the Past Six Centuries // Nature. – 1998, № 392. P. 779–787.
[20] McIntyre S. McKitrick R. The M&M Critique of the MBH98 Northern Hemisphere Climate Index: Update and Implications // Energy and Environment – 2005, № 16(1). – P. 69–100.
[21] McIntyre S. McKitrick R. Corrections to the Mann et. al. (1998) Proxy Data Base and Northern Hemisphere Average Temperature Series // Environment and Energy. – 2003, № 14(6). – P. 751–771.
[22] Moberg A., Sonechkin D.M., Holmgren K., Datsenko N.M., Karlen W. Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low- and high-resolution proxy data // Nature. – 2005, № 433. – P. 613–617.