

Реконструкция среднеевропейской температуры с использованием данных глобальных моделей климата*

Е. В. ДМИТРИЕВ

Институт вычислительной математики РАН, Москва, Россия

e-mail: yegor@inm.ras.ru

A reconstruction of the mean annual European temperature variations for the past 600 years is considered. Fidelity testing of some frequently used methods for the reconstruction of the past climate is provided employing the instrumental data based on the pseudo-proxies. Temporal variations of the reconstruction accuracy are estimated. A method combining tree-ring data and global climate model simulation is suggested allowing us to reduce an underestimation of the low frequency variations of the mean annual European temperature.

Введение

Одной из актуальных задач является изучение изменений климата прошлого. В частности, информация о колебаниях приземной температуры на протяжении прошедших тысячелетий может быть использована для объяснения причин глобального потепления климата Земли, которое наблюдается в течение нескольких последних десятилетий. Имеющиеся на сегодняшний день данные инструментальных измерений позволяют говорить лишь о климате прошедшего столетия. Для изучения колебаний геофизических параметров с периодом более 30 лет можно использовать так называемые косвенные данные, источниками которых являются исторические записи, древесные кольца, кораллы, осадочные породы океанов и озер, полярный лед, сталагмиты и др.

В последнее время опубликовано большое количество работ, в которых выполнены реконструкции межгодовых изменений глобальной и средней по полушарию температуры в течение прошедшего тысячелетия [1–7]. Разнородность косвенных данных и различия в методиках калибровки приводят к значительным различиям в реконструкциях [8]. В связи с этим появились работы, в частности [9], в которых проводилась оценка точности и надежности наиболее часто используемых методов интерпретации косвенных данных. Полученные в этих работах результаты указывают на то, что существующие реконструкции глобального климата за прошедшее тысячелетие могут содержать значительные ошибки, кроме того, имеет место значимое сглаживание низкочастотной изменчивости.

Точность восстановления крупномасштабных климатических параметров по косвенным данным в большой степени определяется как корреляцией косвенных данных с инструментальными измерениями, так и размером ансамбля реализаций, по которому

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 06-05-64916-а и № 07-05-00328-а) и Президента РФ (грант № МК-661.2006.5).

© Институт вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук, 2008.

оцениваются необходимые статистические данные. В частности, тестирование различных методов реконструкции климата прошлого, проведенное в работе [13], показало, что различие между реконструкциями может быть существенно меньшим, если период калибровки составит более ста лет. Таким образом, можно решать задачу восстановления палеоклимата для регионов, в которых производились длительные инструментальные измерения и имеется большое число косвенных данных.

С этой точки зрения одним из наиболее приемлемых регионов является Западная Европа [14]. В данной работе решается задача восстановления среднеевропейской температуры. За этот период доступны большие массивы косвенных данных, а также имеются регулярные данные инструментальных измерений приземной температуры воздуха за довольно продолжительный период времени. В работе [15] показано, что необходимо разделять косвенные данные низкого и высокого разрешения, и предложена оригинальная методика комбинирования древесно-кольцевых хронологий и скважинных измерений для восстановления среднегодовой температуры Северного полушария за последние 2000 лет.

В настоящей работе проверяются некоторые выводы, сделанные в [15], но уже применительно к задаче реконструкции регионального климата. Также делается попытка использования данных совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана в качестве косвенных данных низкого разрешения для реконструкции среднегодовой температуры Западной и Центральной Европы за последние 600 лет.

1. Методика интерпретации косвенных данных

Пусть случайный вектор $\mathbf{x} \in R^n$ определяет мелкомасштабное геофизическое поле и наша задача — восстановить его значения, осредненные по пространству, которые обозначим как $\mathbf{u} \in R^k$, $0 < k < n$. Если мы имеем измерения только некоторых из его компонентов, которые представляются случайным вектором $\mathbf{y} \in R^m$, $0 < m < n$, то задача осреднения становится некорректной. Тогда неизвестный вектор \mathbf{u} может быть найден из следующей системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{u} &= A\mathbf{x}, \\ \mathbf{y} &= S\mathbf{x} + \boldsymbol{\nu}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $A \in M_{k,n}$ — линейный оператор осреднения; $S \in M_{m,n}$ — линейный оператор проекции; $\boldsymbol{\nu} \in R^m$ — случайный вектор, представляющий погрешность измерений. Решение системы (1) относительно \mathbf{u} является некорректной задачей, и мы можем лишь получить оптимальную в определенном смысле оценку $\hat{\mathbf{u}}$ по известному вектору \mathbf{y} . Задачу такого рода называют также задачей “апскейлинг”.

Наиболее часто для решения этой задачи используется многомерная линейная регрессия (SMLR) [16]. В этом случае решается так называемая “прямая задача”

$$\mathbf{u} = B\mathbf{y} + \boldsymbol{\eta}. \quad (2)$$

Необходимо найти такой линейный оператор B , при котором след ковариационной матрицы случайной ошибки $\boldsymbol{\eta} \in R^k$ минимален. Таким образом, метод SMLR позволяет получить наилучшую в среднеквадратичном смысле линейную оценку вектора \mathbf{u} и ковариационную матрицу ошибки решения

$$\hat{\mathbf{u}}_{\text{smlr}} = C_{uy}C_{yy}^{-1}\mathbf{y}, \quad H_{\text{smlr}} = C_{uu} - C_{uy}C_{yy}^{-1}C_{yu}.$$

Ковариационные и взаимно-ковариационные матрицы определяются следующими соотношениями: $C_{uu} = E(\mathbf{u}\mathbf{u}^T)$, $C_{yy} = E(\mathbf{y}\mathbf{y}^T)$, $C_{uy} = E(\mathbf{u}\mathbf{y}^T)$, при этом предполагается, что $E\mathbf{u} = E\boldsymbol{\eta} = E\mathbf{u}\boldsymbol{\eta}^T = 0$, где E — символ математического ожидания, а T — знак транспонирования.

При решении практических задач нам не известны точные значения необходимых статистических моментов, поэтому используются их оценки, полученные на основе данных наблюдений. Известно, что в этом случае при достаточно больших m может возникать неустойчивость решения. Стоит отметить, что эта проблема характерна для рассматриваемой задачи. Таким образом, для регуляризации SMLR применяются различные методы сокращения размерности предиктора (в данном случае вектора \mathbf{y}), которые основаны на фильтрации малоинформативных гармоник либо непосредственно компонентов предиктора. Наиболее часто для этого используется разложение по эмпирическим ортогональным функциям (EOF) [17]. Вектор \mathbf{y} представляется разложением в конечный ряд по базису собственных векторов $\{\boldsymbol{\varphi}_i\}_{i=1}^m$ матрицы C_{yy} , что обеспечивает максимальную скорость сходимости. После этого задача решается в пространстве коэффициентов разложения $a_i = (\boldsymbol{\varphi}_i, \mathbf{y})$. Дисперсии случайных величин a_i равняются соответствующим собственным числам λ_i . Можно предположить, что более изменчивые гармоники разложения по EOF будут наиболее информативными компонентами предиктора для регрессионной оценки [18]. Оценив пороговое значение λ_{\min} , которое определяет уровень шума, мы можем считать, что гармоники с изменчивостью $\lambda_i < \lambda_{\min}$ содержат преимущественно шум и должны быть исключены из предиктора. В частности, для случая одномерного предиктанта (т. е. когда вектор $\mathbf{u} \in R^1$) имеет место оценка

$$\hat{u}_{\text{eof}} = \sum_{i=1}^{\tilde{m}} \frac{(Eua_i)}{\lambda_i} a_i,$$

где \tilde{m} — число оставшихся EOF-гармоник.

Другой метод, предложенный в работе [3] и получивший аббревиатуру MBH98, направлен на решение обратной задачи. Полагая, что именно климатические параметры определяют состояние источников косвенных измерений, а не наоборот, можно считать, что связь между векторами \mathbf{u} и \mathbf{y} может быть задана в виде

$$\mathbf{y} = G\mathbf{u} + \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (3)$$

где G — линейный оператор, а $\boldsymbol{\varepsilon} \in R^m$ — случайный вектор ошибок измерений и линейного приближения. Положим также, что $E\mathbf{u} = E\boldsymbol{\varepsilon} = E\mathbf{u}\boldsymbol{\varepsilon}^T = 0$. Поскольку, вообще говоря, матрица G не квадратная, а дисперсия вектора $\boldsymbol{\varepsilon}$ не нулевая, обратная задача (3) также является некорректной. На первом этапе вычисляется наилучшая в среднеквадратичном смысле оценка неизвестного линейного оператора G . Затем методом наименьших квадратов находится решение $\hat{\mathbf{u}}_{\text{Mann}}$ уравнения (3). В случае одномерного предиктанта решение по методу MBH98 и ковариационная матрица ошибки могут быть записаны в виде следующих выражений [19]:

$$\hat{u}_{\text{MBH98}} = \frac{C_{uu}}{C_{uy}C_{yu}} C_{uy} \mathbf{y}, \quad H_{\text{MBH98}} = \frac{C_{uu}^2 C_{uy} C_{yy} C_{yu}}{(C_{uy} C_{yu})^2} - C_{uu}.$$

Теоретический анализ не показал преимущества какого-либо из методов, SMLR с фильтрацией по EOF или MBH98, при использовании стандартных оценок статистических данных.

2. Численные эксперименты

С помощью результатов инструментальных измерений на метеорологических станциях можно с достаточно высокой точностью оценить среднеевропейскую температуру. В работе использованы данные среднемесячных значений приземной температуры Глобальной сети климатологических данных, которые находятся в свободном доступе в Интернет (<ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/ghcn/v2/>). Из этого массива выбраны 780 станций, соответствующих Западной и Центральной Европе. Данные наблюдений интерполированы на сетку $5 \times 5^\circ$ и осреднены с весами, пропорциональными косинусу широты. Для пространственной интерполяции станционных данных на сетку использовался метод Крессмана [20]. Следует отметить, что несмотря на то, что имеющиеся данные охватывают довольно большой промежуток времени, с 1701 по 2007 гг., использование вышеописанного метода для вычисления среднеевропейской температуры возможно не более чем за последние 150 лет. В последующий период ошибка интерполяции становится значительной, и для вычисления среднеевропейской температуры нужно использовать другие методы.

Массив косвенных данных, предоставленный Climatic Research Unit¹, содержит древесно-кольцевые хронологии, полученные из базы данных “Schweingruber network”, интерполированные на ту же сетку, что и инструментальные данные, они охватывают временной интервал с 1400 по 1975 г. Из них также были выбраны 26 узлов, соответствующих Западной и Центральной Европе, каждый из которых содержит хотя бы одну дендрохронологию. Следует заметить, что стандартизация временных рядов изменений годовых колец деревьев обычно приводит к потере низкочастотной изменчивости (> 25 лет). В данном случае этот эффект существенно уменьшен применением метода разложения по возрастным группам (age-band-decomposition method), который предложен в работе [2] для первичной обработки дендрологических данных.

Для оценки статистических параметров, необходимых для реализации методов SMLR с фильтрацией по EOF и MBH98, выбран период с 1858 по 1975 г. Таким образом, априорный ансамбль составляют 118 реализаций и можно ожидать, что точности реконструкции описанными методами не будут иметь значимого различия [13]. Кроме того, в течение этого времени используемый массив дендрохронологий не содержит пропусков и также имеется достаточно плотная сеть инструментальных данных для надежной оценки среднеевропейской температуры.

Одним из критериев устойчивости решения является проверка соответствия априорной оценки ошибки ее реальному значению. Для этого обычно проводится независимая проверка по реализациям, которые не входят в априорный ансамбль. Однако в нашем случае можно сделать только так называемую кроссвалидацию [16], которая состоит в том, что каждая реализация априорного ансамбля последовательно используется для независимой проверки, тогда как оценка статистических параметров каждый раз производится по оставшимся реализациям. Такая проверка является квазинезависимой, однако во многих случаях она все же позволяет выявить возможную неустойчивость решения, например, когда возникает так называемая проблема “переподгонки”.

В качестве характеристик точности реконструкции мы будем рассматривать корреляцию Пирсона и “уменьшение ошибки” (в англоязычной литературе — RE или Reduction of Error). В таблице приведены интервальные оценки этих параметров при уровне доверия 0.95, которые получены с использованием метода “бутстреппинг”. Корреляции

¹(www.cru.uea.ac.uk)

Интервальные оценки коэффициента корреляции по RE, характеризующие точность восстановления

	Кроссвалидация	Априорная оценка
SMLR с фильтрацией по EOF	0.47 < 0.59 < 0.69 0.16 < 0.33 < 0.47	0.62 < 0.71 < 0.79 0.38 < 0.50 < 0.61
МВН98	0.45 < 0.58 < 0.69 -1.40 < -0.73 < -0.26	0.49 < 0.61 < 0.71 -1.42 < -0.68 < -0.19

между точным и восстановленным значениями среднегодовой средневропейской температуры относительно невысокие. Можно утверждать, что для рассматриваемых методов они с большой вероятностью совпадают. Также необходимо отметить, что для метода SMLR с фильтрацией по EOF априорные оценки коэффициента корреляции RE существенно отличаются от соответствующих оценок, полученных методом кроссвалидации. Это говорит о том, что оператор регрессии претерпевает значительные вариации при малых изменениях априорного ансамбля. Однако это не дает оснований отказаться от применения этого метода для решения данной задачи, поскольку отличие можно назвать статистически незначимым.

С этой точки зрения метод МВН98 значительно более устойчив, и можно ожидать, что реальный коэффициент корреляции между реконструкцией и точным решением может быть оценен априори. С другой стороны, среднеквадратичная ошибка данного метода значительно выше, чем у EOF-регрессии. Она превышает стандартное отклонение решения, поскольку RE принимает отрицательные значения. Тогда возникает вопрос: можно ли использовать метод МВН98 для решения данной задачи и в чем его преимущество? Для того чтобы это проверить, проведены дополнительные тесты с искусственными косвенными данными, которые также называют псевдодендрохронологиями. Результаты экспериментов приведены на рис. 1.

Искусственные косвенные данные получены следующим образом. Из имеющегося массива инструментальных данных были выбраны узлы сетки, в которых имеются также и косвенные данные. В нашем случае это не более 26 узлов из имеющихся 72. Вы-

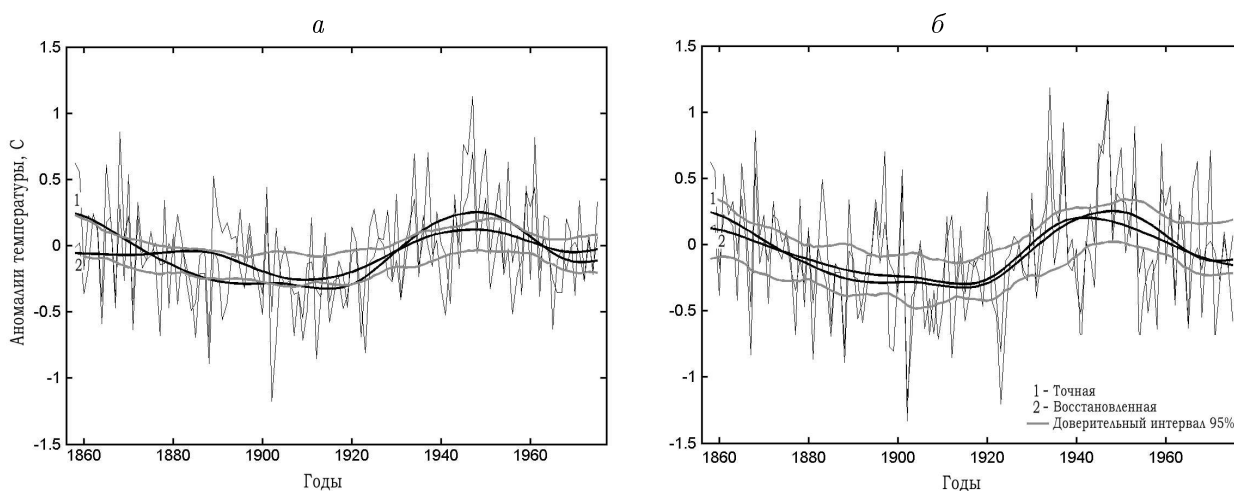


Рис. 1. Кросспроверка методов восстановления средневропейской температуры с использованием псевдодендрохронологий: а — метода SLMR с фильтрацией по EOF; б — метода МВН98. Уровень белого шума 75 %

бренные таким образом инструментальные данные заглубляются добавлением белого шума различной интенсивности. Тесты с псевдодендрохронологиями без добавления шума показали, что по “идеальным” косвенным данным, полученным обоими методами, можно восстановить более 96 % от изменчивости среднегодовой температуры. Уровень шума, характерный для дендрохронологий, используемых в настоящей работе, составляет приблизительно 75 %. В примере, показанном на рис. 1, метод MBH98 имеет несколько большую точность ($RE = 0.36$), чем SLMR с фильтрацией по EOF ($RE = 0.33$). Однако эти показатели существенно определяются данной конкретной реализацией белого шума. При другой реализации ситуация может стать обратной. В связи с этим построен ансамбль реконструкций и вычислены доверительные интервалы на уровне 95 %. На рис. 1 видно, что метод MBH98 в среднем воспроизводит низкочастотную изменчивость, тогда как реконструкции на основе EOF-регрессии получаются более сглаженными. Однако разброс решений для MBH98 также значительно больше. Поэтому для решения данной задачи выбран метод SLMR с фильтрацией по EOF.

Число дендрохронологий уменьшается со временем. В нашем случае в период времени с 1400 по 1500 г. их остается не более семи. Это должно существенным образом повлиять на качество воспроизведения средневропейской температуры. Зависимость точности реконструкции от времени, определяемая методом кроссвалидации, представлена на рис. 2, *а*. Резкое уменьшение коэффициента корреляции и RE можно наблюдать в 1843 и 1775 гг., а после 1520 г. точность реконструкции становится неприемлемо низкой. Что же произойдет, если отфильтровать низкочастотную составляющую (более 20 лет) дендрохронологий и попытаться решить нашу задачу? Из рис. 2, *б* видно, что точность реконструкции при этом даже немного возрастает. Особенно заметно, что скачок в районе 1775 г. становится значительно меньше. Этот результат подтверждает предыдущие исследования. Дендрохронологии являются косвенными данными высокого разрешения, содержащийся в них низкочастотный сигнал сильно искажен. Применение EOF-регрессии, скорее всего, приведет к сглаживанию низкочастотной изменчивости реконструкции средневропейской температуры.

В соответствии с [15] улучшить данную ситуацию можно, комбинируя дендрохронологии с косвенными данными низкого разрешения, которые могут быть получены из осадочных пород и ледовых кернов. По этим данным можно восстановить форсинг климатической системы за прошедшие тысячелетия и использовать его для численных экспериментов с моделями общей циркуляции атмосферы и океана. В настоящей работе использовались массивы данных моделирования среднегодовой температуры в течение прошедшего тысячелетия (ERIK) [9], полученные с помощью глобальной совместной модели ECHO-G [21]. В этом модельном эксперименте использовался форсинг, описанный в работе [22]. Изменчивость солнечной и вулканической активности вводится в модель в виде ежегодных изменений эффективной солнечной постоянной без учета пространственной изменчивости и зависимости от солнечного спектра. Эффективная солнечная постоянная получена на основе оценки радиационного форсинга по концентрации ^{10}Be , историческим хронологиям солнечных пятен и кислотности ледяного покрова. Среднегодовые глобальные концентрации парниковых газов восстановлены на основе измерений в пузырьках воздуха, вмороженных в полярные льды.

Комбинирование дендрохронологий и модельных данных проводилось следующим образом. Для разделения сигнала на низкочастотную и высокочастотную части использовался комбинированный фильтр, основанный на дискретном вейвлет-преобразовании и локальной регрессии. В качестве базисного вейвлета выбран койфлет четвертого по-

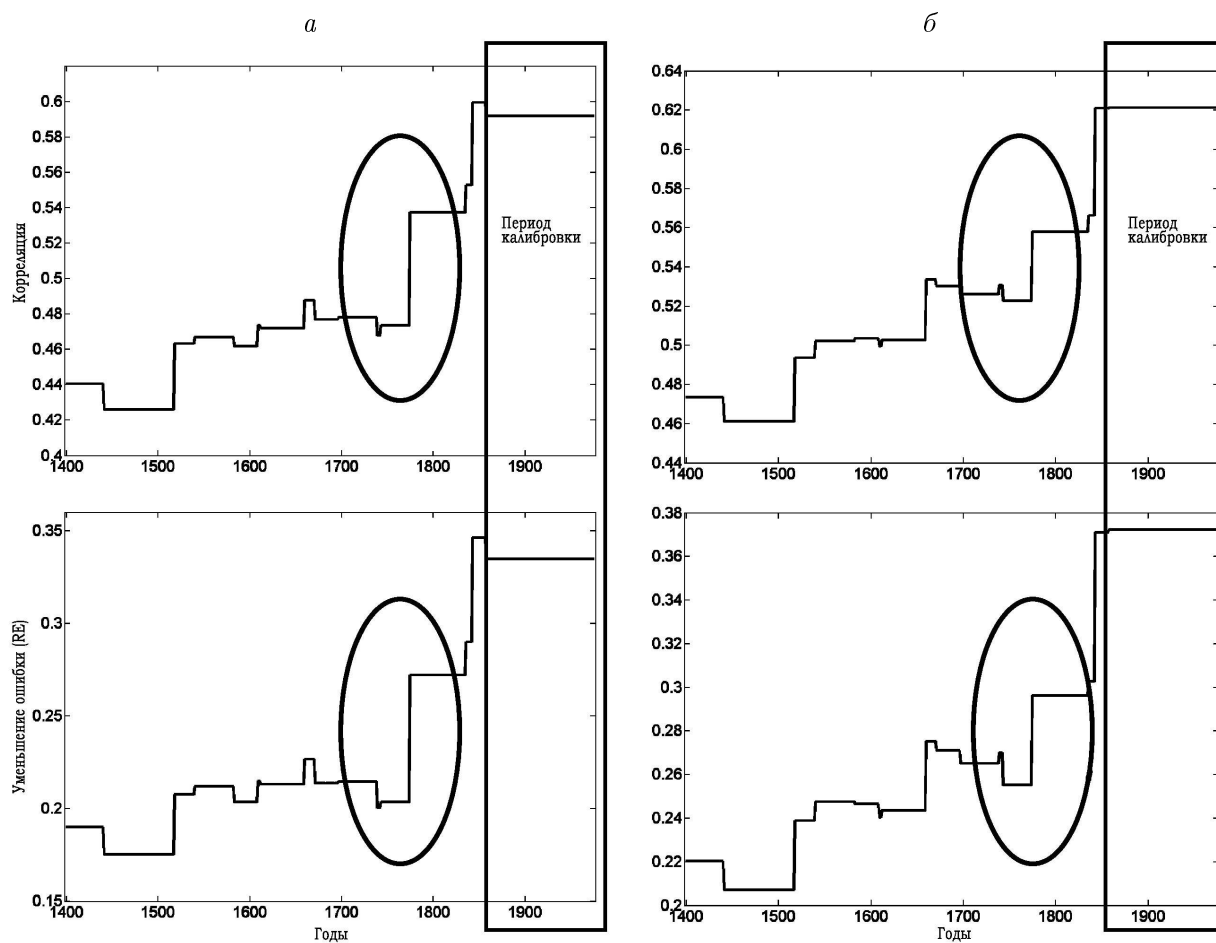


Рис. 2. Зависимость точности реконструкции средневропейской температуры от времени: *а* — соответствует реконструкции по описанным выше сеточным дендрологическим данным; *б* — по тем же дендрохронологиям после фильтрации низкочастотной изменчивости; в качестве характеристик точности реконструкции использовались корреляция (верхние графики) и уменьшение ошибки RE (нижние графики)

рядка. Высокочастотная изменчивость среднегодовой средневропейской температуры восстанавливалась по дендрологическим данным с помощью метода SMLR с EOF-фильтрацией. При этом из дендрохронологий и инструментальных данных удалялись колебания с периодом более 20 лет. Из модельных данных выделена часть, соответствующая европейскому региону, и удалены высокочастотные EOF-гармоники. Далее проводились осреднение по пространству с весовыми коэффициентами, пропорциональными косинусу широты, и выделение низкочастотной составляющей. Затем делалась калибровка с низкочастотной составляющей, полученной по инструментальным данным за период с 1775 по 1975 г. Для реконструкции средневропейской температуры с 1775 по 1850 г. использовались исторические данные наблюдений. Полученные таким образом низкочастотная и высокочастотная составляющие суммировались.

Результаты реконструкций среднегодовой средневропейской температуры, выполненных только по дендрохронологиям и с использованием данных моделирования, представлены на рис. 3. Говоря об эффективности описанного выше метода комбинирования косвенных данных, можно заключить следующее. Использование модельных данных ERIK не позволило значимо повысить точность реконструкции, увеличение RE соста-

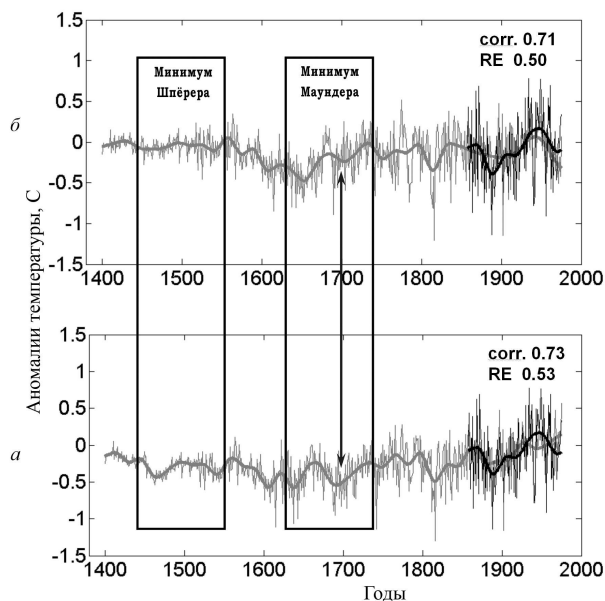


Рис. 3. Реконструкция изменений среднегодовой средневропейской температуры за период с 1400 по 1975 г.: *a* — реконструкция с использованием дендрохронологий, *б* — с использованием дендрохронологий и модельных данных ERIK; черным цветом обозначены графики, полученные по инструментальным данным, серым цветом — по косвенным данным; низкочастотные составляющие (более 20 лет) аномалий температуры отрисованы жирными линиями

вило всего 0.03. Тем не менее удастся значительно уменьшить проблему сглаживания низкочастотной изменчивости за период с 1400 по 1550 г. Долгопериодные колебания, соответствующие минимумам Маундера и Шпёра, становятся более интенсивными. При этом европейский климат в Малый ледниковый период становится значимо холоднее. В настоящее время ведется работа по усовершенствованию глобальных моделей климата, уточняются реконструкции климатических форсингов, проводятся новые модельные эксперименты. Таким образом, в ближайшем будущем можно надеяться на значимое увеличение точности реконструкции климата Европы.

Заключение

Рассматривалась проблема восстановления среднегодовой средневропейской температуры за прошедшие 600 лет. Проведено сравнение наиболее часто используемых методов реконструкции палеоклимата, а именно метода многомерной линейной регрессии с фильтрацией по EOF и метода Манна (МВН98). Показано, что в рамках данной задачи EOF-регрессия позволяет достичь большей точности решения, однако при этом происходит значимо большее сглаживание его низкочастотной составляющей. Оценена зависимость точности реконструкции от времени. Показано, что по дендрологическим данным можно восстановить лишь высокочастотные колебания средневропейской температуры, имеющие период менее 20 лет. Предложена методика комбинирования дендрохронологий и данных глобальной модели общей циркуляции атмосферы и океана. Показано, что данный метод позволяет существенно уменьшить проблему сглаживания низкочастотной изменчивости климата прошлого.

Список литературы

- [1] BRIFFA K.R., SCHWEINGRUBER F.H., JONES P.D. ET AL. Reduced sensitivity of recent tree-growth to temperature at high northern latitudes // *Nature*. 1998. Vol. 391. P. 678–682.
- [2] BRIFFA K.R., OSBORN T.J., SCHWEINGRUBER F.H. ET AL. Low-frequency temperature variations from a northern tree ring density network // *J. Geophysical Research*. 2001. Vol. 106, N D3. P. 2929–2942.
- [3] MANN M.E., BRADLEY R.S., HUGHEST M.K. Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries // *Nature*. 1998. Vol. 392. P. 779–787.
- [4] MANN M.E., BRADLEY R.S., HUGHEST M.K. Northern hemisphere temperatures during the past millennium: inferences, uncertainties, and limitations // *Geophysical Research Letters*. 1999. Vol. 26, N 6. P. 759–762.
- [5] CROWLEY T.J., LOWERY T.S. How warm was the Medieval Warm Period? A comment on “Man-made versus natural climate change” // *Ambio*. 2000. Vol. 39. P. 51–54.
- [6] JONES P.D., OSBORN T.J., BRIFFA K.R. The evolution of climate over the last millennium // *Science*. 2001. Vol. 292. P. 662–667.
- [7] ESPER J., COOK E.R., SCHWEINGRUBER F.H. Low-frequency signals in long tree-ring chronologies for reconstructing past temperature variability // *Science*. 2002. Vol. 295. P. 2250–2253.
- [8] JONES P.D., MANN M.E. Climate over past millennia // *Reviews of Geophysics*. 2004. Vol. 42. P. 1–42.
- [9] ZORITA E., GONZALEZ-ROUCO F., LEGUTKE S. Testing the Mann et al. (1998) Approach to paleoclimate reconstructions in the context of a 1000-Yr control simulation with the ECHO-G coupled climate model // *J. Climate*. 2003. Vol. 16, N 9. P. 1378–1390.
- [10] STORCH H., ZORITA E., JONES J. ET. AL. Reconstructing past climate from noisy data // *Science*. 2004. Vol. 306. P. 679–682.
- [11] MANN M.E., RUTHERFORD S., WAHL E., AMMANN C. Testing the fidelity of methods used in proxy-based reconstructions of past climate // *J. Climate*. 2005. Vol. 18. P. 4097–4107.
- [12] ДМИТРИЕВ Е.В., ЧАВРО А.И. Возможные причины недооценки низкочастотной изменчивости палеоклимата статистическими методами // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2006. Т. 42, № 5. С. 586–597.
- [13] ДМИТРИЕВ Е.В., ЧАВРО А.И. Исследование возможности восстановления палеоклимата методами математической статистики // *Метеорология и гидрология*. 2005. № 11. С. 11–25.
- [14] GUIOT J., NICAULT A., RATHGEBER C. ET AL. Last-millennium summer-temperature variations in western Europe based on proxy data // *Holocene*. 2005. Vol. 15. P. 489–500.
- [15] MOBERG A., SONECHKIN D.M., HOLMGREN K. ET AL. Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low- and high-resolution proxy data // *Nature*. 2005. Vol. 433. P. 613–617.
- [16] STORCH H., ZWIERS F.W. *Statistical Analysis in Climate Research*. UK, Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2001. 484 p.
- [17] ОБУХОВ А.М. О статистически ортогональных разложениях эмпирических функций // *Изв. АН СССР. Сер. Геофизика*. 1960. № 3. С. 432–439.

-
- [18] ЧАВРО А.И., ДЫМНИКОВ В.П. Методы математической статистики в задачах физики атмосферы. М.: ИВМ РАН, 2000. 210 с.
- [19] ДМИТРИЕВ Е.В. Анализ методов обработки и оценок погрешностей интерпретации косвенных измерений геофизических величин // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2004. Т. 2, № 5. С. 12–22.
- [20] CRESSMAN G. P. An operational objective analysis system // Monthly Weather Review. 1959. Vol. 87. P. 367–374.
- [21] LEGUTKE S., VOSS R. ECHO-G. The Hamburg Atmosphere Ocean Coupled Circulation Model. Deutsches Klimarechenzentrum Rep. 1999. N 18. 62 p.
- [22] CROWLEY T. Causes of climate change over the past 1000 years // Science. 2000. Vol. 289. P. 270–277.

Поступила в редакцию 21 февраля 2008 г.