

Учет нелинейности отклика дендрохронологических рядов на изменения температуры воздуха при тысячелетних реконструкциях климата

В связи с кажущимся беспрецедентным глобальным потеплением климата в течение последних десятилетий двадцатого века вопрос о причинах этого потепления становится все более острым. Регулярно публикуемые межправительственной группой экспертов обзоры фактического состояния глобальной климатической системы, сопровождающиеся анализом причин происходящих в ней изменений, сравнение текущего состояния и его наиболее недавних изменений с результатами длительных интегрирований численных моделей глобального климата указывают, как на несомненное, на антропогенное воздействие на климатическую систему, как на одну из основных причин происходящего глобального потепления. Остается, однако, до конца неразрешенным вопрос, насколько велики «естественные» вариации климата, которые могли бы происходить, если бы не было никакого воздействия человека на климат.

Чтобы ответить на этот вопрос, недостаточно использовать результаты численного моделирования, ибо существуют большие и вполне обоснованные сомнения в том, что сегодняшние численные климатические модели надлежащим образом учитывают все физические процессы, происходящие в самой климатической системе, а также внешние воздействия на нее. Поэтому, в поисках ответа на поставленный вопрос, не остается ничего другого, как рассматривать климатические колебания, имевшие место в прошлом, когда, с одной стороны, антропогенное воздействие на климат, даже если и существовало, по своим масштабам не шло ни в какое сравнение с современным воздействием, и когда, с другой стороны, естественные внешние воздействия на климатическую систему были сравнимы с современными. Учитывая оба этих условия, кажется наиболее предпочтительным определять уровень естественной изменчивости климата по его вариациям в течение последних одной - двух тысяч лет. Этим объясняется большой интерес к реконструкциям климата нашей эры, проявившийся в том, что за последние примерно десять лет зарубежными климатологами было опубликовано несколько таких реконструкций.

Впрочем, как самый первый опыт такой реконструкции, надо назвать работу знаменитого английского климатолога Лэмба, опубликованную еще в семидесятые годы двадцатого века [5]. В этой работе Лэмб приводит график хода среднегодовой температуры воздуха для района, названного им «Центральная Англия». График построен чисто субъективными методами на основе собранных Лэмбом многочисленных, но весьма разнородных исторических свидетельств о вариациях климата, начиная с одиннадцатого века и до середины двадцатого века. Конечно, для реконструкции наиболее недавней части (восемнадцатый - девятнадцатый века) ряда Лэмб использовал многие косвенные источники палеоклиматической информации, а для конца ряда (девятнадцатый - двадцатый века) даже инструментальные измерения температуры. Хотя все они относились к региону «Центральная Англия», ряд Лэмба долго рассматривался как оценка вариаций климата в масштабах всего северного полушария. В частности, это дало основания полагать, что глобальное потепление в течение, так называемого, «Средневекового теплого периода» (десятый - двенадцатый века) было существенно более сильным, чем современное потепление, как последнее виделось Лэмбу и его коллегам в середине двадцатого века.

В конце восьмидесятых и в девяностые годы двадцатого века, когда началась вторая, более мощная стадия современного глобального потепления, реконструкция Лэмба была подвергнута суровой критике, как основанная на недостаточном количестве зачастую непроверенных палеоклиматических данных, имеющих к тому же ограниченное региональное значение. В особенности, была подвергнута критике концепция «Средневекового теплого периода». Современные исследователи климатов прошлого [1] посчитали, что этот период представлял собой всего лишь последовательность относительно

теплых эпизодов (длительностью не более нескольких десятилетий каждый) в истории атлантико-европейского климата, т.е. «Средневековый теплый период» не был ни экстремально теплым и длительным, ни глобальным явлением.

Хотя в последнее время опубликован ряд контраргументов к этой точке зрения, зарубежные климатологи опубликовали тысячелетние реконструкции хода температуры воздуха северного полушария, в которых «Средневековый теплый период» действительно не идет ни в какое сравнение с современным потеплением. Это дало основание межправительственной группе экспертов утверждать в своих последних двух докладах, что современное глобальное потепление беспрецедентно по мощности, что десятилетие конца двадцатого века является самым теплым десятилетием, а 1998 г. - самым теплым годом за последнюю тысячу лет. Эксперты намекают поэтому, что причиной такого беспрецедентного поведения климатической системы не может быть ничто кроме антропогенного воздействия на нее.

Самой первой такого рода реконструкцией, на которую, собственно, и ссылается межправительственная группа экспертов в своем последнем докладе, является реконструкция группы американских климатологов во главе с Манном [6, 7]. В этой реконструкции среднегодовая температура воздуха, осредненная в масштабах северного полушария, представлена более или менее монотонно убывающей, начиная с одиннадцатого века до первой половины девятнадцатого века, а затем резко возрастающей вплоть до наших дней. За свою характерную форму эта реконструкция получила в современной западной литературе название «хоккейная клюшка». Длинная «ручка» этой «клюшки» оканчивается «Средневековым теплым периодом», который выглядит гораздо менее мощным, чем современное потепление («крюк» «клюшки»).

Последующие тысячелетние реконструкции [1, 2, 4] в своей форме немногим отличаются от реконструкции Манна, тем самым подтверждая беспрецедентность современного потепления. Однако недавно появилась статья [8] с разгромной критикой реконструкции Манна. Авторы этой работы не являются климатологами. Они занимаются проблемой учета современных изменений климата в экономике. В связи с огромной важностью вывода межправительственной группы экспертов об определяющей роли человеческой деятельности в современном глобальном потеплении, полученного на основе работы Манна, они были вынуждены перепроверить эту работу. При этом в работе Манна ими были обнаружены многочисленные неряшливости и почти явные подтасовки исходных палеоклиматических данных. Исправляя их, авторы [8], получили новую реконструкцию, которая основана исключительно на данных, использованных Манном. При этом эти данные были заново обработаны тем же методом, что использовали Манн и его соавторы. Однако окончательный результат разительно отличается от реконструкции Манна. В новой реконструкции «Средневековый теплый период» теплее, или, по крайней мере, соизмерим с современным потеплением. Любопытно, что авторы [8] сочли уместным упомянуть в своей публикации, что их работа не оплачивалась никакими фондами и является продуктом их личной инициативы. Это обстоятельство важно, поскольку, к сожалению, проблема современного изменения климата давно перестала быть чисто научной.

В данной работе предпринимается попытка найти лучший способ обработки исходных палеоклиматических данных, с тем чтобы оптимально их использовать для построения действительно надежной тысячелетней реконструкции температуры воздуха северного полушария. Исходная предпосылка для работы была найдена в одной из самых недавних тысячелетних реконструкций [2], построенных европейскими (Эспер и Швейнгрубер) и одним американским (Кук) климатологами. Далее она будет называться реконструкцией Эспера. Реконструкция Эспера построена исключительно на основании дендрохронологических рядов. Известно, что дендрохронологические ряды отличаются годичным временным разрешением и издавна служат как индикаторы вариаций климата в прошлом. Однако уже довольно давно обнаружено, что дендрохронологиям свойственен дефект занижения сверхнизкочастотных (в масштабах столетий) климатических колебаний.

Это связано с тем, что при составлении дендрохронологических рядов из срезов многих деревьев обязательно надо учитывать возраст дерева. Чем оно старше, тем меньше, при прочих равных условиях, его приросты. Поэтому дендрохронологи издавна строили среднюю кривую изменения прироста для каждого используемого дерева и потом вычитали ее из приростов. Процедура эта называется стандартизацией. Легко понять, что, вместе с исключением возрастной зависимости приростов, она исключает из последующего рассмотрения те вариации прироста, периоды которых близки к возрасту рассматриваемого дерева, но которые, возможно, связаны с климатом. Авторы [2] использовали более совершенную процедуру стандартизации, которая сохраняет невозрастные сверхнизкочастотные вариации прироста. В результате, в тысячелетней реконструкции Эспера общая изменчивость прошлых колебаний температуры воздуха северного полушария увеличилась примерно в два раза по сравнению с реконструкцией Манна. Однако при этом современное потеплению выглядит как беспрецедентное. Более того, «Средневековый теплый период» в реконструкции Эспера стал даже более холодным, чем у Манна.

По нашему мнению, реконструкция Эспера - шаг в правильном направлении. Но требуется дальнейшее совершенствование методов обработки исходных палеоклиматических данных. В частности, новый метод стандартизации дендрохронологических рядов нуждается в дальнейшем совершенствовании. Так, легко предположить, что реакция роста деревьев на изменения температуры не может быть линейной, как считается при стандартизации, в том числе и использованной Эспером. Очевидно, что прирост деревьев может увеличиваться при повышении температуры теплого времени года (в период вегетации) только в определенных пределах. Когда температура достигает некоторой величины, оптимальной для деревьев рассматриваемого вида, дальнейший рост температуры должен сопровождаться уменьшением, а не дальнейшим увеличением прироста. Разумеется, дендрохронологи издавна учитывали это обстоятельство, поэтому для построения дендрохронологических рядов обычно используются только деревья, произрастающие вблизи верхней границы леса, и только в достаточно ограниченной приполярной части каждого полушария (или в горных местностях). Предполагается, что все так выбранные деревья всегда росли в условиях температурного режима, более холодного, чем оптимальный.

Наша исходная предпосылка состояла в том, что это последнее предположение не верно. Прежде всего, в последние годы, когда дендрохронологические исследования проводились особенно активно, было обнаружено, что во многих традиционно используемых дендрохронологами географических районах современное потепление сопровождалось не увеличением, а уменьшением прироста деревьев. Этому старались найти объяснение, например: при высоких современных температурах стали сильнее размножаться вредители леса. Наше мнение, что это, как раз, есть косвенное следствие того, что в соответствующих районах температура превысила оптимум.

Коль скоро современные условия оказались слишком теплыми для роста деревьев в ряде районов, традиционно изучаемых дендрохронологами, можно поставить вопрос, не были ли условия в этих районах столь же неблагоприятными для роста деревьев во время «Средневекового теплого периода». Не по этой ли причине реконструкция Эспера, которая построена с использованием дендрохронологических рядов, сохраняющих сверхнизкочастотные вариации прироста, показывает этот период более холодным, чем реконструкция Манна и другие известные реконструкции, в которых использовались дендрохронологические ряды, стандартизованные так, что сверхнизкочастотные вариации в них практически исключались? Из-за перехода через оптимум сверхнизкочастотные вариации в реконструкции Эспера просто оказались обратного знака. Это предположение поддерживается многочисленными свидетельствами того, что верхняя граница леса во многих районах (например, в Скандинавии, на Урале) в наше время находится ниже, чем она реконструирована для "Средневекового теплого периода".

Чтобы убедиться в справедливости высказанных предположений о нелинейной реакции прироста деревьев на температуру, мы провели калибровку одного из наиболее

известных дендрохронологических рядов из Скандинавии, известного как дендрохронология «Торнетреск» [3]. Ряд был нам любезно предоставлен разработчиками. Этот ряд имеет общую длину более семи тысяч лет, т.е. он охватывает период почти всего голоцена. Однако нас интересовала только его часть для последнего тысячелетия. Кстати, ряд «Торнетреск» является одним из тех, что были использованы в реконструкции Эспера.

Мы калибровали этот ряд непосредственно в отношении среднегодовой температуры воздуха северного полушария, взятой за весь период инструментальных наблюдений (с 1860 г.). Возможность этого была нами проверена путем предварительной калибровки ряда относительно локальных температур, как среднегодовых, так и только вегетационного периода. Детали этой работы публикуются в другом месте. Оказалось, что связь прироста с температурой была положительной до примерно 1960 г. В период 1960-1980 гг. связь практически исчезла, а после 1980 г. она стала отрицательной. Кажется, что в середине двадцатого века для деревьев из горного района северной Скандинавии, использованных для построения дендрохронологии «Торнетреск», действительно температурный режим перешел через оптимум от слишком низких к слишком высоким температурам.

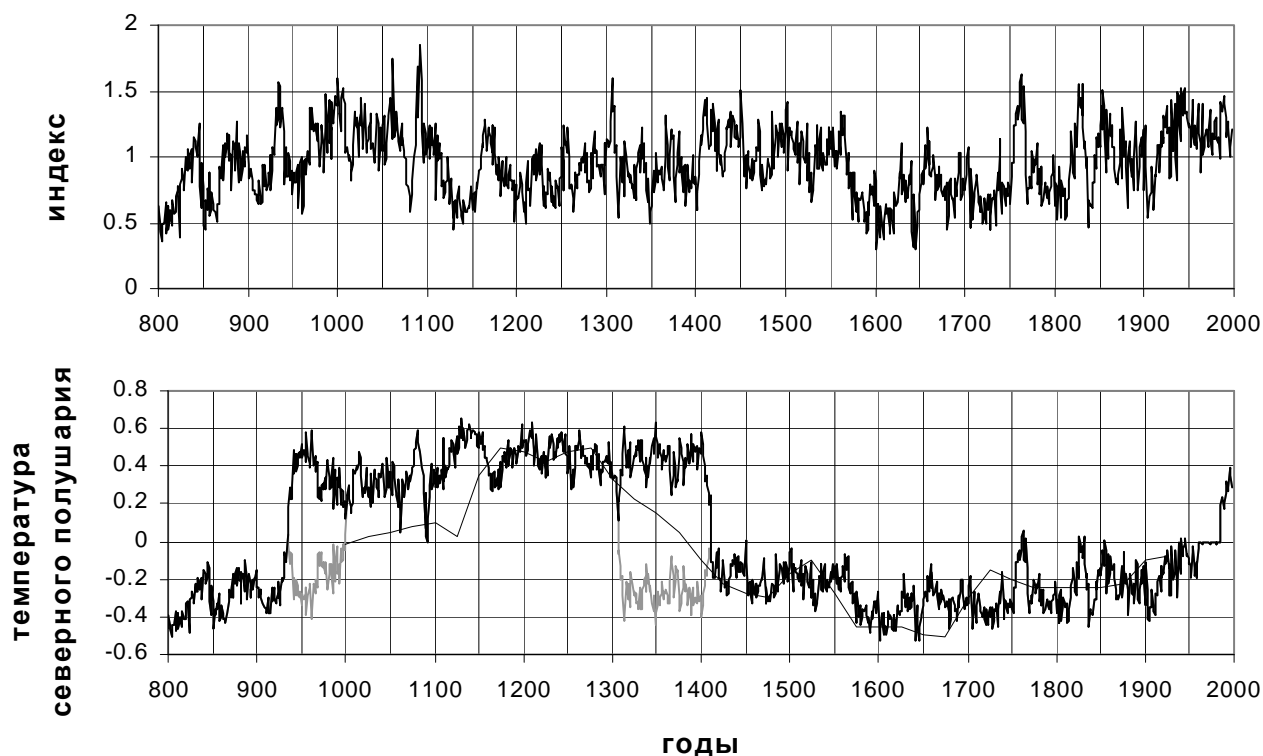
Используя найденное значение оптимальной температуры, и полагая, что период чрезмерно высоких температур должен отражаться в пониженном приросте деревьев в ряду «Торнетреск» до тех пор, пока температура не понизится и вернется к оптимальному значению, мы калибровали ряд «Торнетреск» в терминах среднегодовой температуры воздуха северного полушария, т.е. реконструировали ход этой последней за прошедшие столетия вплоть до «Средневекового теплого периода».

Результат нашей реконструкции представлен на рисунке. Сам исходный ряд «Торнетреск» показан вверху рисунка. На нем видно, что прирост деревьев резко увеличивался в самом начале «Средневекового теплого периода» (от девятого к десятому веку нашей эры). Максимальные приросты наблюдались в одиннадцатом веке, но затем они резко снизились в начале двенадцатого века и продолжали колебаться на почти неизменном среднем уровне вплоть до конца четырнадцатого века. В пятнадцатом и первой половине шестнадцатого века прирост снова достиг высокого уровня, близкого к пику одиннадцатого века. Конец шестнадцатого века отмечен беспрецедентно низкими приростами.

Внизу рисунка представлены два варианта реконструкции температуры воздуха северного полушария. В первом варианте, показанном черной линией, за момент перехода температуры через оптимальное значения снизу вверх (от «Холодного раннего средневековья» к «Средневековому теплему периоду») принят пик прироста вблизи середины десятого века, высота которого почти совпадает с таковой у пика прироста вблизи середины двадцатого века. За момент перехода температуры через оптимальное значение сверху вниз в этом варианте взят пик прироста в самом начале пятнадцатого века. Этот пик несколько ниже пика середины двадцатого века. Поэтому во втором варианте реконструкции за момент возврата к относительно низким температурам принят более высокий пик, наблюдавшийся в самом начале четырнадцатого века. Также во втором варианте за момент перехода к слишком высоким температурам принят пик в самом начале одиннадцатого века, т.е. более поздний, чем в первом варианте. В результате наступление «Средневекового теплого периода» выглядит более плавным, чем в первом варианте. Обратим также внимание, что, после учета перехода температуры через оптимум в середине века, ход температуры во второй половине двадцатого века стал близок к ходу температуры, известному из инструментальных наблюдений, хотя в исходном ряду «Торнетреск» явно виден тренд уменьшения прироста деревьев во второй половине века.

Разумеется, ни один из вариантов нашей реконструкции температуры воздуха северного полушария нельзя рассматривать серьезно, ибо исходным для построения является только один дендрохронологический ряд. Надо использовать много рядов. Также надо привлекать другие источники косвенной палеоклиматической информации. Но эти последние требуют столь же тщательного исследования на предмет выявления возможных нелинейностей их связей с температурой, как наше исследование дендрохронологии

«Торнетреск». Тем не менее, заслуживает быть отмеченным, что даже такая экзотическая реконструкция весьма неплохо согласуется с той самой исторической реконструкцией Лэмбом хода температуры «Центральной Англии», которая упоминалась в начале статьи. Эта реконструкция показана на рисунке тонкой черной линией поверх нашей полушарной реконструкции. Ряд «Торнетреск» из северной Скандинавии давно известен как весьма репрезентативный для климатических колебаний в Европе. Здесь мы показываем, что после надлежащей его калибровки этот ряд хорошо согласуется с историческим рядом Лэмба, несмотря на то, что ряд Лэмба никак в этой калибровке не использовался. Это может указывать на истинность старого предположения Лэмба о гораздо большей выраженности «Средневекового теплого периода», чем думают некоторые апологеты антропогенной гипотезы современных климатических изменений.



Дендрохронологический ряд «Торнетреск» из горного района северной Скандинавии (вверху) и реконструкция на его основе среднегодовой температуры воздуха северного полушария (внизу). Варианты реконструкции показаны черной и серой линией в зависимости от моментов времени, принятых для перехода от относительно низкой к относительно высокой температуре и обратно. Тонкая черная линия показывает историческую реконструкцию Лэмба [5] температуры «Центральной Англии».

Список литературы

1. Crowley, T.J., and T. Lowery How warm was the Medieval Warm Period. *Ambio*. 2000. Vol. 29. P. 51-54.
2. Esper, J., E.R. Cook, and F. Schweingruber Low frequency signals in long tree-ring chronologies for reconstructing past temperature variability. *Science*. 2002. Vol. 295. P. 2250-2253.
3. Grudd, H., K.R. Briffa, W. Karlen, T.S. Bartholin, P.D. Jones, and B. Kromer A 7400-year tree-ring chronology in northern Swedish Lapland: natural climatic variability expressed on annual to millennial timescales. *The Holocene*. 2002. Vol. 12, P. 657-665.

4. Jones, P.D., K.R. Briffa, T.P. Barnett, and S.F.B. Tett High-resolution palaeoclimatic records for the last millennium: interpretation, integration and comparison with general circulation model control-run temperatures. *The Holocene*. 1998. Vol. 8. P. 455-471.
5. Lamb H.H. *Climate: Present, Past, and Future* // L.: Barnes and Noble Publ., 1977. Vol. 2. 835 pp.
6. Mann, M.E., R.S. Bradley, and M.K. Hughes Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries // *Nature*. 1998. No. 392. P. 779-787.
7. Mann, M.E., R.S. Bradley, and M.K. Hughes Northern hemisphere temperatures during the past millennium: inferences, uncertainties, and limitations // *Geophysical Research Letters*. 1999. Vol. 26. P. 759-762.
8. McIntyre, S., and R. McKittrick Corrections to the Mann et. al. (1998) proxy data base and northern hemispheric average temperature series // *Energy and Environment*. 2003. Vol. 14. No. 6. P. 751-771.