

Комплексная реконструкция температуры российской Арктики за последние два тысячелетия

В. В. Клименко¹, член-корреспондент РАН
Московский энергетический институт

В. В. Мацковский², кандидат географических наук
Институт географии РАН

Д. Дальманн, профессор
Рейнский университет (Бонн, Германия)

Представлена количественная реконструкция среднегодовых температур Северо-Восточной Европы за последние два тысячелетия, основанная на использовании косвенных данных о климате – дендрохронологической, палинологической и исторической информации. Она разработана специально для построения сравнительной хронологии климатических и исторических событий в этом регионе. Исследовано пять различных вариантов реконструкции в зависимости от калибровочных и верификационных процедур. Сравнение реконструкции декадных значений среднегодовой температуры в Северо-Восточной Европе с региональными и полушарными реконструкциями показывает, что крупные климатические события проявлялись как в масштабах всего Северного полушария, так и в его отдельных регионах. При этом менее значимые климатические изменения на региональном уровне могут значительно отличаться от общей климатической картины в полушарии. В доиндустриальную эпоху максимальные среднегодовые температуры в 981–990 гг. были на 1°C выше, а минимальные в 1811–1820 гг. – на 1,3°C ниже, чем в среднем за 1951–1980 гг. Построенная хронология обладает заметно большей амплитудой изменчивости по сравнению с полушарными и панарктическими реконструкциями.

Ключевые слова: Арктика, среднегодовая температура, реконструкция.

Введение

Связь климатических и социальных изменений особенно сильна в маргинальных областях обитания человека, таких как аридные области (степи, пустыни и полупустыни) и высокоширотные регионы, к числу которых относится Северо-Восточная Европа. Существует обширный корпус литературы на эту тему, восходящий к античному времени, в частности, к трудам Аристотеля, Теофраста и Гиппарха. В последние десятилетия исследования по этой тематике в связи с осуществлением грандиозного прорыва в области наук о Земле и в том числе знаний о климате прошлого приобрели новый импульс, что выразилось в многочисленных работах о закате государства Майя [27; 11], крушении ближневосточных

цивилизаций [50; 19], гибели норманнских поселений в Гренландии [39], взаимоотношениях Китая с северными кочевыми народами [23], о поворотах истории Западной Европы [16]. Изучение возможного влияния колебаний климата на исторический процесс в Северо-Восточной Европе делает первые шаги. Однако прежде чем давать обоснованные заключения на этот счет, необходимо располагать детальной климатической информацией на соответствующем региональном уровне для всего исторического периода. Именно этой задаче посвящена настоящая работа.

Регион исследования

Регион исследования представляет собой территорию, ограниченную Кольским полуостровом на западе (40° в. д.), мысом Челюскин (полуостров Таймыр) на востоке (104° в. д.) и 60-й параллелью на юге (рис. 1).

¹ e-mail: nilgpe@mpei.ru.

² e-mail: matskovsky@gmail.com.

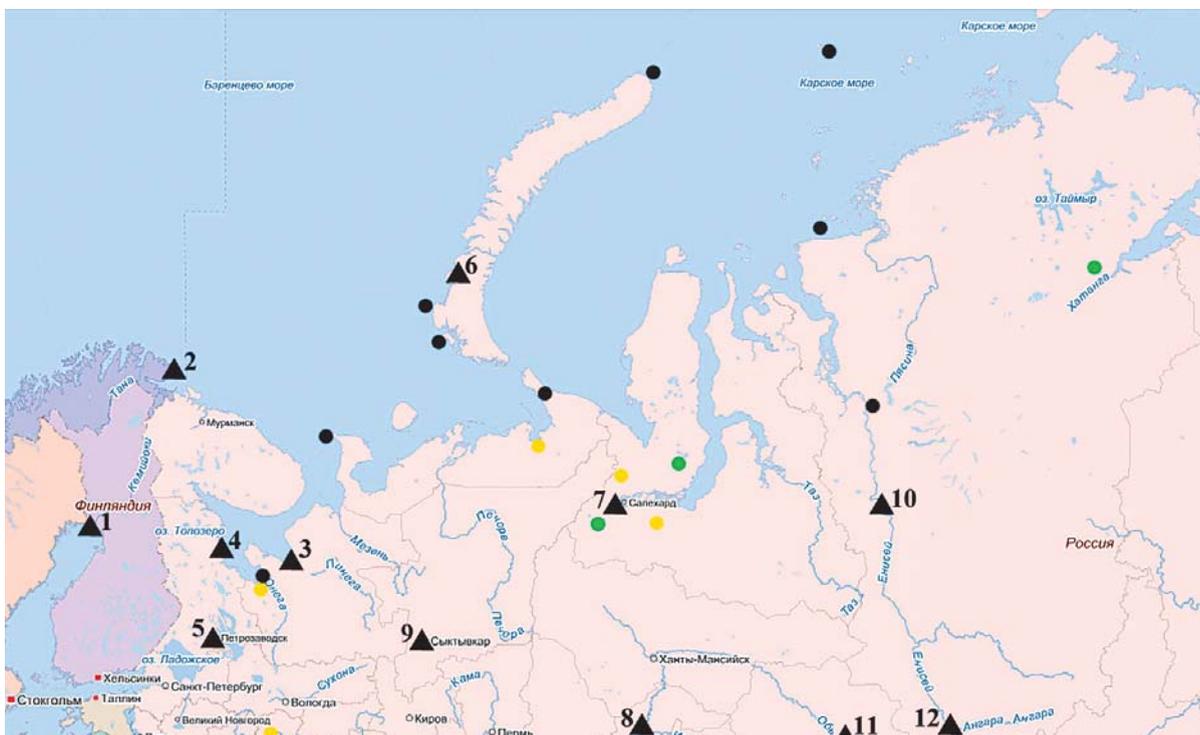


Рис. 1. Карта региона исследования с указанием местоположений, для которых имеются косвенные климатические данные. Желтыми кружками обозначены палинологические данные, зелеными — дендрохронологические, черными — важнейшие исторические свидетельства. Треугольниками отмечено расположение длиннорядных метеостанций внутри и вокруг региона исследования: Хапаранда (1), Вардё (2), Архангельск (3), Кемь (4), Петрозаводск (5), Малые Кармакулы (6), Салехард (7), Тобольск (8), Сыктывкар (9), Туруханск (10), Томск (11), Енисейск (12)

Западная граница исследуемого региона определяется территорией, освоение которой новгородцами относится к началу XII в. — именно тогда они впервые обосновались на правом берегу Северной Двины, что и означало по сути начало колонизации северо-восточных территорий. Восточная граница определяется основным историческим театром действий в период с середины XI до конца XVII столетия. На этом театре именно полуостров Таймыр оказался той естественной границей, которую за все это время так и не удалось преодолеть. Единственное до конца XVII в. достоверно известное событие продвижения за мыс Челюскин состоялось около 1618 г. и подробно описано А. П. Окладниковым [9]. В нашем исследовании были использованы также некоторые косвенные данные о климате, лежащие за границей означенного региона. Это связано, с одной стороны, с достаточной дальностью корреляции температурных полей, с другой — с уникальностью этих данных, которые не хотелось бы оставлять за рамками исследования.

Главной задачей данного исследования является построение климатической реконструкции для указанного региона за последние две тысячи лет на основе всех доступных косвенных данных о климате. Так как большинство использованных косвенных данных (палинологических и исторических) описывает среднегодовую температуру воздуха, то

реконструировалась именно среднегодовая температура. Кроме того, в силу непреодолимого пока дефицита климатической информации мы сочли целесообразным сосредоточиться на реконструкции среднедекадных значений температуры, что, кстати, вполне соответствует целям построения сравнительной хронологии климатических и исторических событий, поскольку общество реагирует, как правило, не на отдельные, пусть и значительные, межгодовые колебания климата, а на устойчивые его изменения с характерными временами, сопоставимыми с продолжительностью жизни поколения (20—22 года). Однако здесь стоит учесть, что использованные дендрохронологические данные отражают температуры только теплого сезона. Тем не менее это не снижает их ценности из-за известной связи среднегодовых и летних температур, по крайней мере в изучаемом регионе [10]. Таким образом, в качестве косвенных данных о климате были использованы сведения о ширине годовых колец деревьев, а также палинологические и исторические данные.

Материалы и методы

Косвенные данные. Известно, что различные косвенные данные обладают разной разрешающей способностью. Так, палинологические данные редко достигают разрешения менее 50 лет, в то время как древесно-кольцевые данные позволяют

Научные исследования в Арктике

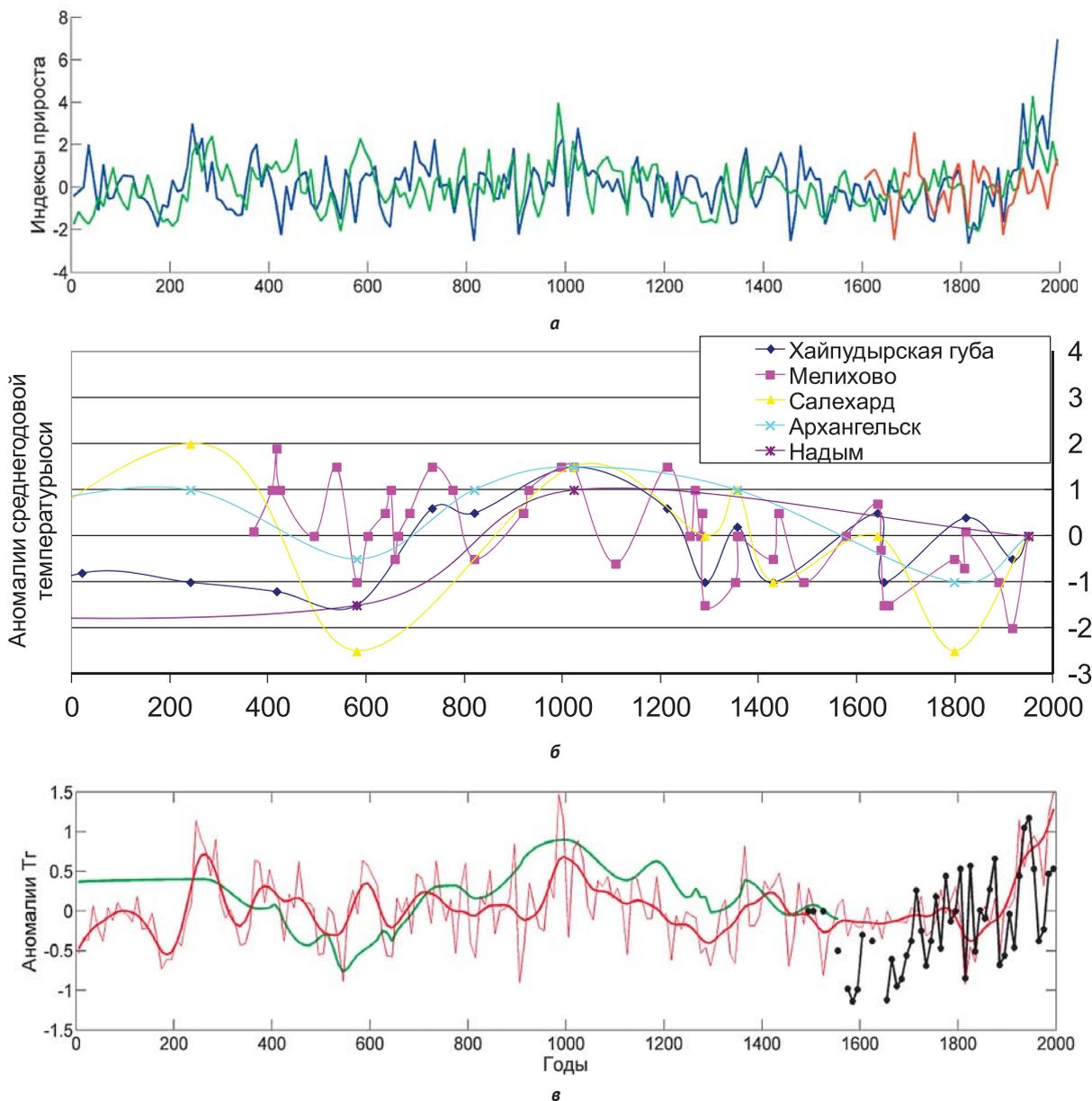


Рис. 2: а – колебания ширины годичных колец деревьев на Ямале (синяя линия) [26], на Таймыре (зеленая линия) [38] и на Полярном Урале (красная линия) [25]; б – аномалии среднегодовой температуры воздуха по палинологическим данным; в – осредненные косвенные климатические данные: палинологические (зеленая линия), дендрохронологические (красная линия), исторические (черная линия). Здесь и далее температурные аномалии представлены в отклонениях от среднего за период 1951–1980 гг.

реконструировать события с точностью до года, а иногда и до сезона, исторические же данные достигают подчас точности суток и даже часов. Однако с увеличением разрешающей способности падает способность косвенных данных восстанавливать долгопериодные колебания климатического сигнала. Эта проблема хорошо известна для древесно-кольцевых данных [29], в связи с чем было предложено множество методов ее решения [14]. В настоящее время научная общественность сходится во мнении, что для построения качественной реконструкции необходимо использовать как данные

высокого разрешения, позволяющие реконструировать такие точечные климатические события, как изменение температуры воздуха из-за сильных вулканических извержений, так и данные низкого разрешения, дающие возможность корректно реконструировать амплитуду значительных климатических колебаний [8; 37; 35; 29].

С учетом этого в настоящей работе были использованы (рис. 2):

- древесно-кольцевые данные по ширине и плотности годичных колец деревьев — для подробной реконструкции точечных климатических событий;

Таблица 1. Косвенные данные, использованные для построения реконструкции климата Северо-Восточной Европы

Тип	Местоположение	Реконструируемый параметр	Долгота	Широта	Год начала	Год окончания	Источник
Пыльцевые	Надым	Тг	72	64	545	1555	[47]
Пыльцевые	Мелихово	Тг	38	57	370	1555	[1]
Пыльцевые	Салехард	Тг	66	67	0	1555	[47]
Пыльцевые	Архангельск	Тг	43	64	0	1555	[47]
Пыльцевые	Хайпудырская губа	Тг	60	68	0	1555	[12]
Ширина годичных колец деревьев	Ямал	Тл	70	67	0	1995	[26], декадные значения из [30]
Ширина годичных колец деревьев	Таймыр	Тл	102	72	0	1995	[38], декадные значения из [30]
Ширина годичных колец деревьев	Таймыр	Тл	64	65	1605	1995	[25]
Исторические	Реконструкция для Северо-Восточной Европы	Тг	50—80	65—80	1495	1995	[31]

- палинологические данные — для восстановления долгопериодного сигнала и уточнения его амплитуды;
 - исторические данные, позволяющие, по-видимому, наиболее точно восстановить климатические события прошлого, но покрывающие немногим более 500 лет.
- Описание всех использованных данных приведено в табл. 1.

Инструментальные данные. Для калибровки реконструкции и верификации ее современной части использовались осредненные данные с двенадцати длиннорядных метеостанций, расположенных в регионе исследования и вокруг него (см. рис. 1). Наблюдения на метеостанциях начались (в хронологическом порядке): Архангельск — в 1813 г., Петрозаводск — в 1816 г., Сыктывкар — в 1817 г., Вардё — в 1829 г., Тобольск — в 1832 г., Томск — в 1837 г., Хапаранда — в 1860 г., Кемь — в 1862 г., Енисейск — в 1871 г., Туруханск — в 1881 г., Салехард и Малые Кармакулы — в 1886 г. (по данным Глобальной сети исторической климатологии GHEN

[40]). Отметим, что центральные для изучаемого региона станции Салехард и Малые Кармакулы начали функционировать позже других, только с 1886 г. Поэтому, хотя мы принимали во внимание все доступные метеоданные, но для калибровки использовали лишь их часть после 1886 г. (первое в ряду значение в случае декадного разрешения относится, таким образом, к 1895 г.).

Объединение косвенных данных для построения обобщенной реконструкции

Перед объединением косвенных данных разных типов было произведено осреднение данных каждого типа. Дендрохронологические данные, усредненные обычным средним, представлены на рис. 2в. Палинологические данные перед осреднением были незначительно скорректированы по датировкам, для чего использовались осредненные дендрохронологические данные. Необходимость корректировки исходных радиоуглеродных датировок вытекает из довольно высокой погрешности радиоуглеродного метода, которая в изучаемом диапазоне 0—2000 гг.

Таблица 2. Корректировка радиоуглеродных датировок климатических событий в пыльцевых данных с помощью дендрохронологических данных

Дата по ¹⁴ C	Корректировка по дендро	Событие	Знак аномалии
241	265	Пик «Римского» оптимума	+
580	545	Максимум похолодания 1-го тысячелетия н. э.	-
734	735	Пик потепления раннего Средневековья	+
820	815	Похолодание ранней «Эпохи викингов»	—
1023	1000	Средневековый климатический оптимум	+
1108	1125	Холодный перерыв Средневекового оптимума	-
1213	1185	Второй пик климатического оптимума	+
1290	1295	Большой минимум солнечной активности (минимум Вольфа)	-
1356	1365	Тысячелетний пик солнечной активности	+
1429	1455	Извержение вулкана Кувае	-
1441	1505	Малый арктический оптимум	+
1491	1555	Начало арктического похолодания	-

может превышать столетие [41]. Поэтому основные пики палинологических данных были приведены в соответствие с дендрохронологическими экстремумами после сглаживания 30-летним скользящим средним. Это позволило скорректировать радиоуглеродные датировки, которые имеют на один-два порядка больший разброс, чем дендрохронологические, а также учесть возможное смещение пиков, связанное с принципиально разной разрешающей способностью данных. Корректировка дат приведена в табл. 2.

Часть палинологических данных была отброшена в силу их малой надежности. К ним относятся, в частности, данные за последние 450 лет, поскольку радиоуглеродные датировки в этот период исключительно неточны и могут соответствовать даже различным столетиям [41]. Также были исключены данные по Надыму до 545 г., так как предыдущий датированный образец из этого разреза более чем на 1000 лет старше и интерполированные значения показывают пониженные значения температур в начальные 500 лет первого тысячелетия, тогда как данные по другим разрезам (не интерполированные) фиксируют вековые колебания переменного знака. После этого все палинологические данные были усреднены с разными весами. Разрезы Архангельск, Салехард и Надым получили уменьшенные веса (0,5), так как они представлены менее подробно, чем разрезы Мелихово и Хайпудырская губа, а значит, содержат больше интерполированных, а не

измеренных значений. Осредненные палинологические данные представлены на рис. 2в. В процессе обобщения мы также рассматривали варианты использования палинологических данных без корректировки датировок и без взвешивания (осреднение всех данных с одинаковыми весами). Реконструкции, построенные с использованием различных вариантов обработки палинологических данных, приведены на рис. 3 и обсуждаются ниже.

Описание итогового осреднения и калибровки. Для итоговой реконструкции был использован метод Composite Plus Scaling (CPS, [29]). Описанные косвенные источники климатической информации были объединены следующим образом. Дендрохронологические данные, покрывающие весь исследуемый период (2000 лет), осреднялись с палинологическими (0—1555 гг.) и историческими (1495—1995 гг.) данными. Веса при осреднении выбраны равные.

После этого необходимо было скорректировать дисперсию данных, исходя из известных характеристик климата исследуемого региона. Исследованиями последнего десятилетия установлено, что арктическая амплификация (усиление амплитуды температурных колебаний в Арктике по сравнению с Северным полушарием) варьируется в диапазоне от 1,72 по инструментальным данным последних полутора столетий [13] до 3,4 по палеоданным за последние 3 млн лет [36]. В эти рамки также укладывается значение 1,9, полученное в результате

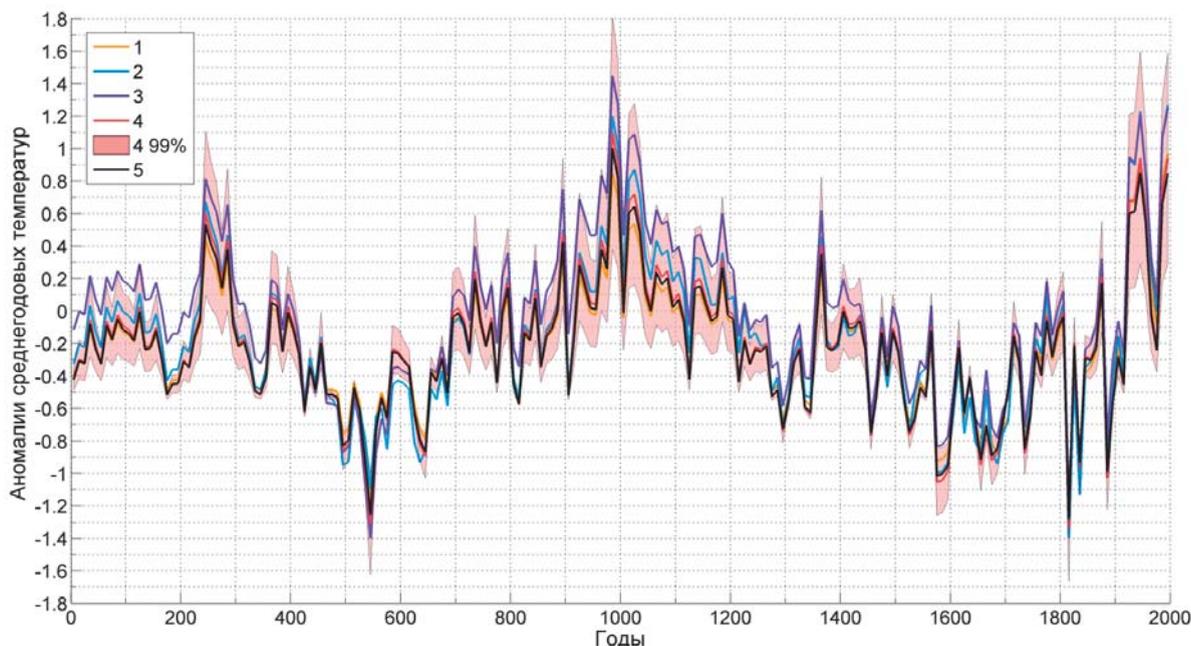


Рис. 3. Варианты реконструкции с различными модификациями палинологических данных: 1 — без корректировки датировок и без взвешивания; 2 — с корректировкой датировок и со взвешиванием. Варианты реконструкции с различной калибровкой: 3 — калибровка на инструментальном периоде с такими же средним и дисперсией; 4 — калибровка на инструментальном периоде, линейная регрессия, с доверительным интервалом 99%; 5 — калибровка, основанная на эффекте арктической амплификации и минимальных значениях по инструментальным данным

моделирования по современному ансамблю климатических моделей [51]. Реконструированное нами значение максимального повышения температуры в средневековую теплую эпоху составляет $1,1^{\circ}\text{C}$, что при сравнении с ансамблем реконструкций полшарной температуры [4; 37; 35] дает значение полярной амплификации 3,8, лишь незначительно выходящее за пределы указанного диапазона. Тем не менее мы сочли полезным привести реконструированные нами данные в полное соответствие с имеющейся палеоклиматической информацией и скорректировать величину максимального повышения температуры в средневековую теплую эпоху с $1,1^{\circ}\text{C}$ до $1,0^{\circ}\text{C}$. Так как значения температуры в десятилетия максимального потепления (980-е и 1940-е годы) примерно на 1°C превышают норму, что соответствует нашим знаниям об этих периодах [3], то сохранение дисперсии было проведено за счет уменьшения минимальных значений. Минимальные значения в 1810-е годы были установлены на уровне $-1,3^{\circ}\text{C}$ согласно инструментальным данным по метеостанциям Хапаранда, Архангельск и Петрозаводск [40; 32]. Таким образом, мы провели калибровку нашей реконструкции на основе палеоклиматических данных, а также данных ранних инструментальных наблюдений. Кроме того, мы использовали стандартную калибровку по данным современных инструментальных наблюдений. Процедура последней заключается в расчете коэффициентов линейной регрессии реконструированных данных на

инструментальные с последующей корректировкой реконструированных значений. Также мы использовали альтернативный метод калибровки, когда для реконструированных данных на инструментальном периоде устанавливаются такие же дисперсия и среднее, как у инструментальных данных. Этот метод калибровки является предпочтительным по сравнению с линейной регрессией, что было показано в [33]. На рис. 3 приведены все три варианта реконструкции с различными калибровками.

Рассмотрение рис. 3 показывает, что применение различных вариантов калибровки реконструируемых значений температуры, а также различных вариантов обработки палинологических данных не слишком сильно отражается на масштабе колебаний и вовсе не меняет характер чередования теплых и холодных эпизодов в течение всего периода исследования. Тем не менее, исходя из полного комплекса представлений об изменениях арктического климата, в том числе изложенных в настоящей работе, мы склонны рекомендовать для построения сравнительной хронологии климатических и исторических событий вариант реконструкции, основанный на калибровке с учетом эффекта арктической амплификации и минимальных значениях, определенных по ранним инструментальным данным (черная кривая на рис. 3).

В табл. 3 приведены характеристики вариантов реконструкции, в табл. 4 — кросс-корреляции различных реконструкций.

Таблица 3. Характеристики различных вариантов реконструкции (отклонения в °С)

Вариант	Минимум	Максимум	Среднее	Среднеквадратическое отклонение
Калибровка, основанная на эффекте арктической амплификации и минимальных значениях по инструментальным данным *	-1,2800	1,1484	-0,1611	0,4192
Калибровка на инструментальном периоде, линейная регрессия *	-1,0858	0,8778	-0,1770	0,3270
Калибровка на инструментальном периоде, среднее и дисперсия *	-1,4584	1,1623	-0,2509	0,4524
Палинологические данные с корректировкой датировок и без взвешивания **	-1,2800	1,1230	-0,1681	0,4003
Палинологические данные без корректировки датировок и без взвешивания **	-1,2800	1,0426	-0,2031	0,4085

* Палинологические данные с корректировкой датировок и взвешиванием.

** Калибровка, основанная на эффекте арктической амплификации и минимальных значениях по инструментальным данным.

Результаты

Сравнение итоговой реконструкции с инструментальными данными показывает их хорошее соответствие (рис. 4). Коэффициент корреляции равен 0,81, если рассматривать весь ряд инструментальных наблюдений начиная с 1815 г., но он возрастает до 0,91, если использовать данные с 1895 г., когда имеются наблюдения для всех длиннорядных метеостанций региона (см. рис. 1). Окончательный вариант климатической истории Северо-Восточной Европы представлен на рис. 4.

Выполненная реконструкция обнаруживает существенную изменчивость в мультидекадном и вековом масштабах времени. Спектральный анализ полученных данных, проведенный с помощью метода максимальной энтропии (MEM), демонстрирует статистически значимые осцилляции региональной температуры

с периодами в 488, 192, 72, 48 и 24 года (рис. 5). Мы полагаем, что источником 500- и 200-летних климатических колебаний, которые, по-видимому, носят глобальный характер, являются изменения солнечной активности [2]. В самом деле, ритмы такой продолжительности уверенно выявляются в рядах различных солнечных индикаторов [45; 24].

Что касается 70-летней цикличности, то, как показано в нашей недавней работе [5], ее источником скорее всего является Северная Атлантика, точнее, квазипериодические изменения атмосферной и океанической циркуляции, известные как Североатлантическое колебание (NAO), и связанные с ним пульсации притока теплых вод в бассейны Норвежского и Баренцева морей (Атлантическая мультидекадная осцилляция — АМО). То же утверждение,

Таблица 4. Кросс-корреляции различных реконструкций

Реконструкция	Настоящая работа	[37]	[4]	[22]	[34]	[30]	[8]
Настоящая работа	1,000	0,648	0,437	0,593	0,627	0,545	0,306
[37]		1,000	0,222	0,457	0,509	0,270	0,115
[4]			1,000	0,288	0,492	0,354	0,701
[22]				1,000	0,407	0,535	0,307
[34]					1,000	0,612	0,299
[30]						1,000	0,298
[8]							1,000

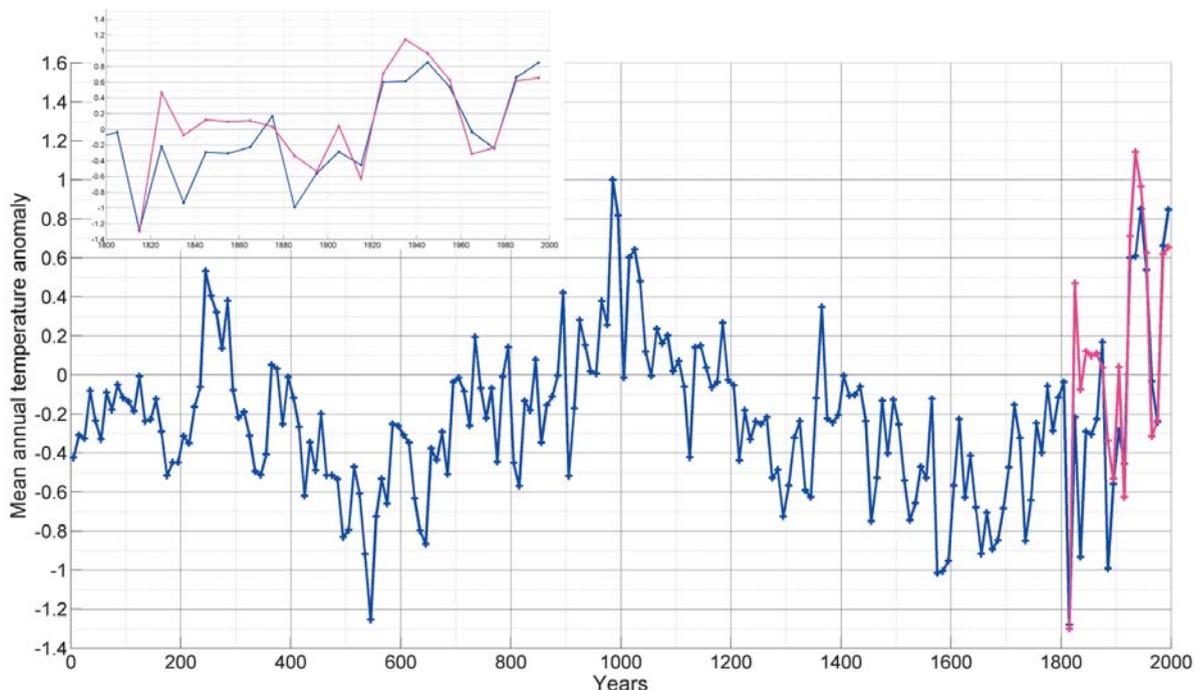


Рис. 4. Финальная реконструкция декадных значений среднегодовых температур для Северо-Восточной Европы (синяя линия) и инструментальные данные (красная линия). На вставке увеличен инструментальный период

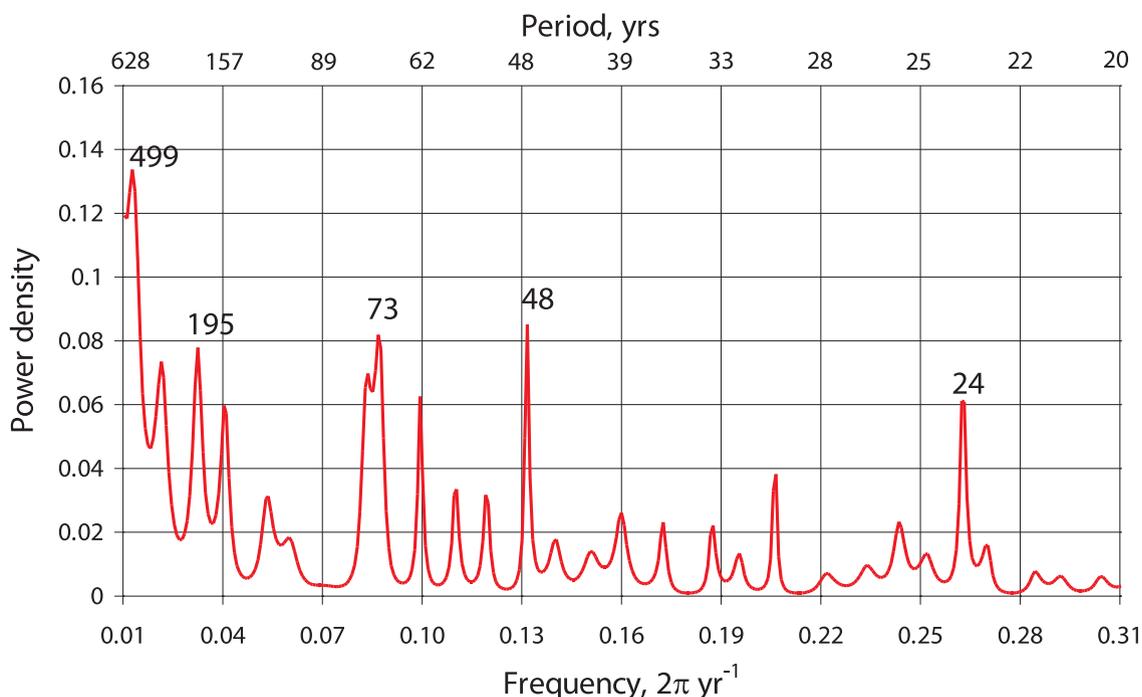


Рис. 5. Спектральный анализ финальной реконструкции. Цифрами отмечены основные периоды колебаний

по-видимому, справедливо и для 50-летнего ритма — на это указывают не только результаты моделирования [20], но и данные реконструкций индекса Североатлантического колебания за последние шесть столетий [17].

Наличие бидекадного цикла часто приписывают влиянию Солнца, но такое объяснение наталкивается

на серьезные трудности, поскольку этот цикл наиболее явно выражен только в океанах Южного полушария [43]. Данное обстоятельство заставляет искать его возможное происхождение скорее в динамике Южного колебания (SO), индекс которого имеет слабый спектральный пик в 22 года [21]. Последняя версия подтверждается тем, что изучаемый здесь

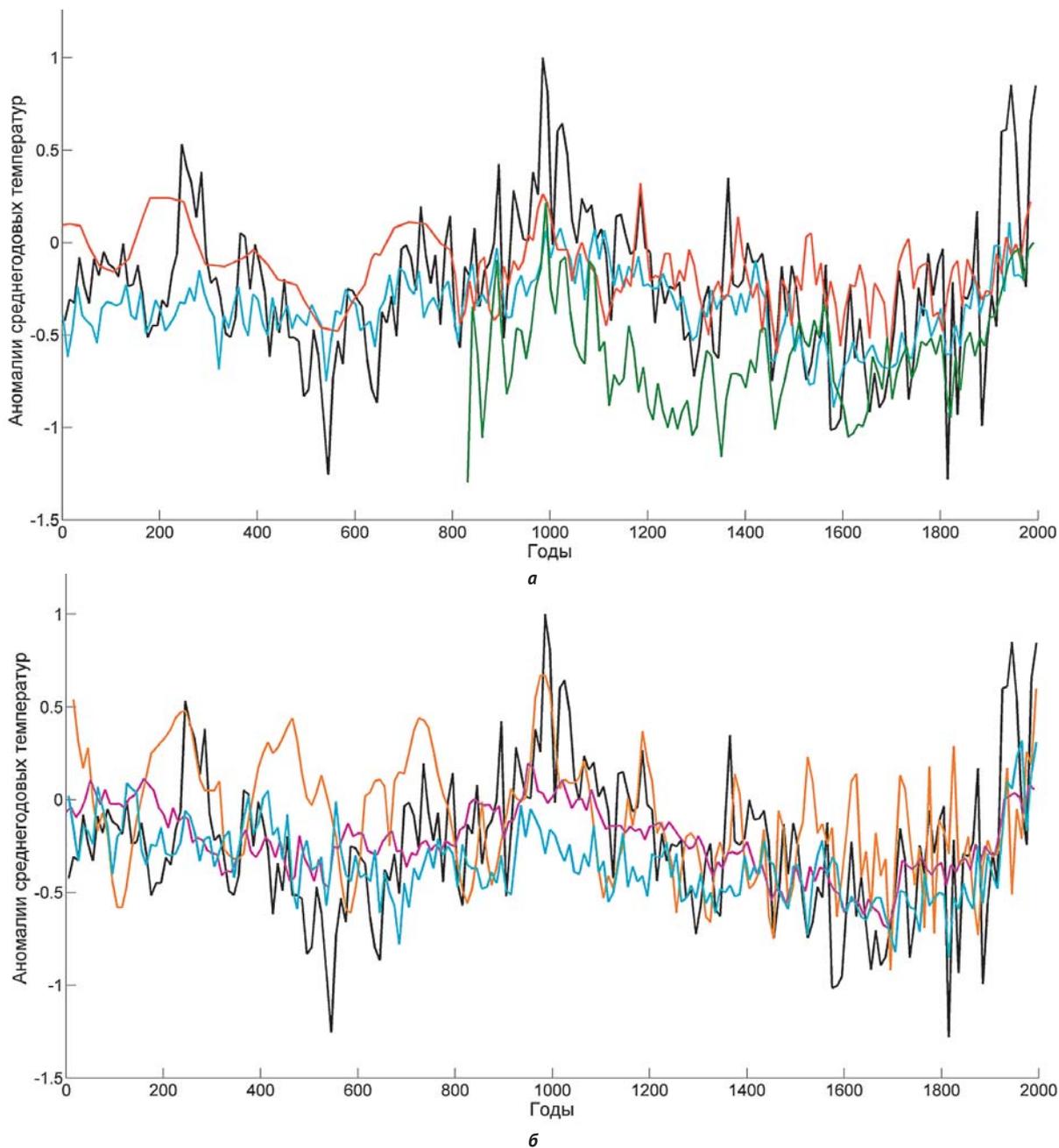


Рис. 6: а – сравнение новой хронологии для Северо-Восточной Европы (черная линия) с полушарными реконструкциями Моберга и др. (синяя линия), Клименко (красная линия), Эспера и др. (зеленая линия); б – сравнение новой хронологии для Северо-Восточной Европы (черная линия) с региональными реконструкциями: с реконструкцией для нетропических широт 30–90° с. ш. [34] (малиновая линия), с панарктической реконструкцией (циановая линия) [30] и с реконструкции для центра Русской равнины (оранжевая линия) [8]

регион обладает самой высокой в нетропической зоне Северного полушария корреляцией метеорологических элементов с явлением ENSO [46].

Обсуждение

Представляется интересным сравнить полученную хронологию среднегодовых температур с другими реконструкциями. Для этой цели были использованы как недавняя региональная реконструкция для

Арктики [30], так и реконструкции для всего Северного полушария [37; 4; 22], а также для его внетропических широт (30–90° с. ш.) [34] (рис. 6).

Сразу обращает на себя внимание заметно большая изменчивость температур в нашей хронологии по сравнению с другими. Это находится в соответствии с известным эффектом арктической амплификации (увеличения амплитуды колебаний температур в высоких широтах по сравнению с Северным

полушарием), которое согласно недавним исследованиям заключено в диапазоне 1,7—3,4 [13; 36]. Что касается панарктической реконструкции Кауфмана (см. рис. 6б), то опять-таки неудивительно, что в ней колебания температур тоже выглядят весьма умеренными, так как в Восточной и Западной Арктике колебания температур сильно различаются и, более того, могут быть разнонаправлены [28]. Так как наша реконструкция относится к сравнительно небольшому региону, то здесь все климатические колебания должны быть более выраженными, что и показывает ее большая вариабельность по сравнению с остальными.

В целом все реконструкции отражают основные крупные климатические события последних двух тысячелетий: так называемый «Римский» оптимум (II—III вв. н. э.), холодную эпоху Великого переселения народов (V—VI вв.), средневековый климатический оптимум (X—XII вв.), Малый ледниковый период (XIII—XIX вв.) и, наконец, современное потепление (XX в.). Часто реконструкции совпадают и в деталях — так, все они показывают сильное потепление во второй половине X в., похолодания 1450-х и 1810-х годов, связанные с крупнейшими извержениями вулканов Кувае (1453 г.) и Тамбора (1815 г.), потепления в конце XIV и XVIII вв. и т. д.

В отличие от всех других наша хронология фиксирует быструю смену холодных и теплых эпизодов, в целом характерную для высоких широт. Гораздо более значительная по сравнению со средними широтами амплитуда температурных колебаний приводит к тому, что даже во время продолжительных холодных эпох, подобных Малому ледниковому периоду, имели место относительно кратковременные, длиной в два-четыре десятилетия, потепления (например, 1350—1370, 1400—1440, 1470—1510, 1770—1810 гг.), когда температура приближалась к современному уровню или даже превосходила его. Именно эти короткие эпизоды представляют особый интерес, поскольку именно они связаны с важными импульсами в освоении и колонизации северо-восточных окраин Европы [6]. Интересно, что по крайней мере три последних теплых эпизода находят прямое подтверждение в недавних работах, опирающихся на различные косвенные данные, результаты ранних инструментальных наблюдений и математическое моделирование [48; 18].

При сравнении нашей реконструкции с аналогичной (рис. 6б) для внетропических широт также наблюдается хорошее соответствие долгопериодной составляющей климатических изменений, правда, для абсолютных минимумов такого соответствия не наблюдается. В [34] абсолютный минимум значений приходится на рубеж XVII—XVIII вв., а в нашей реконструкции — на середину VI в. и начало XIX в. Это может быть связано отчасти с различием использованных косвенных данных, отчасти с различием регионов. Известно, например, что климатический эффект вулканических извержений гораздо сильнее

заметен в высоких широтах, а в умеренных может наблюдаться обратный эффект (потепление), особенно заметный зимой [44]. Именно этим обстоятельством может быть объяснено то, что абсолютный минимум в нашей реконструкции зафиксирован в 1810-е годы, во время самого мощного за последнее тысячелетие извержения (Тамбора, 1815 г.). Да и другие значительные похолодания также совпадают по времени с мощными извержениями (Таупо, 177 г.; Рабаул, 540 г.; неидентифицированное тропическое извержение, 639 г.; Ксудач, 900 г.; Кувае, 1453 г.; Билли Митчелл, 1580 г.; Уайнапутина, 1600 г.; Аву, 1641 г.; Тарумаи, 1739 г.; Косегуина, 1835 г.; Крака-тау, 1883 г.; Катмай, 1912 г.).

Менее значительные климатические события на региональном уровне могут заметно отличаться. Это тоже находит подтверждение в данных современной климатологии [49]. Также известно, что для междекадных и вековых изменений глобального климата решающее значение имеют радиационные факторы, в то время как для Арктики часто имеют преимущество циркуляционные факторы [52].

Сравнение реконструкции для Северо-Восточной Европы с данными по центральной России [8] также обнаруживает сходную интерпретацию крупных климатических событий, таких как средневековая теплая эпоха, малый ледниковый период и современное потепление (рис. 6б). Вместе с тем хронология для Северо-Восточной Европы показывает существенно большую дисперсию и, кроме того, довольно заметные временные отличия в декадном масштабе времени — например, сильные потепления в конце IX и на рубеже XIV—XV вв. во время прохладных эпизодов в центральной России. В том, что эти особенности не являются дефектом одной из реконструкций, а отражают действительное разнообразие климатических колебаний в этих соседних регионах, убеждают данные инструментальных наблюдений последних двух столетий, когда такие эффекты в самом деле имели место — например, резкие потепления Арктики 1860—1870-х и 1920—1940-х годов на фоне стабильного или даже холодного климата центральной России.

Заключение

Построенная в настоящей работе климатическая хронология для Северо-Восточной Европы основана на использовании косвенных данных о климате — дендрохронологической, палинологической и исторической информации. По-видимому, она корректно отражает климатическую историю этого региона за последние два тысячелетия и может быть использована для построения сравнительной хронологии климатических и исторических событий, что и было сделано в нашей недавней работе [6]. Было построено несколько вариантов реконструкции, из которых в качестве базового может рассматриваться один, в максимальной степени аккумулирующий сведения о колебаниях климата Северо-Восточной Европы

Научные исследования в Арктике

в современную эпоху, исторический период, а также в геологическом масштабе времени. Сравнение новой реконструкции декадных значений среднегодовой температуры с региональными и полушарными реконструкциями показывает, что крупные климатические события, такие как «Римский» оптимум (II—III вв. н. э.), холодная эпоха Великого переселения народов (V—VI вв.), средневековый климатический оптимум (X—XII вв.), малый ледниковый период (XIII—XIX вв.) и, наконец, современное потепление (XX в.), проявлялись в масштабах как всего Северного полушария, так и его отдельных регионов. При этом менее значительные, десятилетние и мультидекадные, климатические изменения на региональном уровне могут существенно отличаться от общей климатической картины в полушарии. Построенная хронология обладает заметно большей амплитудой изменчивости по сравнению с другими реконструкциями, что объясняется, во-первых, эффектом арктической амплификации, во-вторых, относительно небольшими размерами региона исследования, где климатические изменения почти синхронны на всей его территории, а значит, не сглаживают друг друга при осреднении.

Авторы выражают искреннюю благодарность Фонду Александра фон Гумбольдта (Германия). Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации и РФФИ (гранты № 11-08-01228, 12-08-00367). Исследование частично поддержано грантом президента России МК-7354.2013.5.

Литература

1. Климанов В. А., Хотинский Н. А., Благовещенская Н. В. Колебания климата за исторический период в центре Русской равнины // Изв. РАН. Сер. географ. — 1995. — № 1. — С. 89—96.
2. Клименко В. В. О главных климатических ритмах голоцена // Доклады РАН. — 1997. — Т. 357, № 3. — С. 399—402.
3. Клименко В. В. Комплексная реконструкция климата российской Арктики в XV—XX вв. // Вестн. МГУ. Сер. 5. География. — 2007. — № 6. — С. 16—24.
4. Клименко В. В. Климат: непрочитанная глава истории. — М.: Изд. дом МЭИ, 2009.
5. Клименко В. В. Почему замедляется глобальное потепление? // Доклады РАН. — 2011. — Т. 440, № 4. — С. 536—539.
6. Клименко В. В., Мацновский В. В., Пахомова Л. Ю. Колебания климата высоких широт и освоение Северо-Восточной Европы в Средние века // История и современность. — 2012. — № 2. — С. 130—163.
7. Клименко В. В., Микушина О. В. История и прогноз изменений климата в бассейне Карского и Баренцева морей // Геоэкология. — 2005. — № 1. — С. 43—49.
8. Клименко В. В., Слепцов А. М. Комплексная реконструкция климата Восточной Европы за последние 2000 лет // Изв. РГО. — 2003. — Вып. 6. — С. 45—53.
9. Окладников А. П. Русские полярные мореходы XVII века у берегов Таймыра. — М.: Мор. транспорт, 1957.
10. Слепцов А. М. Разработка методов анализа и обобщения палеоклиматических данных (история климата Восточной Европы в последние два тысячелетия): Дис.... канд. техн. наук. — М.: МЭИ, 2002. — 189 с.
11. Aimers J., Hodell D. Societal collapse: Drought and the Maya. // Nature. — 2011. — Vol. 479, № 7371. — P. 44—45.
12. Andreev A. A., Klimanov V. A. Quantitative Holocene climatic reconstruction from Arctic Russia // J. Paleolimnol. — 2000. — Vol. 24, № 1. — P. 81—91.
13. Bekryaev R. V., Polyakov I. V., Alexeev V. A. Role of polar amplification in long-term surface air temperature variations and modern Arctic warming // J. Climate. — 2010. — Vol. 23, № 14. — P. 3888—3906.
14. Briffa K. R., Melvin T. M. A closer look at Regional Curve Standardization of tree-ring records: justification of the need, a warning of some pitfalls, and suggested improvements of its application // Dendroclimatology: Progress and prospects / M. K. Hughes, H. F. Diaz, T. W. Swetnam (eds.). — Berlin: Springer-Verl., 2010. — P. 9—41.
15. Bunn A. G., Sharac T. J., Graumlich L. J. A simulation model to compare methods of tree-ring detrending and to investigate the detectability of low-frequency signals // Tree-Ring Res. — 2004. — Vol. 60, № 2. — P. 77—90.
16. Büntgen U., Tegel W., Nicolussi K. et al. 2500 years of European climate variability and human susceptibility // Science. — 2011. — Vol. 331, № 6017. — P. 578—582.
17. Cook E. R., D'Arrigo R. D., Mann M. E. A well-verified, multiproxy reconstruction of the winter North Atlantic Oscillation Index since A.D. 1400 // J. of Climate. — 2002. — Vol. 15, № 13. — P. 1754—1764.
18. Crespin E., Goosse H., Fichet F. T., Mann M. E. The 15th century Arctic warming in coupled model simulations with data assimilation // Climates of the Past. — 2009. — Vol. 5, № 3. — P. 389—401.
19. Cullen H.M., de Menocal P. B., Hemming S. et al. Climate change and the collapse of the Akkadian empire: Evidence from the deep sea // Geology. — 2000. — Vol. 28, № 4. — P. 379—382.
20. Delworth T. L., Mann M. E. Observed and simulated multidecadal variability in the Northern Hemisphere // Climate Dynamics. — 2000. — Vol. 16, № 9. — P. 661—676.
21. Dovgalyuk V. V., Klimenko V. V. On long-term variations in the intensity of El Niño occurrences // Geophysical Research Letters. — 1996. — Vol. 23, № 25. — P. 3771—3774.
22. 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, № 5563. — P. 2250—2253.

23. Fang J.-Q., Liu G. Relationship between climatic change and the nomadic southward migration in eastern Asia during historical times // *Climatic Change*. — 1992. — Vol. 22, № 2. — P. 151—169.
24. Fyodorov M. V., Klimenko V. V., Dovgalyuk V. V. Sunspot minima dates: A secular forecast // *Solar Physics*. — 1996. — Vol. 165, № 1. — P. 193—199.
25. Gurskaya M., Hallinger M., Singh J. et al. Temperature reconstruction in the Ob River valley based on ring widths of three coniferous tree species // *Dendrochronologia*. — 2012. — Vol. 30, № 4. — P. 302—309.
26. Hantemirov R. M., Shiyatov S. G. A continuous multimillennial ring-width chronology in Yamal, northwestern Siberia // *Holocene*. — 2002. — Vol. 12, № 6. — P. 717—726.
27. Hodell D. A., Curtis J. H., Brenner M. Possible role of climate in the collapse of Classic Maya civilization // *Nature*. — 1995. — Vol. 375, № 6530. — P. 391—394.
28. Hurrell J. W. Decadal Trends in the North Atlantic Oscillation: Regional Temperatures and Precipitation // *Science*. — 1995. — Vol. 269, № 5224. — P. 676—679.
29. Jones P. D., Briffa K. R., Osborn T. J. et al. High-resolution palaeoclimatology of the last millennium: a review of current status and future prospects // *Holocene*. — 2009. — Vol. 19, № 1. — P. 3—49.
30. Kaufman D. S., Schneider D. P., McKay N. P. et al. Recent Warming Reverses Long-Term Arctic Cooling // *Science*. — 2009. — Vol. 325, № 5945. — P. 1236—1239.
31. Klimenko V. V. A Composite Reconstruction of the Russian Arctic Climate Back to A.D. 1435. — Chap. 3 // *The Polish Climate in the European Context: An Historical Overview* / Eds. R. Przybylak, J. Majorowicz, R. Brázdil, M. Kejna. — Berlin: Springer, 2010. — P. 295—326.
32. Klingbjør P., Moberg A. A composite monthly temperature record from Tornedalen in Northern Sweden // *Intern. J. of Climatology*. — 2003. — Vol. 23, № 12. — P. 1465—1494.
33. Lee T. C. K., Zwiers F. C., Tsao M. Evaluation of proxy-based millennial reconstruction methods // *Clim. Dyn.* — 2008. — Vol. 31, № 2—3. — P. 263—281.
34. Ljungqvist F. C. A new reconstruction of temperature variability in the extra-tropical Northern Hemisphere during the last two millennia // *Geogr. Ann.* — 2010. — Vol. 92A, № 3. — P. 339—351.
35. Mann M. E., Zhang Z., Hughes M. K. et al. Proxy-based reconstructions of hemispheric and global surface temperature variations over the past two millennia // *PNAS*. — 2008. — Vol. 105, № 36. — P. 13252—13257.
36. Miller G. H., Alley R. B., Brigham-Grette J. et al. Arctic amplification: can the past constrain the future? // *Quat. Science Rev.* — 2010. — Vol. 29, № 15—16. — P. 1779—1790.
37. 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, № 7026. — P. 613—617.
38. Naurzbaev M. M., Vaganov E. A., Sidorova O. V., Schweingruber F. H. Summer temperatures in eastern Taimyr inferred from a 2427-year late-Holocene tree-ring chronology and earlier floating series // *The Holocene*. — 2002. — Vol. 12, № 6. — P. 727—736.
39. Patten W. P., Dietrich K. A., Holmden C., Andrews J. T. Two millennia of North Atlantic seasonality and implications for Norse colonies // *PNAS*. — 2010. — Vol. 107, № 12. — P. 5306—5310.
40. Peterson T. C., Vose R. S. An overview of the Global Historical Climatology Network temperature database // *Bull. of the American Meteorological Society*. — 1997. — Vol. 78, № 12. — P. 2837—2849.
41. Reimer P. J., Baillie M. G. L., Bard E. et al. IntCal09 and Marine09 Radiocarbon Age Calibration Curves, 0-50,000 Years cal BP // *Radiocarbon*. — 2009. — Vol. 51, № 4. — P. 1111—1150.
42. Salonen J. S., Seppä H., Välranta M. et al. The Holocene thermal maximum and Late-Holocene cooling in the tundra of NE European Russia // *Quat. Res.* — 2011. — Vol. 75, № 6. — P. 501—511.
43. Schlesinger M. E., Ramankutty N. An oscillation in the global climate system of period 65—70 years // *Nature*. — 1994. — Vol. 367, № 6465. — P. 723—726.
44. Shindell D. T., Schmidt G. A., Mann M. E., Faluvegi G. Dynamic winter climate response to large tropical volcanic eruptions since 1600 // *J. Geophys. Res.* — 2004. — Vol. 109, № D05104. — doi:10.1029/2003JD004151.
45. Stuiver M., Braziunas T. F. Evidence of solar activity variations // *Climate since A.D. 1500* / Eds. R. S. Bradley and P. D. Jones. — London; New York: Routledge, 1995. — P. 593—605.
46. Trenberth K. E. Spatial and temporal variations of the Southern Oscillation // *Quart. J. Royal Met. Soc.* — 1976. — Vol. 102, № 433. — P. 639—653.
47. Velichko A. A., Andreev A. A., Klimanov V. A. Climate and vegetation dynamics in the tundra and forest zone during the Late Glacial and Holocene // *Quat. Int.* — 1997. — Vol. 41/42. — P. 71—96.
48. Vinther B. M., Andersen K. K., Jones P. D. et al. Extending Greenland temperature records into the late eighteenth century // *J. of Geophys. Res.* — 2006. — Vol. 111, № 1105. — doi:10.1029/2005JD006810.
49. Wanner H., Beer J., Butikofer J. et al. Mid- to Late Holocene climate change: an overview // *Quaternary Science Rev.* — 2008. — Vol. 27, № 19—20. — P. 1791—1828.
50. Weiss B. The decline of the Late Bronze Age civilization as a possible response to climate change // *Climatic Change*. — 1982. — Vol. 4, № 1. — P. 173—198.
51. Winton M. Amplified Arctic climate change: What does surface albedo feedback have to do with it? // *Geophys. Res. Lett.* — 2006. — Vol. 33. — L03701. — doi:10.1029/2005GL025244.
52. Yamanouchi T. Early 20th century warming in the Arctic: A review // *Polar Science*. — 2011. — Vol. 5, № 1. — P. 53—71.