УДК 550.361; 551.583.2

КОМПЛЕКСНЫЕ ГЕОТЕРМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В СКВАЖИНЕ KUN-1 (О. КУНАШИР). ЧАСТЬ II: ОБОБЩЕННАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПО ГЕОТЕРМИЧЕСКИМ И ДРЕВЕСНО-КОЛЬЦЕВЫМ ДАННЫМ

Демежко Д.Ю. **–** Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург
Соломина О.Н. **–** Институт географии РАН, Москва

Аннотация. Проанализированы скважинные температурные и древесно-кольцевые данные на о. Кунашир с целью реконструкции вариаций температуры земной поверхности за последние 400 лет. Геотермическая реконструкция выявила холодный период (1600 – вторая половина 19 века) со средней температурой около 3 ºС, совпадающий с малым ледниковым периодом. Последовавшее затем потепление привело к повышению средней температуры до 6 ºС во второй половине 20 века. Древесно-кольцевые хронологии содержат вариации индексов прироста длительностью от года до нескольких десятилетий с преобладанием 30-50 летних, но, в отличие от геотермических, не выявили сколь-нибудь значимых вековых трендов. Предложен метод интеграции двух палеоклиматических свидетельств. Обобщенная кривая содержит как вековые температурные вариации, так и колебания длительностью в несколько десятилетий. Максимумы температуры поверхности (1600, 1638, 1677, 1722, 1770, 1801, 1827, 1850, 1884, 1925 гг., 1954-1973 гг и начиная с 2001 г.) совпадают с «холодной» фазой десятилетней тихоокеанской осцилляции (PDO).

Скважинные температуры, температурная история земной поверхности, древесно-кольцевые данные, обобщенная палеоклиматическая реконструкция, о.Кунашир.

COMPLEX GEOTHERMAL INVESTIGATIONS IN THE BOREHOLE KUN-1 (KUNASHIR ISLAND). PART II: INTEGRATED RECONSTRUCTION OF GROUND SURFACE TEMPERATURE CHANGES INFERRED FROM GEOTHERMAL AND TREE-RING DATA

Demezhko D.Yu. – Institute of Geophysics UB of RAS, Yekaterinburg
Solomina O.N. – Institute of Geography RAS, Moscow

Abstract. Borehole temperatures and oak's tree-ring data in Kunashir were analyzed in order to reconstruct ground surface temperature variations in the last four centuries. Borehole reconstruction reveals a cold period with mean annual temperature equal to 3˚C from AD1600 to the second half of 19th century, which coincides with the Little Ice Age. The subsequent warming resulted in the increase of mean annual temperature up to more than 6˚C by the end of 20th century. Tree-ring chronology shows a strong annual and multidecadal variability with the predominance of periods 30-50 years long. Unlike the borehole reconstruction tree-ring chronology does not demonstrate any century-long trends. However both reconstructions reproduce the cooling in 1970s-early 1990s. The method of integration of the two paleoclimatic proxies is proposed. The integrated curve of surface temperature retains both centennial and multidecadal temperature variations, and the amplitudes of these variations are commensurable. According to our reconstruction the peaks of surface temperature in Kunashir were centered near 1600, 1638, 1677, 1722, 1770, 1801, 1827, 1850, 1884, 1925, during 1954-1973 and since the year 2001, and they broadly correspond to the "cool" PDO (Pacific Decadal Oscillation) phases.

Borehole temperatures, ground surface temperature history, tree-rings data, integrated paleoclimate reconstruction, Kunashir Island.

Введение

В первой части настоящего исследования (Демежко и др., 2009) было показано, что в распределении температур по скважине Kun-1 существенную роль играют палеоклиматические изменения температуры земной поверхности. Реконструкция температурной истории земной поверхности по данным термометрии скважин становится одной из главных задач современной геотермии (Bodri and Cermak, 2007). В то же время остается нерешенной проблема интеграции геотермических реконструкций в «большую» палеоклиматологию.

Эффективным способом преодоления этой проблемы является создание алгоритмов получения обобщенных реконструкций, объединяющих различные палеоклиматические источники.

Алгоритмы объединения призваны сохранить преимущества каждого источника и подавить шумы неклиматической природы. Особенно часто объединяют т.н. косвенные (proxy) источники – споро-пыльцевые, древесно-кольцевые, данные об изотопном составе кислорода в ледовых и океанических кернах и др. (Mann et al., 1998; Crowley and Lowery, 2000; Briffa et al., 2001; Moberg et al., 2005). Косвенные источники, как правило, хорошо датированы и обладают высокой чувствительностью к короткопериодным климатическим изменениям. В то же время они нередко содержат не зависящие от климатических изменений тренды (например, связанные с оседанием илов, растеканием ледника, биологическим старением дерева). При учете этих трендов, весьма приблизительно описываемых моделями, зачастую теряется и низкочастотный климатический сигнал (Изменчивость климата…, 1995). Для оценки характеристик палеоклимата по ряду косвенных параметров необходимо произвести калибровку, то есть установить корреляционные соотношения между измеряемыми величинами и какой-либо из характеристик современного климата. При этом предполагается, что в прошлом эти соотношения были такими же, как и в настоящем.

Реконструкция температуры земной поверхности по геотермическим данным, в отличие от косвенных свидетельств палеоклимата, не требует калибровки, поэтому геотермический источник палеоклимата называют «прямым» (Bodri and Cermak, 2007). Однако геотермическому методу присущи другие недостатки, от которых в большинстве своем свободны косвенные климатические индикаторы. В первую очередь это плохая временная привязка реконструированных событий, зависящая от эффективной температуропроводности пород (параметра, значение которого, как правило, известно лишь приблизительно). Другим недостатком (или особенностью метода) является неравномерное временное разрешение, которое к тому же ухудшается по мере удаления в прошлое. В (Демежко, 2001) для оценки разрешающей способности метода было предложено использовать параметр «относительная продолжительность климатического эпизода» $h=(t_s-t_f)/t_s$, где t_s и t_f – время, прошедшее соответственно от начала и окончания климатического эпизода до момента измерений. В геотемпературном поле разделяются лишь те эпизоды, для которых $\eta \geq 0{,}5$. Поэтому для геотермических реконструкций естественной является логарифмическая временная шкала, отсчитываемая от даты каротажа, а не календарные годы. В работе (Clow, 1992) минимально разрешаемый временной интервал формулируется как интервал, в пределах которого происходит осреднение реальной температурной истории при ее реконструкции.

Таким образом, геотермические и косвенные данные в смысле палеоклиматической информативности взаимно дополняют друг друга. Проблема состоит в разработке наиболее эффективных и физически обоснованных алгоритмов объединения. Существующие немногочисленные примеры объединения косвенных и геотермических данных (Cuffey et al., 1995; Salamatin, 2001; Huang and Pollack, 2001) представляют, по сути, калибровку первых по вторым. В первых двух цитируемых работах рассматривались ряды соотношений тяжелого и легкого изотопов кислорода в ледовых кернах Гренландии и Антарктиды, в третьей – дендрохронологии. Исходный неоткалиброванный ряд косвенных данных с неизвестным пересчетным коэффициентом использовался в качестве вынуждающей функции (forcing function) изменения температуры земной поверхности, в соответствии с которой рассчитывалась температурная аномалия на различных глубинах. Значение пересчетного коэффициента подбиралось таким образом, чтобы рассчитанная аномалия наилучшим образом в заданной метрике соответствовала измеренной. Главное достоинство этого подхода – про-

стота: при его реализации нет необходимости реконструировать температурную историю земной поверхности по скважинной термограмме, поэтому он свободен от неоднозначностей, связанных с решением обратной задачи геотермии. Обобщенная климатическая кривая представляет собой ту же самую исходную, но уже в температурной шкале. Отметим, что при калибровке по геотермическим данным обычно получают более высокие амплитуды температурных колебаний, чем при традиционной калибровке – по метеорологическим данным. На этом достоинства подхода заканчиваются. К его недостаткам можно отнести следующие: во-первых, калибруются все гармоники исходного ряда, в том числе короткопериодные, чей тепловой след в современном температурном поле давно исчез. Следовательно, данные геотермии не могут на них распространяться. Во-вторых, преобразование климатического сигнала в его косвенное свидетельство сопровождается подавлением низких частот. Если длиннопериодная компонента в исходном ряде отсутствует, она не появится и в откалиброванном. Таким образом, большая часть полезной информации, содержащейся в геотермических данных, остается невостребованной, а оставшаяся – используется не по назначению.

В настоящей статье обсуждаются методика объединения древесно-кольцевых и геотермических данных, отличная от традиционного подхода, и полученная с ее помощью реконструкция долговременных (от десятилетних до столетних) изменений температуры земной поверхности на о. Кунашир. В кратком изложении методика опубликована в (Демежко, Соломина, 2009).

Геотермическая реконструкция

Температурная аномалия по скважине Kun-1 с поправками, учитывающими влияния гидрогеологии и рельефа, приведена на рис. 1 (кружки). Для оценки температурной истории земной поверхности применялся инверсионный алгоритм, (Demezhko, Shchapov, 2001; Демежко, 2001), базирующийся на аппроксимации неизвестной температурной истории земной поверхности ступенчатой функцией с постоянной температурой в пределах каждого временного интервала, расчете соответствующей температурной аномалии и минимизации суммы квадратов отклонений измеренных температур от теоретических. Устойчивость решения в этом алгоритме обеспечивается прогрессивно увеличивающейся по мере удаления в прошлое длительностью временных интервалов (иными словами, ин-

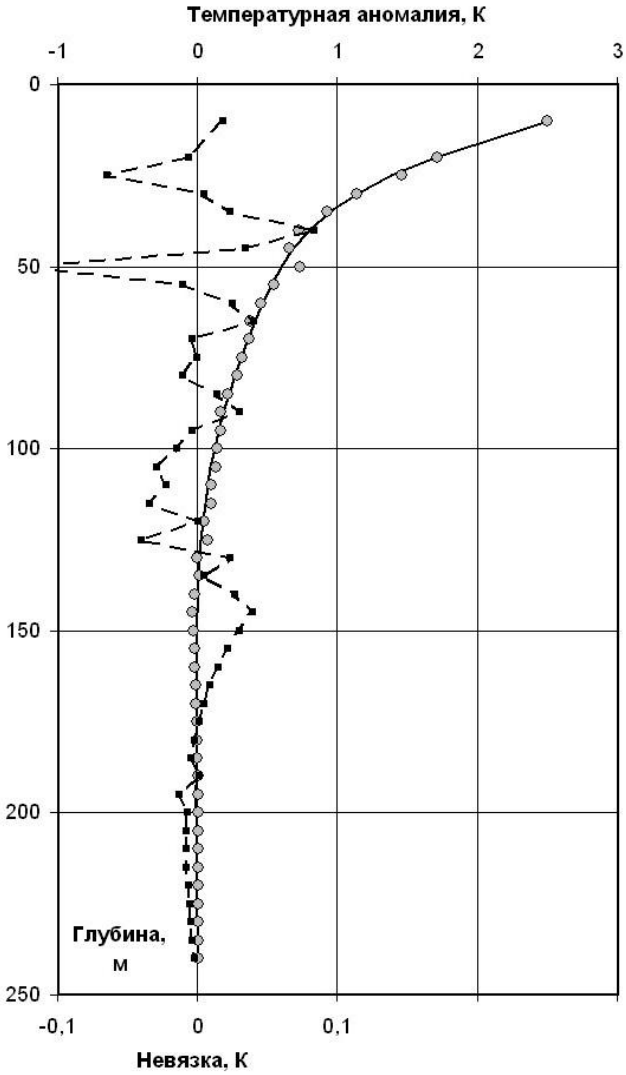

Рис. 1. Температурная аномалия по скважине Kun-1, обусловленная влиянием палеоклимата (с введенными поправками, учитывающими влияния рельефа, гидрогеологии и сезонных изменений температуры поверхности) – кружки. Результаты подбора температурной аномалии (при 15 скачках температурной истории) – сплошная линия. Невязка (разность между подобранными и измеренными температурами) – пунктир

тервалов осреднения палеотемператур). Последовательно изменяя температуры земной поверхности в пределах каждого интервала, подбиралась серия эквивалентных температурных историй, которые при минимальном количестве временных интервалов позволяют эффективно (т.е. с минимальной погрешностью) объяснить измеренную термограмму. Один из вариантов подбора (при 15 скачках температурной истории) обозначен сплошной линией на рис. 1. Соответствующая этому варианту невязка (разность между подобранными и измеренными значениями температуры) приведена пунктиром. По семейству эквивалентных температурных историй оценивалась наиболее вероятная (средняя) история и степень неопределенности решения (рис. 2). Временна́я шкала полученной истории определяется коэффициентом температуропроводности туфов, значение которого (a=(0,63±0,1)·10^{-6} м^2/с) в нашем случае было определено для верхнего слоя пород (0,4 м) по характеру затухания и сдвигу фазы суточных колебаний температуры. Впрочем, оно оказалось близко к лабораторной оценке температуропроводности раздробленных туфов – (0,50-0,66)·10^{-6} м^2/с (Ryder et al., 1996).

Реконструированная кривая обнаруживает достаточно высокую амплитуду низкочастотных колебаний температуры земной поверхности. Наиболее холодные климатические условия (~3 ºС) просуществовали на острове с 17-го до конца 19-го века. Этот интервал хорошо соотносится с известным в Европе малым ледниковым периодом. Потепление, начавшееся во второй половине 19 века, к настоящему времени увеличило среднюю температуру поверхности на 3,6 ºС. Лишь в период 1960 – 1984 гг. тенденция потепления сменилась похолоданием, максимальная амплитуда которого достигла 1,5 ºС, после чего потепление продолжилось. Реконструированная нами температурная история подтверждает многочисленные свидетельства существования малого ледникового периода в восточной Азии, правда, в основном, относящиеся к ее континентальной части. Ближайшая к острову Кунашир геотермическая реконструкция была получена в

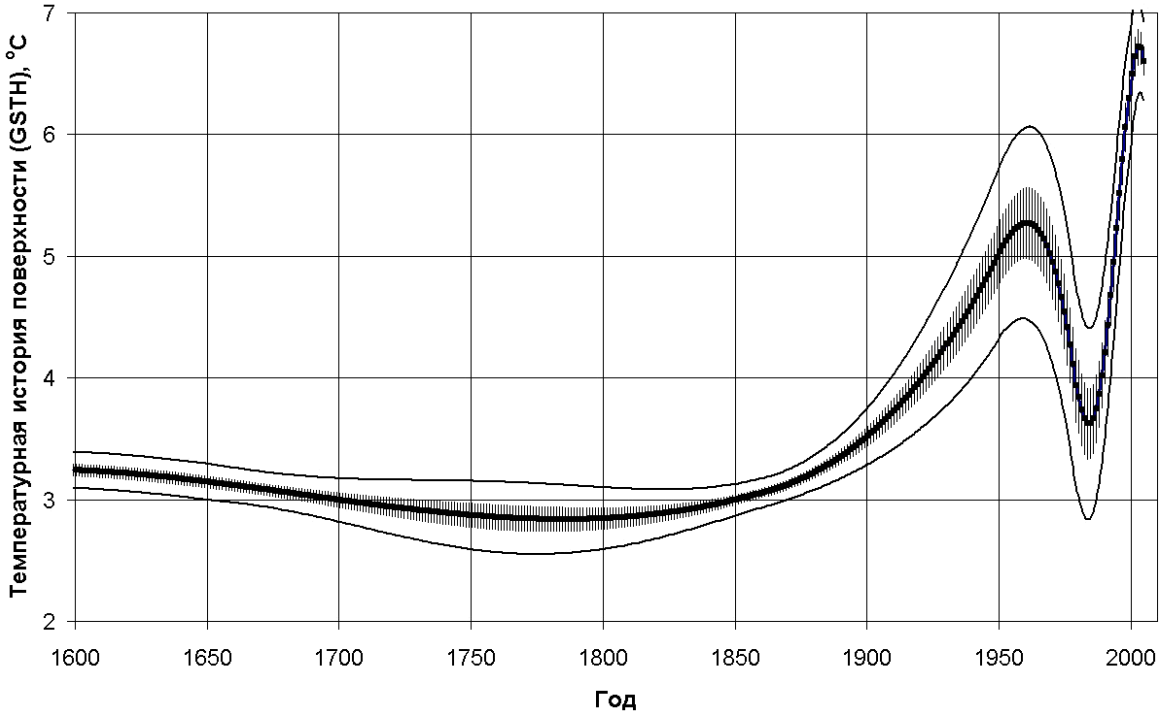

Рис. 2. Геотермическая реконструкция температурной истории земной поверхности по термограмме скважины Kun-1 (a=0,63·10^{-6} м^2/с): центральная жирная кривая – наиболее вероятная история; ограничивающие кривые – ± одно стандартное отклонение температуры, оцененное по семейству 7 эквивалентных историй; вертикальные линии – ± погрешность оценки среднего

центральной Японии, в районе оз. Бива (Goto et al., 2003); она также фиксирует малый ледниковый период, достигший кульминации к 1700 г., и последующее потепление, амплитуда которого достигает 5 ºС.

Древесно-кольцевые данные и хронология

В нашем исследовании использованы данные и хронологии, ранее опубликованные в (Jacoby et al., 2004). Участок сбора образцов древесины дуба (Quercus crispula) для дендроклиматического анализа располагался на о. Кунашир в 37 км к юго-западу от поселка Южно-Курильск на расстоянии 1 км от тихоокеанского побережья (43º53´ с.ш., 145º36´ в.д), в местности, известной как «Брянский лес».

В июле 2001 г. были отобраны образцы (керны) древесины от 34 деревьев. В обобщенную 400-летнюю хронологию вошли данные по 30 кернам от 20 деревьев. Тестирование данных на точность временной привязки (перекрестное датирование годичных колец) проводилось по программе COFECHA (Holmes, 1983), индексы прироста (рис. 3) рассчитаны с помощью алгоритма ARSTAN (Cook, 1985; Cook and Kairiukstis, 1990). Применение алгоритма ARSTAN позволяет сохранить внутривековую изменчивость, но уничтожает большую часть низкочастотных колебаний, присутствующих в исходных данных. Неудивительно поэтому, что спектральный анализ этой кривой, показал отсутствие гармоник с периодами более 50 лет и сколь-нибудь значимых трендов (Jacoby et al., 2004). На первый взгляд, геотермическая реконструкция и древесно-кольцевая хронология имеют мало общего; единственное совпадение – минимум между 1970 и 2000 гг., проявившийся на обеих кривых.

Обобщенная реконструкция

Объединение геотермических и древесно-кольцевых данных основано на предположении, что в ряду метеорологических факторов, определяющих годовой прирост древесины, существенную роль играет среднегодовая температура почвы, следовательно, индексы прироста могут быть откалиброваны с помощью геотермической реконструкции температурной истории земной поверхности. Влияние температур почвы на радиальный прирост лиственницы и сосны, в частности, отмечалось в Якутии (Николаев, 2005). Корректная калибровка требует приведения обеих кривых к общему виду. Для этого из ис-

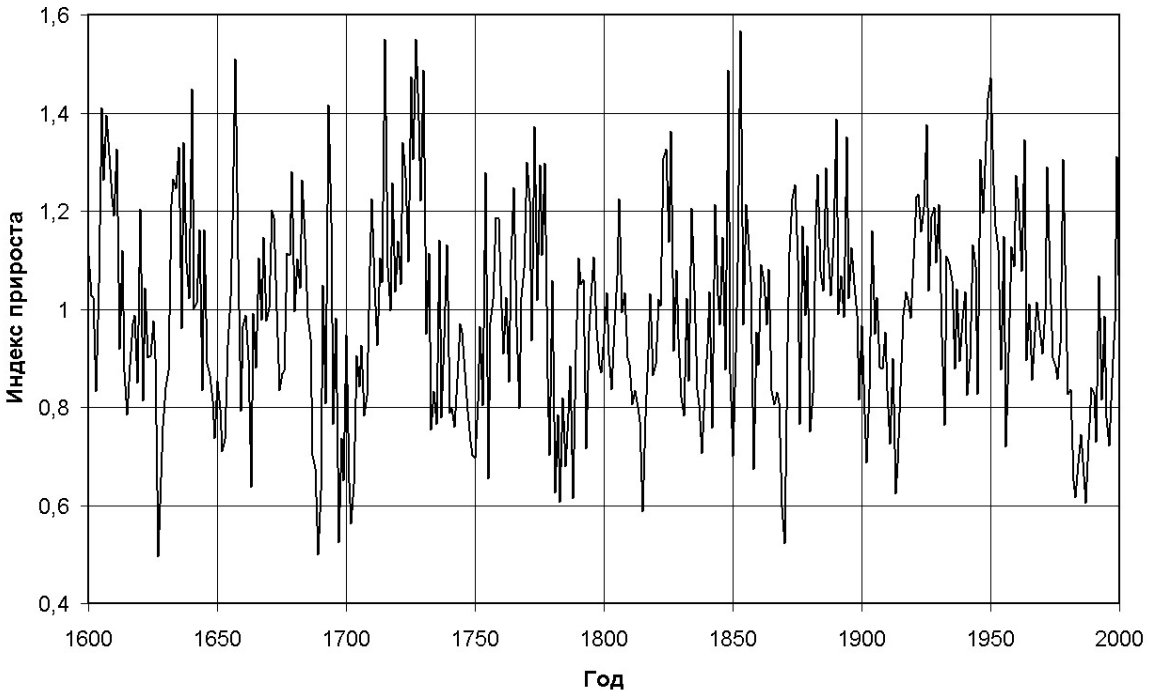

Рис. 3. Древесно-кольцевая Arstan–хронология по дубу (участок «Брянский лес») (Jacoby et al., 2004)

ходной кривой индексов прироста необходимо удалить высокочастотные компоненты, чей тепловой след уже исчез в современном температурном поле. Так как геотермическая кривая изначально подбиралась в прогрессивно увеличивающихся временных интервалах, достаточно сгладить кривую индексов в скользящих окнах переменной ширины:

$$I_V(t) = \sum_{t^*=t-[(t_c-t)/3]}^{t^*=t+[(t_c-t)/3]} I_0(t^*) \Bigg/ \left[\frac{2}{3}(t_c - t)\right], \qquad (1)$$

где t, t^* – календарный год, t_c – год проведения термокаротажа, [·] – оператор округления до ближайшего целого.

На сглаженной таким способом кривой (рис. 4, кривая 1) уверенно выделяется единственный минимум во второй половине 20 века, примерно соответствующий геотермическому. Максимальное совпадение двух кривых происходит, если принять значение эффективной температуропроводности пород равным $0{,}7 \cdot 10^{-6}$ м^2/с (вместо изначальных $0{,}63 \cdot 10^{-6}$ м^2/с) и соответственно перестроить временную шкалу геотермической реконструкции (рис. 5).

Величина пересчетного коэффициента k_1 [^{0}С/индекс] определяется из уравнения линейной регрессии: $T_s = k_1 I_V + k_2$. Она существенно зависит от выбора временного интервала, на котором производится калибровка (рис. 5, табл. 1). Величина коэффициента аппроксимации R^2 закономерно увеличивается при сужении интервала калибровки.

Полученные закономерности можно распространить в прошлое, но лишь на те же гармоники древесно-кольцевой хронологии, которые были откалиброваны. Для этого проводилось осреднение исходной кривой I_0, но уже в скользящем окне постоянной ширины. Ширина окна (15 лет) была подобрана так, чтобы в интервале калибровки две кривые – сглаженная окном переменной (I_V) и постоянной (I_c) ширины – были максимально близки (рис. 4). Разность $I_C(t)$-$I_V(t)$ характеризует дополнительную палеоклиматическую информацию, отсутствующую в геотермической реконструкции. Геотермические и древесно-кольцевых данные объединялись в соответствии с очевидным соотношением:

$$T_S^{\Sigma}(t) = T_S(t) + k_1(I_C(t) - I_V(t)), \qquad (2)$$

Обобщенная кривая изменения температуры земной поверхности (рис. 6) сохраняет как вековые температурные тренды, так и вариации, длительностью в несколько десятилетий. Амплитуды последних меняются от 1 до 3-3,5 ^{0}С и сопоставимы с амплитудой вековых изменений. Для срав-

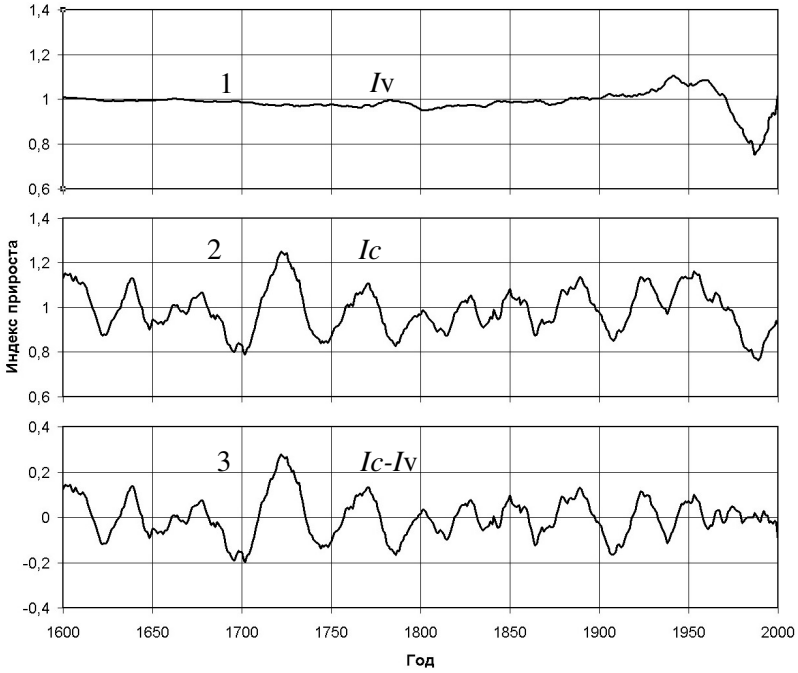

Рис. 4. Хронологии, полученные в результате сглаживания кривой, представленной на рис. 3:
1 – после сглаживания в окне переменной ширины (согласно зависимости 1); 2 – после сглаживания 15-летним окном, 3 – разность двух кривых

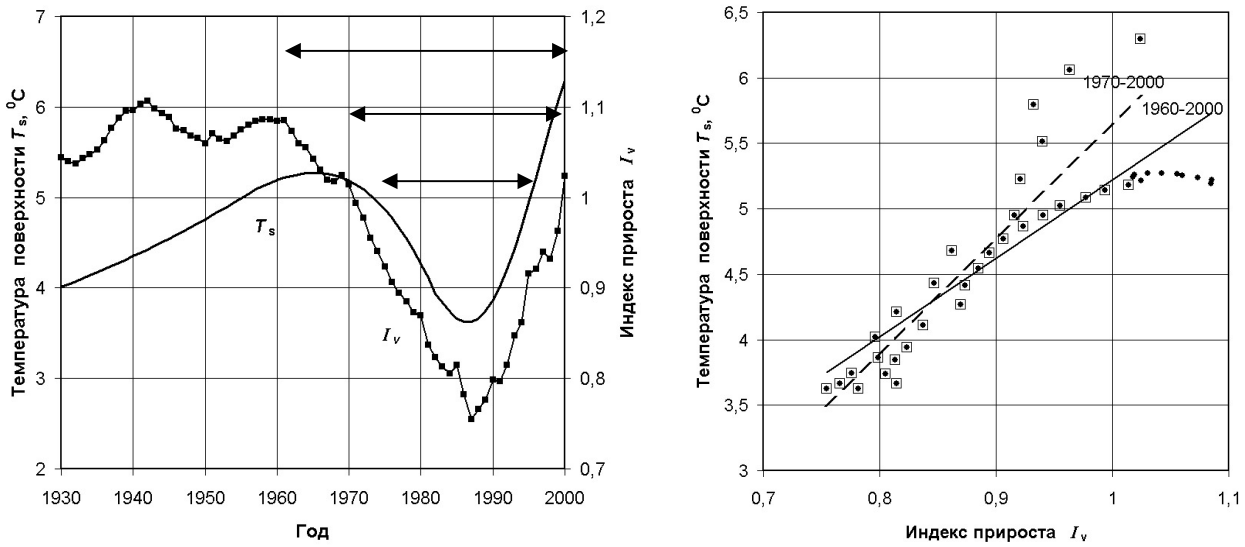

Рис. 5. Калибровка древесно-кольцевой хронологии по геотермическим данным. Выбор интервала калибровки (левый рисунок) и линейные регрессионные зависимости (правый рисунок): точки и сплошная линия – 1960-2000 гг., квадраты и штриховая линия – 1970-2000 гг.

нения: ранее при калибровке древесно-кольцевых хронологий по метеоданным (средним значениям максимальных суточных температур воздуха за четыре месяца – с июня по сентябрь – Jacoby et al., 2004) были получены в 2-2,5 раза более низкие значения амплитуд колебаний с периодом в несколько десятилетий.

Таблица 1. Результаты подбора линейной регрессионной зависимости между геотермическими и древесно-кольцевыми данными

временной интервал	k_1	k_2	R^2
1960 – 2000 гг.	5,98	-0,76	0,73
1970 – 2000 гг.	8,84	-3,19	0,83

Обсуждение и выводы

Прибрежные районы северо-западной части Тихого океана довольно бедны палеоклиматическими свидетельствами. Климат этих районов формируется во многом благодаря океану – его атмосферной циркуляции и течениям. Механизмы формирования морского климата существенно отличаются от континентальных.

В климатической изменчивости Тихого океана ключевую роль играет т.н. десятилетняя осцилляция (Pacific Decadal Oscillation – PDO), определяющая пространственное и сезонное перераспределение температур воздуха, поверхностных вод и осадков. Присутствующие в древесно-кольцевой хронологии гармоники с периодами 40-50 и 5,5 лет, вероятно, напрямую связаны с этим явлением, в чьем спектре наиболее заметно представлены колебания с периодами 33-50 и 5,3-6,1 лет (Jacoby et al., 2004). Осцилляции с периодом в несколько десятилетий реконструировались по древесно-кольцевым данным на тихоокеанском побережье в Калифорнии (Biondi, 2001). В меньшей степени они выражены во внутренних районах Хоккайдо и Камчатки (данные – D'Arrigo et al., 1997; Gostev et al, 1996; анализ – Jacoby et al., 2004).

Помимо регионального влияния, длиннопериодная компонента реконструированной кривой демонстрирует изменения, весьма близкие к тем, что происходили в других частях света, например, в Европе, включая малый ледниковый период и потепление, начавшееся во второй половине 19 века. Присутствие этих эпизодов климатической истории на северо-западе Тихого океана подтверждается геотермическими данными (Goto et al., 2003; Cermak et. al., 2006), реконструкциями, выполненными

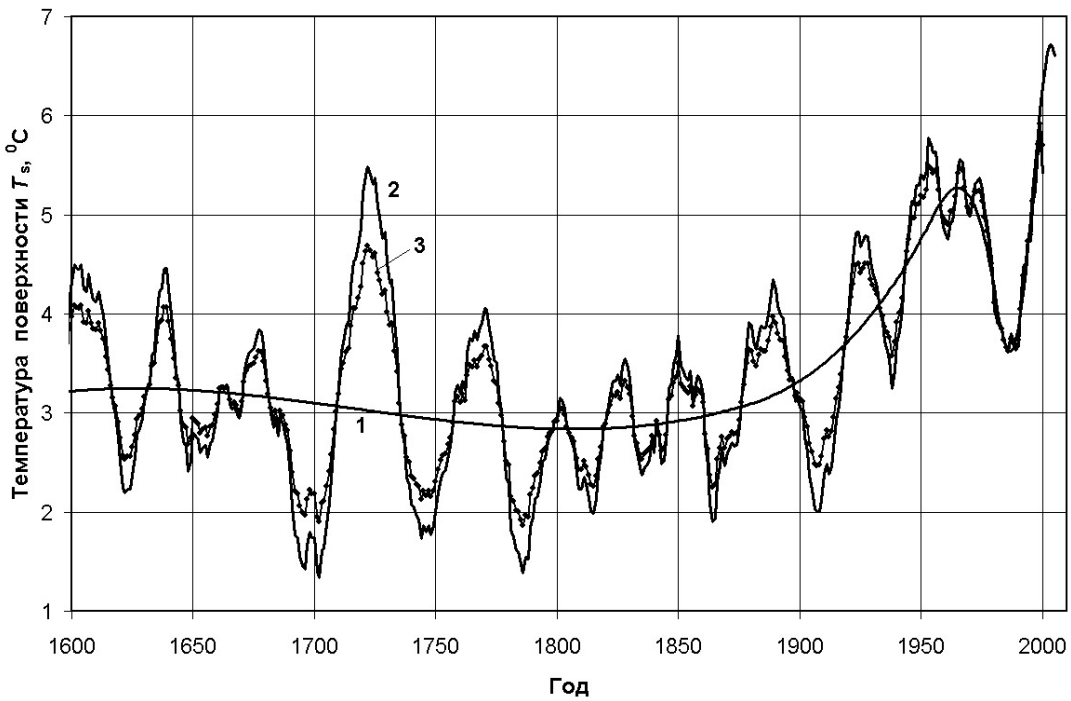

Рис. 6. Обобщенная реконструкция изменения температуры земной поверхности на о. Кунашир за последние 400 лет по геотермическим и древесно-кольцевым данным: 1 – геотермическая реконструкция (при $a=0,7\cdot10^{-6}$ м^2/с); 2, 3 – обобщенные реконструкции для различных значений пересчетного коэффициента ($k_1=8,84$ – кривая 2, $k_1=5,98$ – кривая 3)

по данным об изменениях изотопа ^{13}C в древесине японского кедра (Kitagawa and Matsumoto, 1995), анализом диатомовых водорослей и интенсивности эоловой аккумуляции (Razjigaeva et al., 2002; Razjigaeva et al., 2004).

Одновременное проявление в обобщенной реконструкции региональной и глобальной компонент изменчивости и высокие амплитуды реконструированных температур земной поверхности требуют, тем не менее, дополнительного обсуждения и обоснования. При этом необходимо учесть, что температура земной поверхности формируется при участии большего числа климатических факторов, нежели температура приземного воздуха. Температура земной поверхности определяется температурой воздуха, снежным покровом, осадками, инфильтрацией, испарением и вовлечением в биологические процессы дождевой воды, характером растительности. Соотношение и роль этих факторов меняются в зависимости от географического положения и временных масштабов климатических изменений. Для короткопериодных вариаций (от первых лет – до десятилетий) в северных и умеренных широтах связь между изменениями температур воздуха и земной поверхности далеко не всегда однозначна (Majorowicz and Scinner, 1997; Majorowicz and Safanda, 2005), но уже столетние тренды, как правило, демонстрируют их полную идентичность (Gonzales-Rouco et al., 2003).

Таблица 2. Коэффициенты линейной корреляции различных метеопараметров (Немуро, Хоккайдо) с индексами тихоокеанской осцилляции (PDO) за период 1912-2001 гг.

Метеопараметр	*R*
Сумма зимних осадков (декабрь–март)	-0,68
Сумма летних осадков (июнь-сентябрь)	0,06
Годовая сумма осадков	-0,58
Среднегодовая температура воздуха	0,30
Средняя температура воздуха (июнь-сентябрь)	0,35

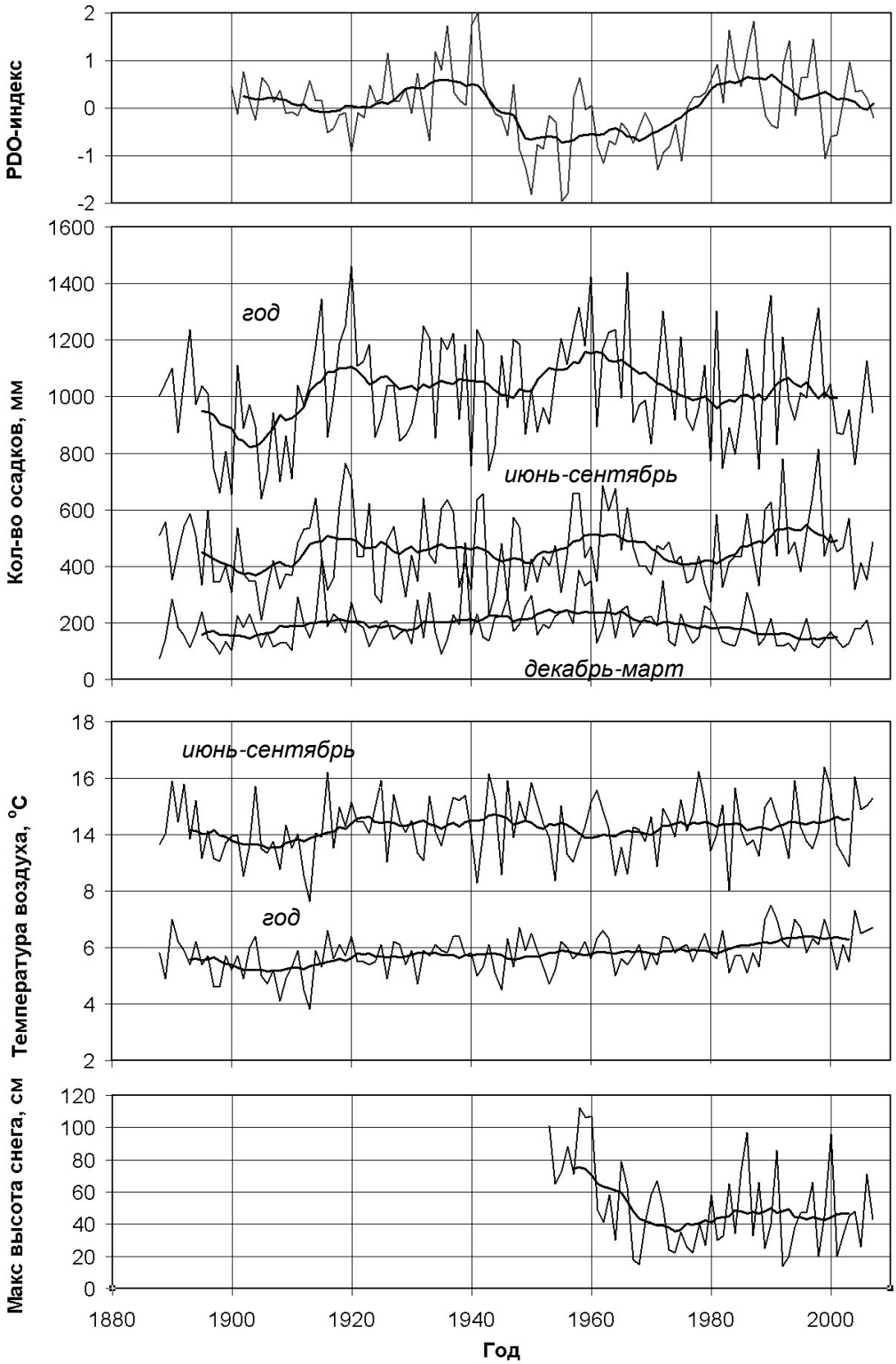

Рис. 7. Изменение среднегодовых значений тихоокеанской десятилетней осцилляции (PDO-индекс) и метеопараметров, зарегистрированных на метеостанции г. Немуро (о. Хоккайдо): жирные линии – результат сглаживания в 15-летнем окне; кривые построены по данным метеоролдогического агенства Японии и Вашингтонского института изучения атмосферы и океана

Мы провели предварительный анализ влияния тихоокеанской десятилетней осцилляции на изменчивость элементов современного климата в регионе, основыва-

ясь на данных метеостанции г. Немуро, расположенной на острове Хоккайдо, в 80 км южнее пос. Южно-Курильск и в 60 км южнее участка «Брянский лес».

В отличие от более коротких и неполных рядов метеоданных Южно-Курильска (с 1947 г), данные г. Немуро, представленные на сайте метеорологического агенства Японии (http://www.jma.go.jp/jma/indexe.html), начинаются с 1880 г. (рис. 7). Данные об изменениях индекса тихоокеанской десятилетней осцилляции приведены на сайте Вашингтонского Объединенного института изучения атмосферы и океана (http://jisao.washington.edu/).

Линейный регрессионный анализ предварительно сглаженных 15-летним средним метеопараметров показал, что наиболее тесная связь наблюдается между индексами PDO и количеством зимних осадков (R=-0,68) – табл. 2. Таким образом, увеличение осадков происходит в «холодной» фазе PDO. Существенно более слабая, но уже положительная связь (R=0,35) наблюдается между PDO и средней температурой летних месяцев (июнь-сентябрь).

Можно предположить, что значительная амплитуда (5-50)-летних колебаний температуры почвы может быть связана с изменениями количества зимних осадков (снега) в большей степени, чем с изменениями температуры воздуха.

В (Демежко, 2001) было показано, что разность среднегодовых температур почвы и воздуха $\delta T_{sa}^{\max}$ зависит как от высоты снега, его плотности (теплофизических свойств), так и от среднегодового значения и годовой амплитуды температуры воздуха. К увеличению $\delta T_{sa}^{\max}$ приводят: увеличение высоты снега, амплитуды годовых колебаний температуры воздуха и уменьшение ее среднегодового значения и наоборот.

При отсутствии данных о тепловых свойствах снега и динамике изменения его высоты за сезон для грубой (максимальной) оценки величины изолирующего эффекта $\delta T_{sa}^{\max}$ можно воспользоваться выражением (Демежко, 2001):

$$\delta T_{sa}^{\max} = \frac{D}{\pi}\sqrt{1-\left(\frac{T_0}{D}\right)^2} - \frac{T_0}{2}\left(1-\frac{2}{\pi}\arcsin\frac{T_0}{D}\right), \quad \left|\frac{T_0}{D}\right| \le 1, \quad (3)$$

где T_0 – среднегодовая температура воздуха, $D=(T_{июля}-T_{января})/2$ – годовая амплитуда. При T_0=4,8 ºС, D=8,4 ºС (усредненные данные по метеостанции Южно-Курильска за 1947-1989 гг.) получим $\delta T_{sa}^{\max}$ =0,7 ºС. Учитывая, что реальный эффект может быть существенно ниже, мы вынуждены констатировать невозможность объяснения высокой амплитуды реконструированных (5–50)-летних колебаний температур почвы исключительно влиянием вариаций высоты снежного покрова.

По крайней мере два фактора – среднегодовая температура воздуха и колебания индекса PDO – позволяют объяснить более половины дисперсии реконструированной кривой изменения температуры земной поверхности за период 1912-2000 гг. (R=0,74, R^2=0,54).

Регрессионное уравнение этой зависимости: T_s=2,22T_a-0,52·PDO-6,24. Множитель при T_a, равный 2,22, означает, что, либо при калибровке древесно-кольцевой хронологии по геотермическим данным была допущена ошибка, либо, что происходило реальное усиление климатического сигнала на земной поверхности. Мы придерживаемся второй точки зрения, хотя механизмы этого усиления, безусловно, требуют дальнейшего изучения.

Исследования проведены а рамках проекта фундаментальных исследований УрО и СО РАН: «Изучение вариации геотемпературного поля по данным непрерывного высокоточного температурного мониторинга в скважинах и осадках».

Литература

Демежко Д.Ю. Геотермический метод реконструкции палеоклимата (на примере Урала). Екатеринбург: УрО РАН, 2001. 144 с.

Демежко Д.Ю, Рывкин Д.Г., Юрков А.К., Дергачев В.В., Корсунцев В.Г. Комплексные Геотермические исследования в скважине Kun-1 (о. Кунашир). Часть I: вертикальное распределение температур, тепловой поток, влияние рельефа, гидро-

геологии, распространение суточных волн // Уральский геофизический вестник. 2009. № 1. С. 18-29.

Демежко Д.Ю., Соломина О.Н. Изменения температуры земной поверхности на о. Кунашир за последние 400 лет по геотермическим и древесно-кольцевым данным // Докл. РАН. 2009. Т. 426. № 2. С. 240-243.

Изменчивость климата Европы в историческом прошлом / А.Н. Кренке, М.М. Чернавская, Р. Браздил и др. М.: Наука, 1995. 224 с.

Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М: Наука. 1964.

Николаев А.Н. Влияние температурных условий почвы на радиальный прирост деревьев Центральной Якутии // Мат-лы Всеросс. конф. «Природная и антропогенная динамика наземных экосистем» / Иркутск: Изд-во Иркутского политех. у-та, 2005. С. 439-441.

Biondi F., Gershunov A., Cayan D.R. North Pacific Decadal Climate Variability Since AD 1661 // Journal of Climate. 2001. V. 14. N. 1. P. 5-10. (см аннотацию с рис. в http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/pubs/biondi2001/biondi2001.html)

Bodri L. and Cermak V. Borehole climatology. A new method on how to reconstruct climate // Elsevier Science. 2007. 352 pp.

Briffa K.R., Osborn T.J., Schweingruber F.N., Harris I.C., Jones P.D., Shiyatov S.G. and Vaganov E.A. Low-frequency temperature variations from a northern tree-ring-density network // J. Geophys. Res. 2001. 106. P. 2929-2941.

Clow G. Temporal resolution of surface-temperature histories inferred from borehole temperature measurements // Paleogeogr., Paleoclimatol., Paleoecol. 1992. 98. P. 81-86.

Cook E.R., Kairiukstis L.A. Methods of Dendrochronology. // Kluwer Academic Publishing. Boston. 1990. 394 pp.

Crowely T.J. and Lowery T. How warm was the Medieval warm period? // Ambio. 2000. 29. P. 51-54.

Cuffey K.M., Clow G.D., Alley R.B., Stuiver M., Waddington E.D., Saltus R.W. Large Arctic temperature change at the Wisconsin-Holocene glacial transition // Science. 1995. V. 270. P. 455-458.

D'Arrigo R., Villalba R., Wiles G. Tree-ring estimates of Pacific decadal climate variability // Clim. Dyn. 2001. 18. P. 219-224.

Demezhko D.Yu. and Shchapov V.A. 80,000 years ground surface temperature history inferred from the temperature-depth log measured in the superdeep hole SG-4 (the Urals, Russia) // Glob. and Planet. Change. 29 (2001). P. 219-230.

Gonzales-Rouco J.F., von Storch H., and Zorita E. Deep soil temperature as proxy for surface air temperature in coupled model simulation of the last thousand years // Geoph. Res. Lett. 2003. 30. 2116, doi: 10.1029/2003GL018264.

Gostov M., Wiles G., D'Arrigo R., Jacoby G., Khomentovsky P. Early summer temperatures since 1670 AD reconstructed based on a Siberian larch tree-ring width chronology. Can. // J. For. Res. 1996. 26. P. 2042-2048.

Goto S., Hamamoto H., Yamano M. Climatic and environmental changes at southereastern coast of Lake Biwa over past 3000 years, inferred from borehole temperature data. Annual Report FY 2003, Institute for Geothermal Sciences // Kyoto University. 2003. P. 22-24

Holmes R. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement // Tree-Ring Bull. 1983. 44. P. 69-74.

Huang S and Pollack H.N. Integrated reconstruction of northern hemisphere surface temperature history from borehole temperatures and multiproxy models // Fifth International Meeting «Heat flow and the structure of the lithosphere». Abstracts. Kostelec nad Cernymi Lesi, Czech Rep. 2001. P. 31.

Jacoby G., Solomina O., Frank D., Eremenko N., D'Arrigo R. Kunashir (Kuriles) Oak 400-year reconstruction of temperature and relation to the Pacific Decadal Oscillation. // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 209. 2004. P. 303-311.

Kitagawa H. and Matsumoto E. Climatic implications of $\delta^{13}C$ variations in a Japanese cedar (Cryptomeria japonica) during the last two millenia // Geophys Res. Lett. 1995. 22. P. 2155-2158.

Majorowicz J.A. and Scinner W.R. Anomalous ground warming versus surface air temperature warming in the Prairie

Provinces of Western Canada // Clim. Change. 1997. 35. P. 485-500.

Majorowicz J.A. and Safanda J. Measured versus simulated transients of temperature logs – A test of borehole climatology // J. Geoph Eng. 2005. 2. P. 291-298.

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.

Moberg, A., Sonechkin D. M., Holmgren K., Datsenko N. M. and Karl'en W. Highly variable northern hemisphere temperatures reconstructed from low- and high resolution proxy data // Nature. 2005. 433. P. 613-617.

Razjigaeva N.G., Korotky A.M., Grebennikova T.A., Ganzey L.A., Mokhova L.M., Bazarova V.B., Sulerzhitsky L.D., Lutaenko K.A. Holocene climatic changes and environmental history of Iturup Island, Kurile Islands, northwestern Pacific // The Holocene. 2002. V. 12. N. 4. P. 469-480.

Razjigaeva N.G., Grebennikova T.A., Ganzey L.A., Mokhova L.M. and V. B. Bazarova. The role of global and local factors in determining the middle to late Holocene environmental history of the South Kurile and Komandar islands, northwestern Pacific // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 2004. V. 209. Issues 1-4. P. 313-333.

Ryder, E.E.; Finley R.E.; George J.T.; Ho C.K.; Longenbaugh R.S., Connolly J.R. Bench-scale experimental determination of the thermal diffusivity of crushed tuff. Technical Report SAND-94-2320 // Sandia National Labs. Albuquerque, NM. 1996. 242 pp.

Salamatin A.N. Paleoclimatic reconstructions based on borehole temperature measurements