УДК 550.361:551.583

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА УРАЛЕ И В ВОСТОЧНОЙ ЕВРОПЕ В 18-19 ВЕКАХ ПО ДАННЫМ СКВАЖИННОЙ ТЕРМОМЕТРИИ

Горностаева А.А., Демежко Д.Ю. – Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург

Аннотация. Проведен анализ изменения температуры земной поверхности на Урале и в Восточной Европе в 18–19 вв. по 83 температурным профилям, полученным в скважинах глубиной не менее 300 м. Проведенное исследование позволило выявить значительную пространственно-временную неоднородность температурных изменений за исследуемый период. Обсуждаются возможные причины наблюдаемой картины температурных изменений, включающие атмосферную циркуляцию, взаимосвязь температуры земной поверхности и приземного воздуха и осадков, а также влияние факторов неклиматической природы (геологические особенности рассматриваемых участков, изменение ландшафтов, освоение территорий).

Палеоклимат, малый ледниковый период, Урал, Восточная Европа, скважинные термограммы, геотермия.

GROUND SURFACE TEMPERATURE CHANGES IN THE URALS AND EASTERN EUROPE IN 17-19 CENTURIES: GEOTHERMAL EVIDENCES

Gornostaeva A.A., Demezhko D.Yu. – Institute of Geophysics UB of RAS, Yekaterinburg

Abstract. The analysis of ground surface temperature changes in the Urals and Eastern Europe in 18–19 centuries has been carried out on 83 temperature profiles received in at least 300 meters depth boreholes. This investigation made it possible to identify significant spatial-temporal heterogeneity of temperature changes over the period under study. Possible reasons of observed pattern of temperature changes including atmospheric circulation, air/ground surface temperature interaction and precipitation as well as influence of non-climatic factors (geological features, landscape changes, land invasion) are discussed.

Paleoclimate, Little Ice Age (LIA), Ural, Eastern Europe, borehole temperature-depth profile, geothermal method.

Введение

Научный интерес к климатическим изменениям, происходившим в 18–19 вв., остается неизменно высоким в течение нескольких последних десятилетий. Малый ледниковый период, имевший место в это время, и последующее потепление являются последними значительными климатическими событиями на Земле. Особенности потепления в 20-м веке хорошо изучены благодаря метеонаблюдениям. Климатические изменения, происходившие в более отдаленном прошлом, позволяют оценить геотермический метод реконструкции температурной истории земной поверхности. Реконструкция палеоклимата по геотермическим данным – один из наиболее перспективных методов палеоклиматологии (Lachenbruch, Marshall, 1986; Beltrami, Mareshal, 1991; Cermak et al., 1992; Демежко, 2001).

За время развития геотермического метода было получено большое количество реконструкций температурных историй земной поверхности (GSTH – ground surface temperature history), выявивших существенные пространственные и временные неоднородности климатических изменений (Majorowicz, 2010; Beltrami et al., 2003). Эти неоднородности, обусловленные как естественной изменчивостью климата, так и воздействием факторов неклиматической природы, можно нивелировать, усредняя данные по большим регионам (Demezhko, Golovanova, 2007). В этом случае получается надежная средняя оценка климатических изменений для данной области. Однако при таком подходе теряется полезная информация о региональных климатических изменениях, которую несут пространственные закономерности.

Данная работа представляет собой попытку анализа пространственно-временных особенностей изменения климата с целью получения информации о региональных климатических явлениях, которая теряется при осреднении скважинных реконструкций. Приводится срав-

нение пространственного распределения характеристик климатических данных по Уралу и Восточной Европе, где плотность геотермических реконструкций значительно ниже, чем на Урале.

Математическая модель

Наиболее упрощенный подход при моделировании влияния температурной истории поверхности на геотемпературное поле предполагает теплофизическую однородность среды, отсутствие источников тепла на интервале наблюдений и кондуктивный механизм теплопереноса. Тепловой поток в этих условиях может быть описан одномерным нестационарным уравнением теплопроводности (Карслоу, Егер, 1964)

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{1}{a}\frac{\partial T}{\partial t} = 0 \qquad (1)$$

с краевыми условиями

$$T(0,t) = T_s(t), \quad \left.\frac{\partial T}{\partial z}\right|_{z\to\infty} = G_0, \qquad (2)$$

где T – температура, z – глубина, t – время, a – температуропроводность, G_0 – постоянная составляющая геотермического градиента, T_s – температура поверхности.

Решение уравнения (1) можно представить в виде суммы

$$T(z,t) = T_0 + G_0 z + \Theta(z,t), \qquad (3)$$

где T_0 – исходная невозмущенная температура поверхности, Θ – температурная аномалия, возникшая в момент $t=t_0$ и удовлетворяющая следующим условиям на бесконечности:

$$\Theta(z,t) = 0, z \to \infty \qquad (4)$$

Граничные условия на поверхности T_s могут быть представлены ступенчатой функцией изменения температуры поверхности внутри произвольно заданных временных интервалов:

$$T_s(0,t) = \begin{cases} T_0, & t \le 0 \\ T_k, & t_{k-1} \le t \le t_k, k = 1,2,\ldots,m-1 \\ T_m, & t \ge t_m \end{cases} \qquad (5)$$

Для таких условий и момента измерений $t=t^*$ решение уравнения (1) имеет вид:

$$T(z,t^*) = T_0 + G_0 z + \sum_{k=1}^{\infty} D_k \, erfc \frac{z}{2\sqrt{a(t^* - t_k)}}, \qquad (6)$$

где *erfc(U)* – кратный интеграл вероятностей, $D_k = T_k - T_{k-1}$ и $t^* - t_k$ – промежуток времени между моментом возникновения k-го температурного скачка и моментом измерения. (Demezhko, Shchapov, 2001; Демежко, 2001).

Реконструкция температурной истории земной поверхности GSTH=$T_s(0, t)$

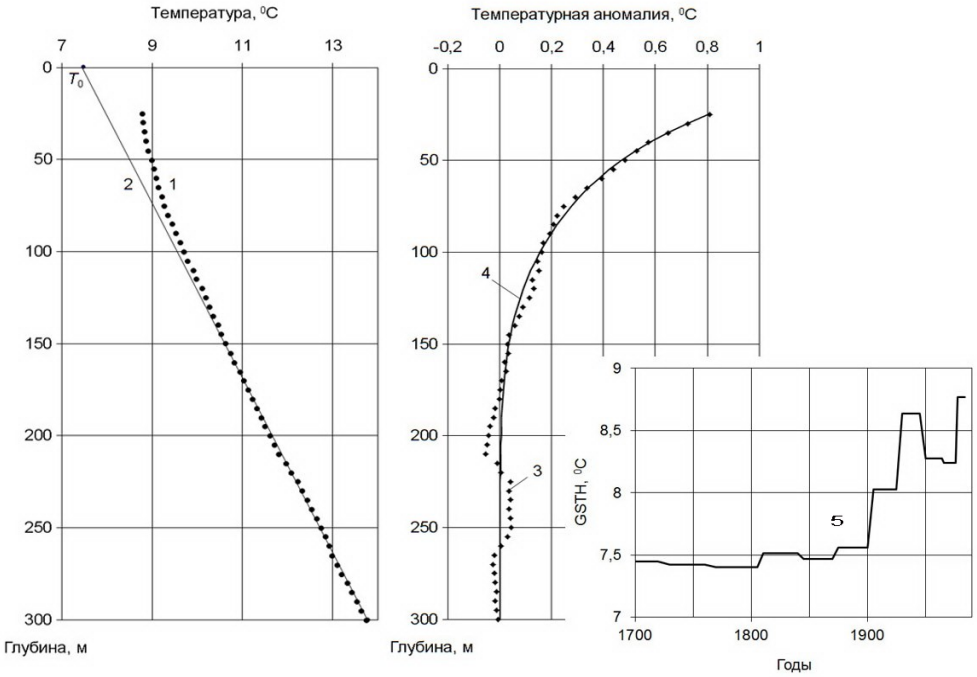

Рис. 1. Пример применения методики реконструкции: 1 – измеренная термограмма GViZD214 (Huang, Pollack, 1998); 2 – невозмущенные температуры $T(z) = T_0 + G_0 z$, оцененные по самой глубокой части термограммы (200-300 м); 3 – температурная аномалия; 4 – вычисленная температурная аномалия, соответствующая GSTH (5)

включала: 1) оценку неизвестных параметров G_0 и T_0 по опорному интервалу термограммы, 2) оценку температурной аномалии как разности между измеренной и невозмущенной температурами, 3) подбор такого соотношения параметров T_k, которое обеспечивает минимизацию среднеквадратического отклонения между измеренной температурой и вычисленной аномалией. Пример реализации данной методики инверсии представлен на рис. 1.

Данные и анализ

В качестве исходного материала для анализа климатических изменений использовались данные термокаротажа в скважинах Урала (Демежко, 2001; Demezhko, Golovanova, 2007) и Восточной Европы – Украины, Белоруссии, Финляндии (Huang, Pollack, 1998). Расположение скважин приведено на рис. 2.

Необходимо отметить, что плотность скважин на Урале значительно выше, чем на территории Восточной Европы.

Для исследований были выбраны 83 термограммы, записанные до глубины не менее 300 м. Пространственный анализ палеоклиматических реконструкций требует, чтобы все исследуемые скважины были одинаковы по глубине, а реконструкция температурной истории проводилась при одних и тех же параметрах с применением одного метода для всех термограмм (Beltrami et al., 2003), поэтому мы использовали только верхний 300-метровый интервал и одинаковый коэффициент тем-

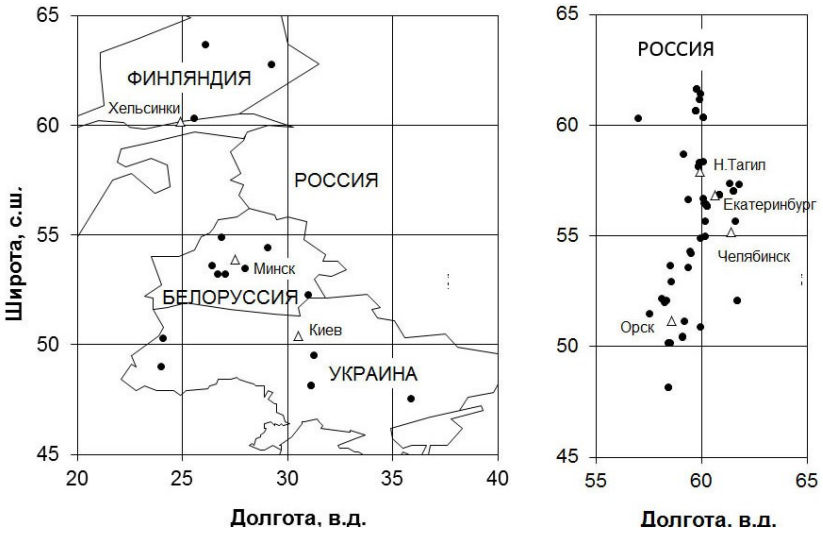

Рис. 2. Расположение изученных скважин на Урале и Восточной Европе

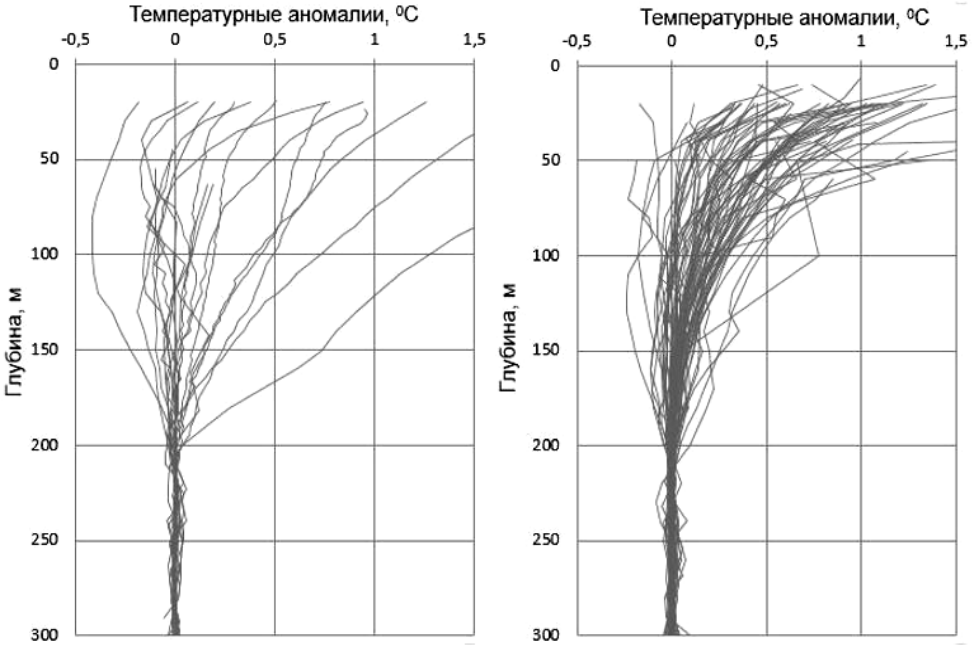

Рис. 3. Температурные аномалии для Восточной Европы (слева) и Урала (справа)

пературопроводности равный 10^{-6} м^2/с. Температурные аномалии, полученные с помощью описанной выше методики инверсии с опорным интервалом 200–300 м, представлены на рис. 3. Большая часть аномалий как на Урале, так и в Восточной Европе отражает процесс потепления после малого ледникового периода.

Температурные истории земной поверхности (GSTH) с 18 по 20 вв. в сравнении с длинными рядами метеоданных (среднегодовая температура приземного воздуха) приведены на рис. 4. Мы можем наблюдать, что реконструированные кривые и метеорологические тренды имеют схожую форму, отражающую процесс потепления.

При анализе пространственных особенностей потепления мы ограничили полученные реконструкции двухвековым периодом 18–19 вв. Данные за 20-й век были исключены из рассмотрения по несколь-

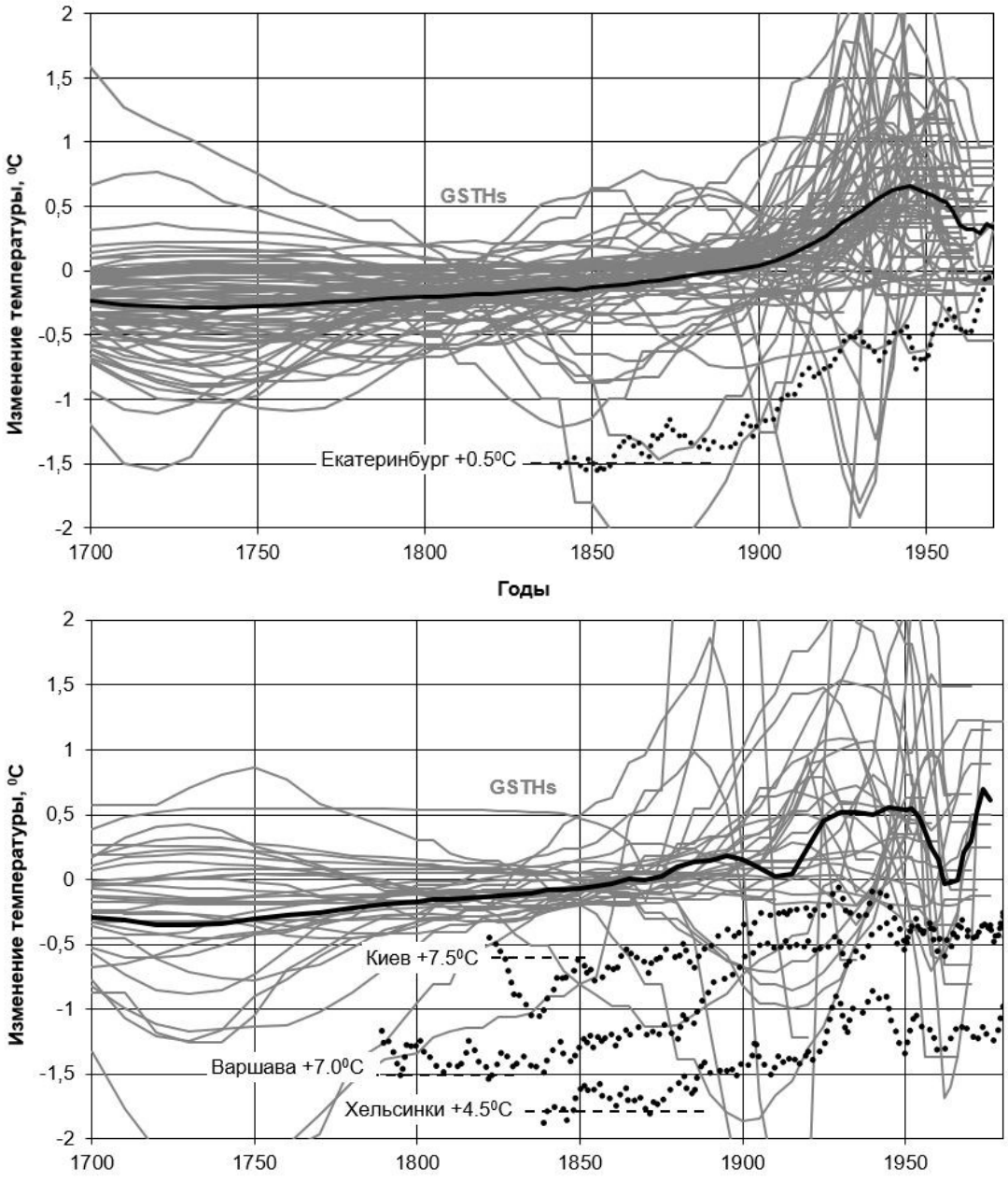

Рис. 4. «Спагетти»-диаграммы реконструированных температурных историй на Урале (вверху) и в Восточной Европе (внизу). Каждая история центрирована на её среднее значение температуры за период с 1700 по 1960 гг. (сплошные линии). Жирные кривые – результат осреднения. Штриховой линией обозначены данные об изменении температуры приземного воздуха в ближайших городах, осредненные 11-летними скользящими окнами

ким причинам. Во-первых, температурные истории имеют различные даты окончания в 20-м веке вследствие различного положения верхних точек термограмм. Во-вторых, рис. 4 демонстрирует крайне высокую изменчивость реконструированных температур в 20-м веке, которая может быть обусловлена не только климатическими факторами, но также шумом, связанным с теплофизическими неоднородностями верхней части разреза и контрастом тепловых активностей верхнего активного слоя и подстилающих пород (Котлованова, 2011).

По каждой кривой GSTH были рассчитаны амплитуды температурных изменений в 18–19 вв. и даты начала потепления. Амплитуды рассчитывались как разность средних значений температуры во второй половине 19-го века и температуры в 1700 году (начало реконструкции). Пространственные распределения этих оценок приведены на рис. 5 (цветная вкладка).

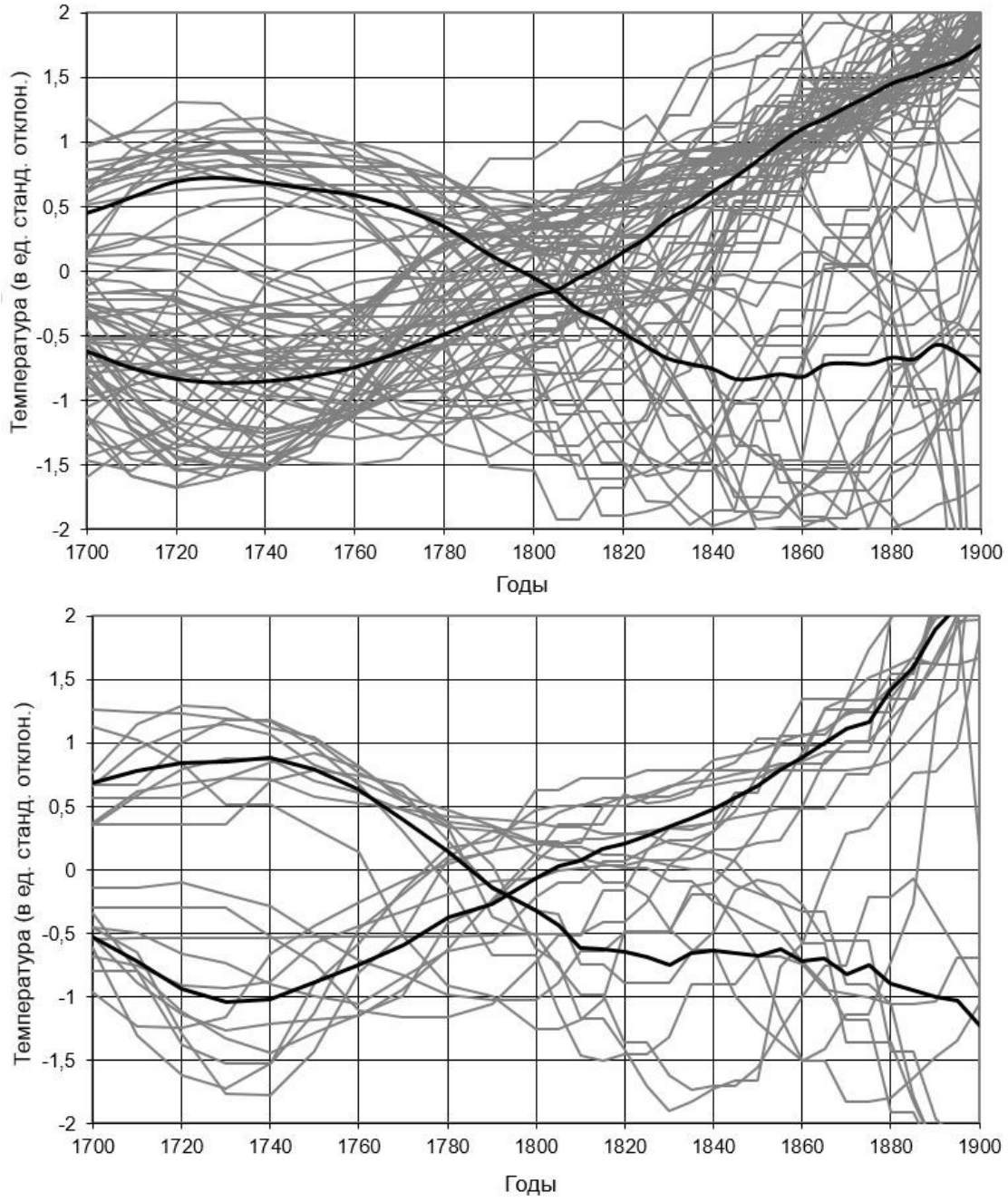

Рис. 6. «Спагетти»-диаграмма стандартизованных температурных историй земной поверхности на Урале (вверху) и в Восточной Европе (внизу). Жирные кривые – результат осреднения по каждому из двух кластеров

Амплитуды климатических изменений значительно различаются для различных регионов. Положительные значения амплитуд, соответствующие потеплению климата, характерны для севера и северо-запада Урала, а также для севера, юга и всей восточной области Восточной Европы. В то же время области отрицательных амплитуд тянутся в направлении юго-запад – северо-восток по Уралу, а также характеризуют центральную часть европейской территории. Такая пространственная неоднородность распределения значений амплитуд температурных изменений может быть обусловлена особенностями движения воздушных масс, переносящих большие потоки теплого и холодного воздуха. Преимущественное потепление в северных областях может быть связано с атлантическими циклонами. Однако четких пространственных закономерностей изменения температур для рассматриваемых областей не наблюдается. Велика роль локальных явлений в изменении температуры поверхности, возможно, связанных с освоением территорий, изменением ландшафтов и прочей антропогенной деятельностью. Стоит отметить еще один фактор, который может определять подобное распределение амплитуд, – осадки. Зимние осадки увеличивают температуру почвы, летние – уменьшают ее. Пространственная неоднородность выпадения осадков намного выше пространственной неоднородности изменения температуры воздуха. Положительные значения амплитуд могут быть связаны с увеличением снежного покрова в данных регионах.

При анализе хронологий температурных изменений кривые GSTH удобно привести к стандартному виду. Для этого каждая кривая была центрирована по своему средневзвешенному значению за период с 1700 по 1900 гг. и нормирована на стандартное отклонение.

Стандартизированные температурные кривые представлены на рис. 6. Кластерный анализ стандартизованных температурных кривых выявляет по крайней мере два типа кривых: с ранним (1720–1760) и более поздним (после 1820 г.) временами начала потепления в обоих исследуемых регионах. Потепление, следовавшее за малым ледниковым периодом, проходило в несколько этапов и для разных регионов началось в разное время.

Оправданность данного предположения подтверждается также пространственной неоднородностью распределения дат начала потепления, которая отражена на рис. 7 (цветная вкладка).

Наиболее ранним началом потепления характеризуется западная часть Урала, а также северная и восточная области Восточной Европы. Позднее климатические изменения коснулись центра европейской территории.

Заключение

Изучение пространственных особенностей климатических изменений поможет понять механизм формирования вековых климатических циклов Земли, последним из которых был малый ледниковый период. Свидетельств этих изменений немного. Косвенные палеоклиматические свидетельства (дендрохронологические, палинологические, ледниковые) основаны на том, что корреляционные соотношения между измеряемыми величинами и оцениваемыми элементами климата были близки к современным. Ненадежность этого допущения позволяет делать лишь качественные оценки. Геотермический метод не требует установления корреляционных связей между измеряемой и реконструируемой температурами. Интеграция геотермического метода и других существующих палеоклиматических исследований позволит дать более полную и эффективную оценку региональных и глобальных палеоклиматических изменений.

Реконструированные закономерности выявили высокую степень пространственной изменчивости исследуемых параметров. Мы полагаем, что эта высокая изменчивость является не только следствием шумов неклиматической природы, инвертированных в климатические изменения, но реально существовавших процессов (Majorowicz, 2010). В 18–19 вв. на

Урале и в Восточной Европе существовало два тренда температурных изменений (потепление и похолодание). Пространственное распределение дат начала потепление в Восточной Европе согласуется с результатами, полученными в работе (Majorowich, 2010). Раннее начало потепления в 18 в. в северных районах Урала и Европы было также обнаружено Люнквистом (Ljungqvist et al., 2012) в ходе анализа косвенных данных. Пространственная изменчивость распределения амплитуд и дат начала потепления может являться следствием природных процессов, происходящих в системе земля-атмосфера-океан, приводящих к перераспределению тепла в системе. Наблюдаемая пространственная изменчивость может быть и откликом климатической системы на антропогенную деятельность человека, связанную с освоением новых территорий, изменением ландшафтов, развитием островных ареалов тепла. Однако предложенные объяснения являются пока лишь гипотезами и требуют дальнейшего развития и уточнения.

Литература

Демежко Д. Ю. Геотермический метод реконструкции палеоклимата (на примере Урала). Екатеринбург: УрО РАН, 2001. 143 с.

Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964. 488 с.

Котлованова А.А. Влияние параметра тепловой активности на распространение температурных волн в геологических средах // XII Уральская молодежная научная школа по геофизике: Сборник науч. мат-лов. Пермь: ГИ УрО РАН, 2011. С. 119–123.

Beltrami H., Gosselin C., Mareschal J.C. Ground surface temperatures in Canada: Spatial and temporal variability // Geophys. Res. Lett. 2003. V. 30(10). P. 1499.

Beltrami H., Mareshal J.C. Recent warming in eastern Canada inferred from geothermal measurements // Geophys. Res. Lett. 1991. V. 18. N 4. P. 605–608.

Cermak V., Bodri L., Safanda J. Underground temperature fields and changing climate: evidence from Cuba // Paleogeogr. Paleoclim. Paleoecol. 1992. V. 97. P. 325–327.

Demezhko D.Yu., Golovanova I.V. Climatic changes in the Urals over the past millennium – an analysis of geothermal and meteorological data // Climate of the Past. 2007. N 3. P. 237–242.

Demezhko D.Yu., 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. 2001. 29. P. 219–230.

Huang S., Pollack H.N. Global borehole temperature database for climate reconstruction // IGBP PAGES/World Data Center-A for Paleoclimatology Data Contribution Series. USA, 1998. V. 44.

Lachenbruch A.H., Marshall B.V. Changing climate: Geothermal evidences from permafrost in the Alaskan Arctic // Science. 1986. V. 234. P. 689–696.

Majorowicz. J. The climate of Europe in recent centuries in the context of the climate of mid to high latitude northern hemisphere from borehole temperature logs // The Polish Climate in the European Context: An Historical Overview / Eds. R. Przybylak et al. Springer Netherlands, 2010. P. 103–126.

Ljungqvist F.C., Krusic P.J., Brattstrom G., Sundqvist H.S. Northern Hemisphere temperature patterns in the last 12 centuries // Climate of the Past. 2012. N 8. P. 227–249.

К статье Горностаевой А.А., Демежко Д.Ю. «Анализ изменений температуры земной поверхности на Урале в 18-19 вв. по данным скважинной термометрии»

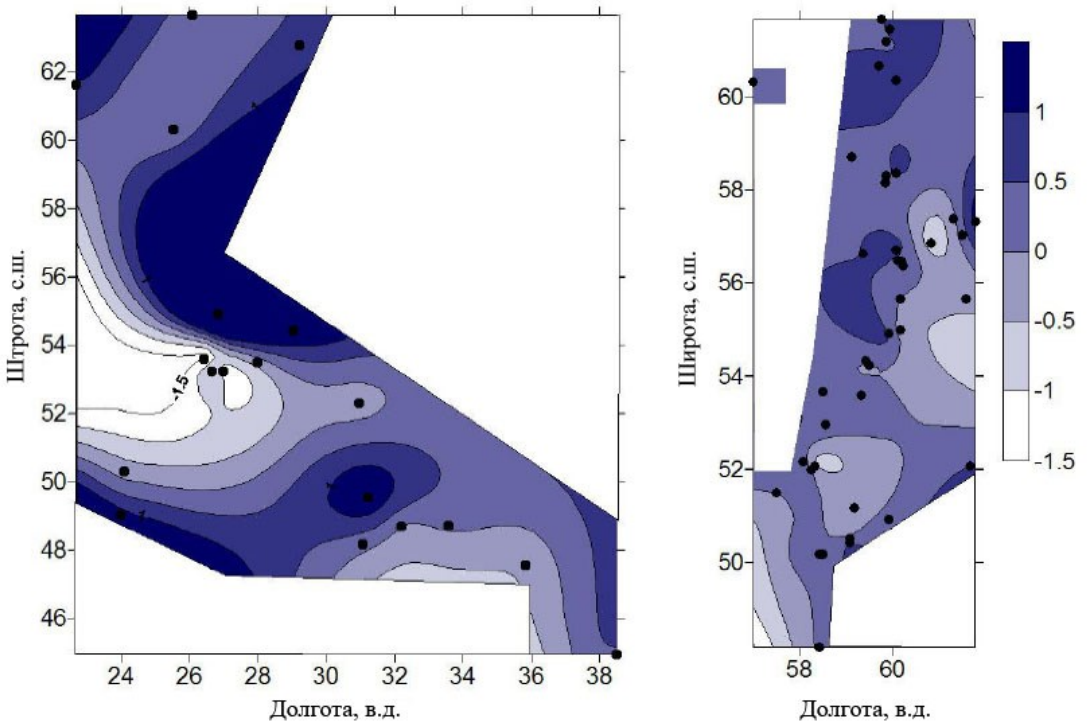

Рис. 5. Пространственные распределения амплитуд температурных изменений за период 18-19 вв. на Урале и в Восточной Европе. Точками обозначено расположение исследованных скважин

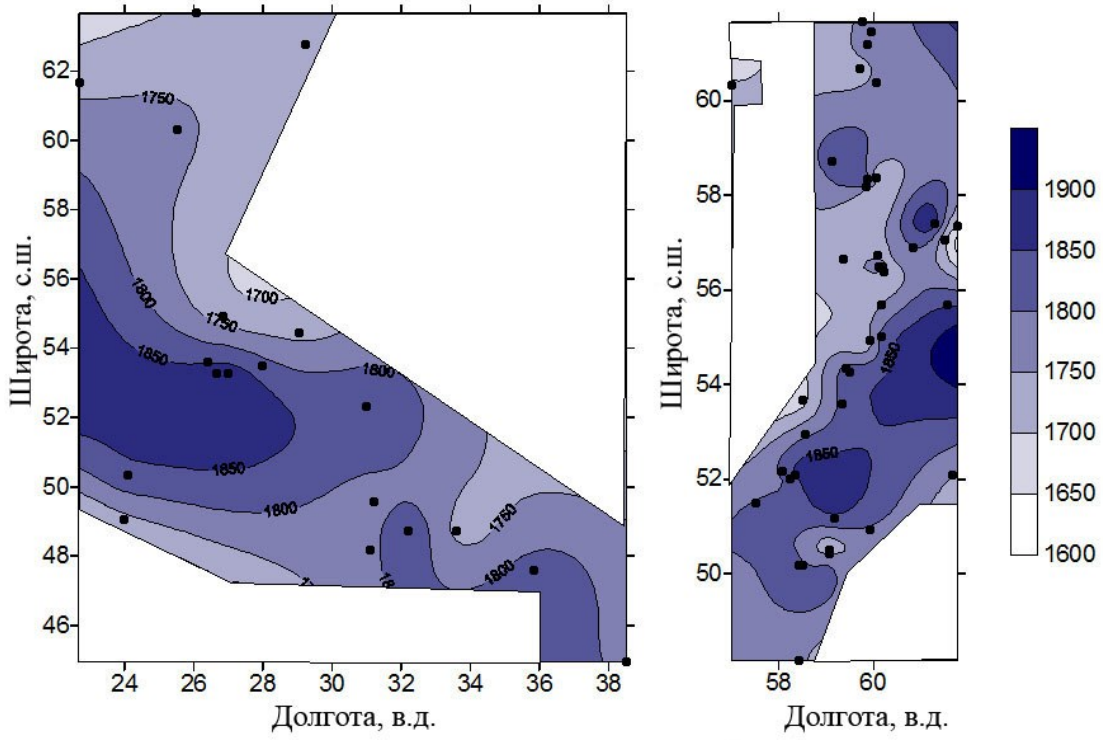

Рис. 7. Пространственные распределения дат начала потепления на Урале и в Восточной Европе. Точками обозначено расположение исследованных скважин