

## РЕКОНСТРУКЦИИ КЛИМАТА НА УРАЛЕ ПО ГЕОТЕРМИЧЕСКИМ ДАННЫМ

**И.В. Голованова, Р.Ю. Сальманова, Д.Ю. Демежко\***

*Институт геологии УНЦ РАН, 450000, Уфа, ул. К. Маркса, 16/2, Россия*

*\* Институт геофизики УрО РАН, 620016, Екатеринбург, ул. Амурдсена, 100, Россия*

Представлены результаты палеоклиматического анализа геотермических данных на Среднем и Южном Урале на различные интервалы времени. Реконструкция климатической истории последнего тысячелетия выполнена по данным из 44 скважин, амплитуда вюрм-голоценового потепления оценена по данным из двух глубоких скважин. Применялся метод инверсии в функциональном пространстве. Исследована разрешающая способность метода для реконструкции тех или иных климатических событий в прошлом. По результатам численного моделирования выбраны параметры, задающиеся априорно, и необходимая длительность периода, на который производится реконструкция. По результатам инверсии температура поверхности Земли в максимуме средневекового теплого периода в 1100—1200 гг. примерно соответствовала современной, а в минимуме малого ледникового периода примерно в 1720 г. была на 1.2—3 °C ниже современной. Последующее повышение температуры более отчетливо выражено в последнее столетие. Амплитуда вюрм-голоценового потепления, реконструированная по данным из двух глубоких скважин, составляет 10—11 °C.

*Геотермия, температура, инверсия, палеоклимат, реконструкция климата, Урал.*

### CLIMATE RECONSTRUCTION IN THE URALS FROM GEOTHERMAL DATA

**I.V. Golovanova, R.Yu. Sal'manova, and D.Yu. Demezhko**

Results of paleoclimatic analysis of geothermal data in the Middle and Southern Urals for different time intervals are presented. Climate reconstruction for the past millennium was made using data from 44 boreholes, and the magnitude of the Wurm–Holocene warming event was estimated based on data from two deep boreholes. The method of functional space inversion was used. The resolution of the method for reconstruction of various climatic events in the past was investigated. Parameters specified a priori and the required duration of the period to be reconstructed were chosen from the results of numerical modeling. According to the inversion results, the ground surface temperature at the maximum of the Medieval Warm Period in 1100–1200 was approximately the same as the present temperature, and at the minimum of the Little Ice Age around 1720, it was 1.2–3° C lower than at present. The subsequent temperature rise was more pronounced in the past century. The magnitude of the Wurm–Holocene warming event, reconstructed using data from two deep boreholes, is 10–11° C.

*Geothermy, temperature, inversion, paleoclimate, climate reconstruction, Urals*

### ВВЕДЕНИЕ

Известно, что современное распределение температур и тепловых потоков в Земле искажено влиянием прошлых изменений климата на глубину до нескольких километров. Данные измерений температуры, полученные в геолого-разведочных скважинах, позволяют реконструировать температурную историю земной поверхности за периоды от нескольких столетий до нескольких тысячелетий. Уточнение представлений об амплитуде прошлых потеплений имеет важное значение для решения вопроса о природе современного потепления и прогноза будущих изменений климата. На Урале палеоклиматические исследования практически одновременно, независимо друг от друга, начали проводиться в Институте геологии УНЦ РАН (г. Уфа) и в Институте геофизики УрО РАН (г. Екатеринбург). В дальнейшем геотермические группы двух институтов проводили работы по изучению истории изменений климата на Урале в тесном контакте друг с другом. Предполагалось провести апробацию существующих методов палеоклиматической интерпретации на большом фактическом материале, а также сравнительный анализ различных методов. В работе представлены результаты палеоклиматического анализа геотермических данных по Среднему и Южному Уралу, полученные в ИГ УНЦ РАН.

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ НА УРАЛЕ ЗА ПОСЛЕДНЕЕ ТЫСЯЧЕЛЕТИЕ ГЕОТЕРМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

**Методика интерпретации.** Геотермический метод реконструкции палеоклимата позволяет получить прямые оценки среднегодовых значений палеотемпературы горных пород на нижней границе слоя годовых колебаний (на глубинах 15—25 м) [Глобальные изменения..., 2008]. При постановке задачи эта температура принимается за температуру поверхности Земли. Ее вариации на этой глубине отражают основные тенденции изменения температуры приземного слоя воздуха. Различие между ними может варьировать в зависимости от широты и местных условий, и для его определения требуется специальный анализ. Среднегодовая температура приземного слоя воздуха в Северной Евразии обычно на 4—5 °С ниже, чем температура горных пород на нижней границе слоя годовых колебаний в основном из-за отопляющего влияния снежного покрова в зимний период.

Для территории Южного Урала зависимость температуры пород на глубине 25 м ( $T_{25}$ ) от среднегодовой температуры воздуха ( $T_B$ ) имеет вид [Сальников, 1984]:

$$T_{25} = 1.33 T_B + 2.57.$$

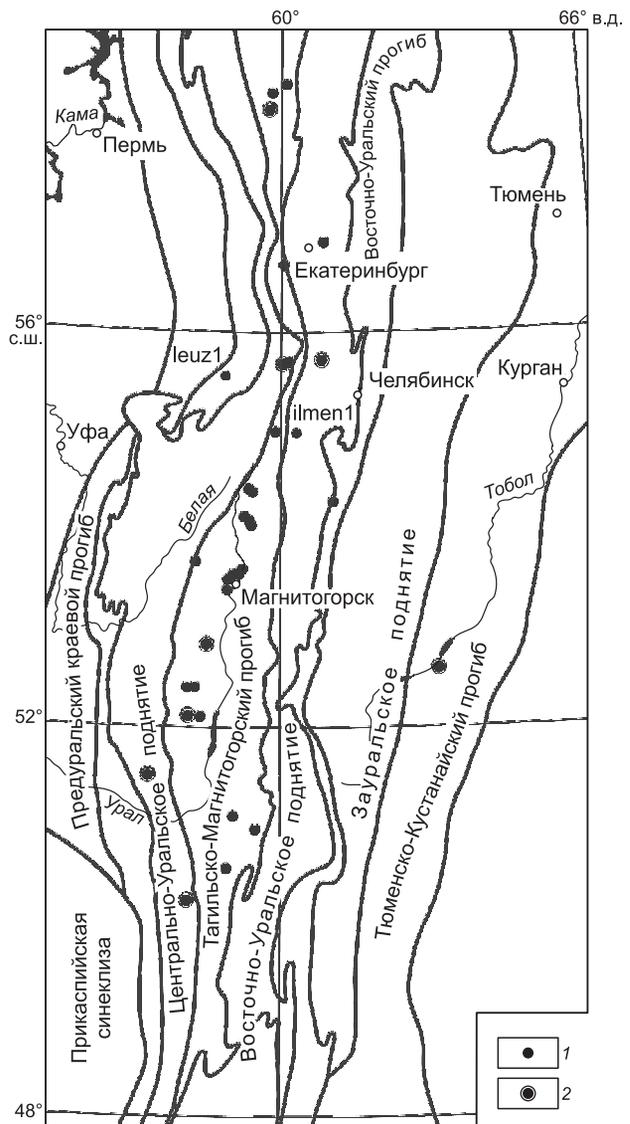
Исходя из этой зависимости и опираясь на сведения о среднегодовой температуре воздуха, рассчитаны температуры на глубине 25 м и построена схематическая карта. На исследуемой территории современные среднегодовые температуры на нижней границе слоя годовых колебаний варьируют от 3.5 до 11 °С. Используемый в данной работе метод реконструкции палеоклимата позволяет оценивать либо непосредственно палеотемпературу, либо отклонение от современной температуры.

Для восстановления температуры поверхности Земли на Урале за последнее тысячелетие использовались геотермические данные ИГ УНЦ РАН и ИГф УрО РАН, полученные при изучении распределения плотности теплового потока в 1969—1996 гг. В результате предварительного анализа из более чем 200 данных скважинных измерений температуры сформирована тестовая выборка 44-х термограмм, удовлетворяющих следующим условиям: глубина не менее 700 м; термограммы в наибольшей степени соответствуют модели одномерного теплопереноса, т.е. наименее отягощены неклиматическими влияниями — перетоков и фильтрации подземных вод, рельефа, локальных поверхностных аномалий. Отобранные термограммы принадлежат району, характеризующемуся единым геологическим строением и общей климатической историей. Измерения температуры выполнены с шагом 10 или 20 м с точностью до 0.02 °С. Теплопроводность образцов пород изучена детально, кроме самой верхней его части, сложенной выветрелыми породами. Для ряда скважин использовалась слоистая модель разреза, если теплопроводность значительно отличалась в различных его частях. В других случаях предполагалось, что среда однородна, и при инверсии использовалось среднее значение теплопроводности.

Входящие в выборку термограммы достаточно равномерно характеризуют вытянутый в меридиональном направлении район (50°10'—58°22' с.ш., 57°40'—62°45' в.д.), расположенный преимущественно на восточном склоне Урала (таблица, рис. 1).

**Рис. 1.** Схема расположения изученных скважин.

1 — одиночные скважины, 2 — группы скважин.



**Расположение скважин и их характеристики**

№ п/п	Обозначение	Название пункта	Координаты		Глубина измерения (min—max), м
			с.ш.	в.д.	
1	kr8802	Красноуральск	58°22'	60°04'	7—907
2	ku622	Кушва	58°19'	59°52'	50—840
3	vol0477	Волковское медно-колчеданное м-ние	58°10'	59°51'	20—965
4	vol0777		58°10'	59°51'	20—967
5	br3420	Березовский	56°52'	60°50'	20—780
6	dg2003	Дегтярск	56°43'	60°05'	20—1260
7	ma8002	НПО «Маяк»	55°41'	60°44'	40—760
8	ma8304	»	55°41'	60°44'	20—1112
9	ma8505	»	55°41'	60°44'	18—1218
10	kuv165	Куватал	55°40'	60°10'	20—1340
11	kuv180	»	55°39'	60°03'	30—848
12	kuv271	»	55°39'	60°03'	20—1520
13	kuv283	»	55°39'	60°03'	20—1200
14	ter27	Терменевский	55°04'	58°42'	80—1045
15	ilmen1	Ильменская	55°00'	60°10'	20—1945
16	krug313	Круглогорское	54°55'	59°55'	40—870
17	uch1755	Северо-Учалинская	54°22'	59°24'	10—910
18	uch1754	»	54°20'	59°25'	20—720
19	uvl62	Увельская	54°15'	60°50'	10—660
20	rech5869	Речной	54°05'	59°22'	10—940
21	u-ch5658	Южно-Чебачий	54°04'	59°24'	10—600
22	url3292	Урлядинская	54°00'	59°25'	10—1135
23	sala1790	Салават	53°40'	58°30'	20—680
24	alex5937	Северо-Александринская	53°35'	59°20'	10—960
25	mg10	Магнитогорск	53°32'	59°10'	20—1050
26	kas2011	Кассельская	53°33'	59°16'	10—1360
27	mag2056	Магнитогорск	53°30'	59°05'	80—1530
28	mag2066	»	53°25'	59°05'	20—1420
29	khudo184	Северо-Худозлазовский	52°57'	58°33'	10—1420
30	khudo187	»	52°57'	58°33'	120—1150
31	kzh4	КужайС4	52°35'	62°45'	40—940
32	kzh8	КужайС8	52°35'	62°45'	40—900
33	bg2351	Богачевка	52°25'	58°20'	50—750
34	ul4118	Юлалы	52°25'	58°22'	30—600
35	spod812	Северо-Подольск	52°05'	58°28'	50—950
36	podol32	Подольск	52°05'	58°20'	20—800
37	podol34	»	52°05'	58°20'	20—921
38	medn935	Медногорское	51°30'	57°40'	40—850
39	medn936	»	51°30'	57°40'	30—870
40	asch5107	Ащевбутак	51°05'	59°10'	20—680
41	osen4480	Осеннее	50°55'	59°35'	10—1010
42	kok1124	Коктау	50°30'	59°05'	40—980
43	chrom79	Хромтау	50°10'	58°25'	20—860
44	chrom192	»	50°10'	58°25'	20—940
45	leuz1	Леузинская	55°25'	59°00'	5—4512

Для реконструкции истории температуры поверхности Земли применялся метод инверсии в функциональном пространстве (FSI) [Shen, Beck, 1991]. Задача решается в предположении об одномерности среды и отсутствии конвективного теплопереноса [Shen, Beck, 1991; Сухорукова, Дучков, 1998]. Достоинством метода является то, что все параметры среды могут быть определены одновременно. Для реше-

ния задачи необходимо задать полное априорное описание параметров модели, таких как температура на поверхности, теплофизические свойства пород, плотность теплового потока на нижней границе, начальное распределение температур в скважине, а также дисперсию этих свойств. Известно, что чем более точно будет задано начальное приближение и сужены интервалы входных параметров, тем ближе будет результат инверсии к истинному. Поэтому лучшие результаты можно получить по скважинам, для которых имеются достаточно полные и качественные экспериментальные данные о температуре и теплофизических свойствах разреза.

Геотермические данные, используемые для реконструкции климата, осложнены «термическим шумом» и ошибками измерений, которые при инверсии могут быть интерпретированы как ложные климатические сигналы. Алгоритм инверсии предусматривает выбор степени влияния случайных факторов на результаты, что осуществляется подбором ограничений, накладываемых на первичные данные. Особенно сильно влияют значения стандартных отклонений для скважинных температур и теплопроводностей, задаваемые априори. Для подавления ложного сигнала рекомендуется [Shen et al., 1995] ослаблять ограничения, накладываемые на априорные входные параметры (особенно на температуру и теплопроводность). Это приводит к уменьшению влияния шума, однако за счет потери части климатического сигнала. Кривые температуры поверхности Земли получаются сглаженными, с заниженными амплитудами климатических событий.

Напротив, инверсия с жестко ограниченными входными параметрами дает кривую температуры поверхности Земли с хорошим разрешением. При этом вариации в исходных данных, действительно связанные с изменения климата, и шум интерпретируются как результат прошлых изменений климата. Данные, полученные по нескольким скважинам в одном регионе, могут сильно отличаться друг от друга. Если предположить, что в изучаемом регионе температура поверхности Земли имела одну и ту же историю, то шум вызван локальными геологическими условиями, т.е. имеет случайный характер. Тогда влияние шума можно уменьшить либо при совместной инверсии данных по группе скважин [Wang et al., 1994], либо осреднением результатов инверсии [Pollack et al., 1996]. При этом региональный сигнал температуры поверхности Земли оказывается выраженным более четко.

Надежность геотермических реконструкций истории температуры поверхности Земли ограничена двумя группами факторов [Демежко, 2001]. К первой группе относятся физические ограничения метода: разрешающая способность, максимальная длина температурной истории. Ко второй группе — условия, определяемые свойствами экспериментальных данных, а именно неопределенность, вызванная влиянием неклиматических факторов, теплофизические неоднородности разреза и возможное влияние фильтрации флюидов.

Временное разрешение геотермического метода реконструкции палеоклимата ухудшается по мере удаления в прошлое. Согласно анализу, выполненному Д.Ю. Демежко [2001], разрешающая способность метода может быть оценена с помощью параметра относительная продолжительность климатического эпизода. Этот параметр является отношением длительности климатического эпизода ко времени, прошедшему от момента начала эпизода до момента измерения температуры в скважине. Показано, что только эпизоды с относительной продолжительностью, большей чем 0.5, оставляют заметный след в геотемпературном поле и могут быть реконструированы по геотермическим данным. Среди них вюрмское оледенение (относительная продолжительность составляет 0.88) и малый ледниковый период, продолжавшийся с XIV в. до конца XIX в. (относительная продолжительность — 0.82). Возможна оценка средних температурных условий для периода 2300—800 лет назад, включающего оптимум римского времени и средневековый теплый период, разделенные кратковременным похолоданием (относительная продолжительность — 0.64). Средневековый теплый период не может быть реконструирован отдельно (относительная продолжительность — 0.33).

Поэтому можно надеяться на максимальную достоверность оценки температур только некоторых климатических событий: вюрмского оледенения, амплитуды потепления в начале голоцена (около 10000 л. н.) до оптимума голоцена, средневекового теплого периода вместе с оптимумом римского времени (2300—800 л. н.), малого ледникового периода (150—600 л. н.) и температурного тренда XX в. [Демежко, 2001]. Отметим, что существуют и другие способы оценки временного разрешения геотермического метода.

Согласно оценке [Демежко, 2001], максимальные глубины проникновения аномалии составляют: для вюрмского оледенения — 7200 м, для оптимума римского времени вместе со средневековым теплым периодом — 1080 м, для малого ледникового периода — 580 м.

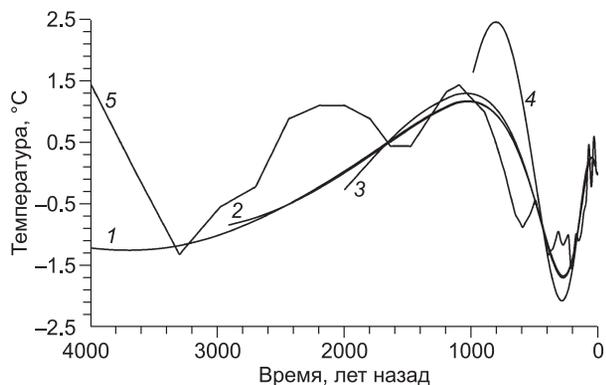
Несмотря на довольно высокое качество использованных исходных данных, они, несомненно, содержат «термический шум», влияние которого может быть уменьшено путем осреднения полученных результатов инверсии. Для подавления неклиматических факторов применялись одновременная реконструкция общей для ряда термограмм температурной истории методом инверсии в функциональном пространстве либо осреднение индивидуальных кривых истории температуры поверхности Земли.

**Разрешающая способность метода.** Перед тем как использовать метод для обработки скважинных данных, мы исследовали его разрешающую способность для реконструкции тех или иных климатических событий в прошлом. Для этого выполнено моделирование влияния палеоклимата за последние 250 тыс. лет на распределение температуры с глубиной (прямая задача). В качестве граничного условия на поверхности Земли использовались литературные данные о среднеглобальной температуре приземного воздуха в Северном полушарии в отклонениях от современной температуры [Демежко, 2001]. Затем полученное распределение температуры с глубиной используется для инверсии (обратная задача).

По результатам численного моделирования были выбраны параметры, задающиеся априорно, и необходимая длительность периода, на который производится реконструкция. На рис. 2 показано влияние длительности периода на результаты инверсии (по результатам моделирования). Приведены реконструированная температура поверхности при инверсии на 4000, 3000, 2000, 1000 л.н. и история изменения температуры поверхности Земли за последние 4000 лет, принятая за основу при моделировании. При расчетах использованы значения априорных стандартных отклонений для скважинных температур  $\sigma_T = 0.01$  К и для теплопроводностей  $\sigma_\lambda = 0.3$  Вт/(м·К). Скважины глубиной 800 м, в принципе, позволяют реконструировать климатическую историю на несколько тысяч лет назад. Однако результат зависит от выбранной длительности периода инверсии. Наиболее достоверно можно реконструировать климатические события, произошедшие примерно за последнюю половину или третью часть выбранного периода. Это происходит потому, что в более отдаленной части сказывается влияние задаваемых при решении ограничений на температуру поверхности Земли. Например, инверсия до 1000 л.н., как это часто делалось в предыдущих работах, позволяет более или менее надежно реконструировать события за последние 300—500 лет, т.е. малый ледниковый период. Для того чтобы надежно реконструировать максимум средневекового теплого периода, надо проводить инверсию на период не менее 3000 л.н. Следует, однако, признать, что имеющейся глубины скважин недостаточно для реконструкции средневекового теплого периода вместе с оптимумом римского времени. Возможна реконструкция только последней части этого объединенного климатического периода.

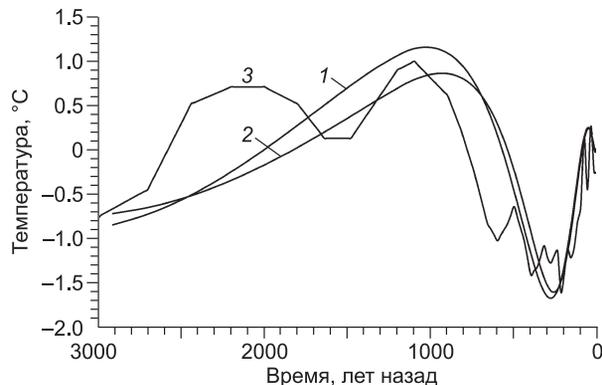
Большое значение имеет выбор значений априорных стандартных отклонений для скважинных температур  $\sigma_T$  и теплопроводностей  $\sigma_\lambda$  (рис. 3). Климатический сигнал затухает с увеличением глубины. Поэтому для реконструкции более отдаленных событий требуется ужесточить ограничения на качество исходных данных. Мы выбрали значения  $\sigma_T = 0.03$  К и  $\sigma_\lambda = 0.5$  Вт/(м·К) для реконструкции малого ледникового периода. Большая часть данных удовлетворяет этому условию и позволяет достаточно надежно его реконструировать. При указанных параметрах средневековый оптимум получается сглаженным. Для его реконструкции мы рекомендуем ужесточить ограничения на качество исходных данных и использовать следующие значения стандартных отклонений:  $\sigma_T = 0.01$  К и  $\sigma_\lambda = 0.3$  Вт/(м·К).

**Результаты интерпретации термограмм.** С использованием выбранных параметров по каждой термограмме реконструировалась палеотемпературная кривая (рис. 4). На всех кривых выявляется похолодание с минимумом в 1700—1800 гг. (малый ледниковый период после средневекового оптимума) и последующее повышение температуры, более отчетливо выраженное в последнее столетие. На рис. 5 представлены осредненные результаты для всех скважин.



**Рис. 2.** Влияние длительности периода, на который производится реконструкция, на результаты инверсии (по результатам моделирования).

Реконструированная температура поверхности при инверсии на 4000 (1), 3000 (2), 2000 (3), 1000 (4) л.н. и история изменения температуры поверхности Земли за последние 4000 лет, принятая за основу при моделировании (5) [Демежко, 2001].

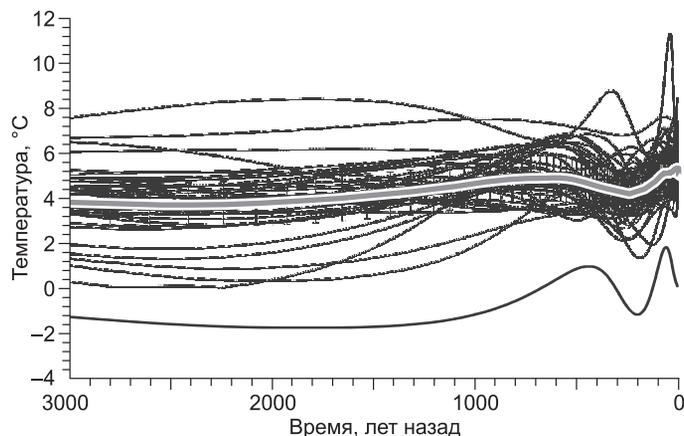


**Рис. 3.** Влияние значений априорных стандартных отклонений для скважинных температур  $\sigma_T$  и теплопроводностей  $\sigma_\lambda$  на результаты инверсии (по результатам моделирования).

1 —  $\sigma_T = 0.01$  К и  $\sigma_\lambda = 0.3$  Вт/(м·К); 2 —  $\sigma_T = 0.03$  К и  $\sigma_\lambda = 0.5$  Вт/(м·К); 3 — история изменения температуры поверхности Земли, принятая за основу при моделировании.

**Рис. 4. Реконструированные кривые изменения температуры поверхности Земли.**

Тонкие линии — индивидуальные реконструкции; жирная линия — усредненная история; вертикальные линии — средняя квадратичная погрешность оценки среднего.

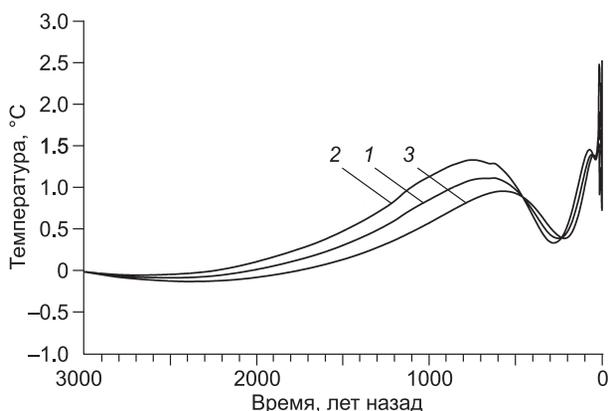


Результаты инверсии за последнее тысячелетие показывают, что малому ледниковому периоду на Урале предшествовал средневековый теплый период, температуры в максимуме которого (~ 1200 г. н.э.) были ниже современных примерно на 0,4 °С или примерно соответствовали современным. Для скважин, расположенных севернее 54° с.ш., этот максимум выражен более отчетливо, чем для южных скважин. Кульминация малого ледникового периода наступила приблизительно в 1700—1750 г. н.э. Температура поверхности в это время была на 1,2—3 °С ниже современной. Различия в оценках по отдельным термограммам, скорее всего, обусловлены влиянием факторов неклиматической природы. Существенных различий в изменениях в южной и северной частях региона в это время выявить не удалось.

Одной из целей совместной работы геотермиков ИГ УНЦ РАН и ИГф УрО РАН была апробация существующих методов палеоклиматической интерпретации на большом фактическом материале, а также сравнительный анализ различных методов. Поэтому эта же выборка данных обработана в ИГф УрО РАН другим методом, предложенным в работе [Демежко, 2001] для реконструкции изменений климата за последнее тысячелетие [Демежко и др., 2005]. В этом случае температурная история аппроксимируется ступенчатой функцией постоянных температур внутри произвольно заданных временных интервалов. Минимизируется сумма отклонений измеренных температур от теоретических. Устойчивость решения обеспечивается прогрессивно увеличивающейся по мере удаления в прошлое длительностью временных интервалов. Путем варьирования температур в пределах интервалов подбирается серия эквивалентных температурных историй, которые при минимальном количестве временных интервалов позволяют эффективно объяснить измеренную термограмму. По семейству эквивалентных температурных историй судят о наиболее вероятном решении и степени его неопределенности.

Некоторая часть южно-уральских данных использована ранее для изучения изменений, происшедших за последние несколько столетий [Stulc et al., 1998; Golovanova et al., 2001; Pollack et al., 2003; Голованова, 2005]. Изученные глубины скважин отличались друг от друга и иногда были недостаточны для реконструкции средневекового оптимума и более ранних событий. В данной работе существенно пополнилась база данных по скважинам, включены данные ИГф УрО РАН по Южному и Среднему Уралу. Таким образом, появилась возможность охарактеризовать гораздо больший регион. Для получения сопоставимых результатов во всех скважинах для расчета принимался один и тот же интервал глубин. С помощью модельных расчетов изучена разрешающая способность метода инверсии в функциональном пространстве для реконструкции тех или иных событий в прошлом.

Реконструированные кривые температуры земной поверхности, полученные разными методами, имеют схожий характер, однако несколько различаются по положению и амплитуде экстремумов. В частности, амплитуда средневекового теплого периода, полученная здесь методом инверсии в функциональном пространстве, несколько меньше, чем в работе [Демежко и др., 2005]. Скорее всего, это объясняется недостатком сведений о тепловых свойствах пород разреза. Сравнение результатов, полученных с использованием различных методик, показало, что применение алгоритма, предложенного Д.Ю. Де-



**Рис. 5. Осредненные редуцированные кривые изменения температуры поверхности Земли.**

1 — среднее по всем реконструкциям для Среднего и Южного Урала, 2 — для южной части, 3 — для северной части изученной территории.

межко [2001], предпочтительно при массовом анализе ряда термограмм, когда требуется строго придерживаться единых параметров подбора, а сведения о геологической обстановке и теплофизических свойствах пород минимальны. В то же время представляется, что при анализе данных по отдельным скважинам в случае хорошей геологической и теплофизической изученности предпочтительнее применение метода инверсии в функциональном пространстве. Если имеется достаточная априорная информация, то он позволяет лучше учесть качество исходных данных и реальные свойства среды.

Таким образом, температуры, измеренные в скважинах на Южном и Среднем Урале, использованы для реконструкции изменений климата за последнее тысячелетие с применением различных алгоритмов инверсии. В идеальном случае при отборе скважинных данных для оценки их качества требуется большое количество дополнительной информации, которая зачастую недоступна. Нам представляется, что перед применением любого метода инверсии скважинные данные должны быть подвергнуты жесткому отбору. При отборе качественных исходных данных результаты, полученные различными методами, оказываются близки.

### РЕКОНСТРУКЦИЯ ПЛЕЙСТОЦЕН-ГОЛОЦЕНОВОГО ПОТЕПЛЕНИЯ НА ЮЖНОМ УРАЛЕ

Первая оценка амплитуды плейстоцен-голоценового потепления была получена в ИГ УНЦ РАН по скв. Ильменская-1 (55°00' с.ш., 60°10' в.д.) [Golovanova et al., 2000], расположенной в Ильменском заповеднике (см. рис. 1) и достигающей глубины 2000 м. Использовался метод инверсии в функциональном пространстве [Shen, Beck, 1991]. Известно, что возмущения, вызванные влиянием палеоклимата, проникают на значительно большую глубину, поэтому при использовании геотермических данных по относительно неглубоким скважинам часть информации теряется и реконструированные амплитуды потепления получаются заниженными. Для получения более полной информации при помощи математического моделирования была исследована разрешающая способность метода и введена поправка, учитывающая недостаточную глубину скважины. Оценка амплитуды потепления по этой скважине составляет примерно 8.3 °С.

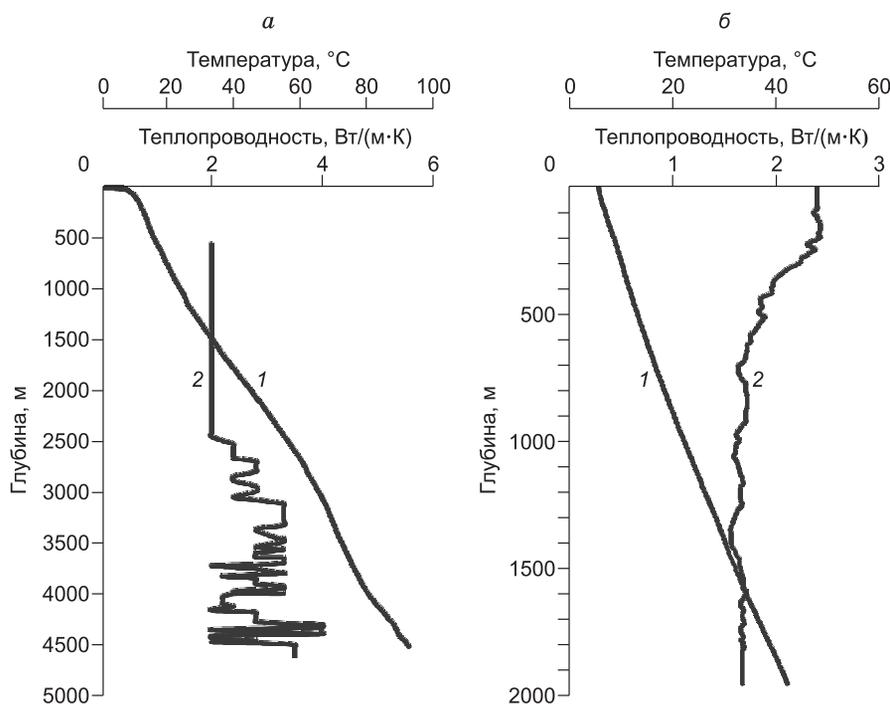
Практически одновременно с этим в ИГф УрО РАН [Demezhko, Shchapov, 2001] выполнена реконструкция температурной истории, охватывающей период более 10 тыс. лет, по данным из Уральской сверхглубокой скв. СГ-4. Использована термограмма до глубины 4 км. Амплитуда потепления оценивается в 12 °С. Еще несколько температурных историй получено по скважинам глубиной до 2 км [Демежко, 2001]. Однако из-за недостаточной глубины скважин реконструированные по ним амплитуды потепления существенно занижены, а датировки уменьшены в несколько раз.

Более надежны оценки амплитуды послеледниковое потепления по анализу распределения усредненного геотермического градиента по большому количеству скважин [Демежко, 2001]. В этом случае амплитуда температурных колебаний подбирается с помощью решения прямой задачи теплопроводности. Использование большого количества данных по объединенной базе данных ИГф УрО РАН и ИГ УНЦ РАН позволило получить широтный профиль температур конца вюрмского оледенения вдоль меридиана 60° в.д. По скорости увеличения градиентов с глубиной можно утверждать, что послеледниковое потепление сопровождалось на Урале увеличением температуры поверхности в среднем на 7.7 °С. При этом в южной части региона (50—54° с.ш.) оно составило 5.9 °С, а в северной (54—58° с.ш.) — 9.4 °С. Амплитуда потепления возрастает с юга на север примерно на 1 °С/1° широты.

Все описанные реконструкции, кроме полученных по Уральской сверхглубокой скв. СГ-4, выполнены по данным из скважин недостаточной глубины. Поэтому каждая новая возможность реконструкции температуры поверхности Земли по данным из глубоких скважин, содержащим более полную информацию, имеет важное значение.

Новые оценки изменений палеоклимата выполнены по данным из глубокой параметрической скв. Леузинская-1, расположенной в башкирской части Юрюзано-Сылвенской впадины Предуральского прогиба (55°25' с.ш., 59°00' в.д.) (рис. 1, б). Использована термограмма, записанная в апреле 2002 г. до глубины 4512 м. Перед измерением температуры скважина находилась в консервации больше месяца, после окончания бурения прошло больше 3 мес. Изученная часть разреза включает отложения палеозоя до глубины 3818 м и ниже — верхнего рифея.

Для реконструкции изменений климата применялся метод инверсии в функциональном пространстве [Shen, Beck, 1991]. Качество исходных геотермических данных по скважине позволяет использовать при инверсии значения стандартных отклонений для температуры  $\sigma_T = 0.05$  °С. Теплопроводность пород по скважине не определялась, однако в предыдущих работах получена детальная характеристика основных литолого-стратиграфических толщ Южного Урала и восточной части Восточно-Европейской платформы. Тепловые свойства горных пород были приняты по данным изучения соседних скважин, расположенных в этой же структурно-тектонической зоне, с учетом конкретного разреза скважины. Для теплопроводности принималось  $\sigma_\lambda = 0.3$  Вт/(м·К). По результатам вычислений амплитуда плейстоцен-



**Рис. 6. Геотермические данные по скважинам Леузинская-1 (а) и Ильменская-1 (б).**

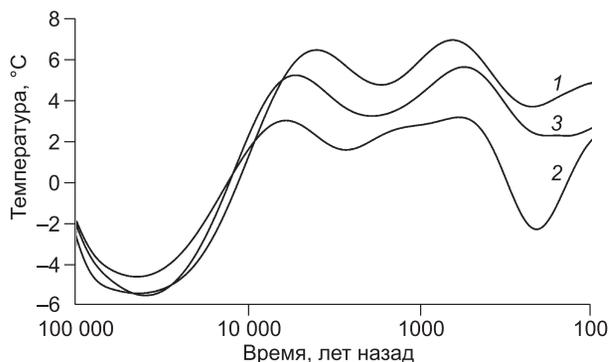
1 — термограмма, 2 — распределение теплопроводности.

голоценового потепления оценивается примерно в  $11\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис. 7). По порядку величины этот результат сопоставим с оценкой, полученной ранее по скв. Ильменская-1 глубиной 2000 м ( $8.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) [Golovanova et al., 2000]. В то же время в юго-восточном направлении (от скв. Леузинская-1 к скв. Ильменская-1) амплитуда несколько уменьшается, что подтверждает существующие представления о закономерностях пространственного распределения амплитуды плейстоцен-голоценового потепления в Северной Евразии. Согласно палинологическим оценкам, подтверждаемым и данными геотермии, центр потепления находился в Северной Атлантике [Demezhko et al., 2007]. Изолинии потепления снижаются примерно на  $5^{\circ}$  широты при удалении на  $20^{\circ}$  долготы на запад от уральского меридиана. Результаты реконструкции палеоклимата по данным из глубоких уральских скважин хорошо согласуются с этой моделью, подтверждая тем самым ее справедливость.

Независимая оценка амплитуды послеледникового потепления на Урале, полученная с использованием статистического подхода при анализе среднего геотермического градиента по большому количеству скважин, также хорошо согласуется с описанным результатом [Демежко, 2001].

Приведенный результат является всего третьей по счету оценкой по геотермическим данным на Урале после полученных ранее по скважинам Ильменская-1 (термограмма до 2000 м) и СГ-4 (термограмма до 4000 м).

Еще один возможный подход к оценке прошлых изменений климата — совместная инверсия данных по группам скважин. Подход основан на предположении, что в регионе с одинаковой климатической историей совместная инверсия подавляет случайный «термический шум» и выявляет общий климатический сигнал. Применявшийся нами метод инверсии в функциональном пространстве [Shen,



**Рис. 7. Результаты инверсии данных по скважинам Ильменская-1 и Леузинская-1.**

1 — результаты реконструкции истории температуры поверхности Земли по термограмме скв. Леузинская-1; 2 — по термограмме скв. Ильменская-1; 3 — результат совместной инверсии.

Beck, 1991] позволяет анализировать данные по группе скважин для более четкого выявления регионального сигнала температуры поверхности Земли. Скважины Леузинская-1 и Ильменская-1 расположены сравнительно недалеко друг от друга. Поэтому для осредненной характеристики этой части изученного региона выполнена совместная инверсия в функциональном пространстве данных по этим скважинам. Вычисленная амплитуда послеледникового потепления составляет 10 °С (см. рис. 7). Полученные результаты позволяют более обоснованно оценить историю изменения климата на Южном Урале.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, реконструкция изменений истории изменения температуры поверхности Земли на Среднем и Южном Урале проведена на различные интервалы времени с использованием метода инверсии в функциональном пространстве. Предварительно с помощью математического моделирования исследована разрешающая способность метода для реконструкции тех или иных климатических событий в прошлом. По результатам численного моделирования выбраны параметры, задающиеся априорно, и необходимая длительность периода, на который производится реконструкция. Сравнение полученных историй изменения температуры поверхности Земли с результатами применения других инверсионных схем показывает, что при отборе качественных исходных данных результаты, полученные различными методами, близки. Геологические условия на Урале, где кристаллические палеозойские породы непосредственно выходят на поверхность, позволяют оценить его как благоприятный регион для изучения глобальных изменений климата по геотермическим данным. Геотермические данные, полученные на Урале, могут служить своеобразным эталоном для оценки возможностей различных методов реконструкции изменений климата.

По результатам инверсии температура поверхности Земли на Урале в максимуме средневекового теплого периода в 1100—1200 гг. примерно соответствовала современной, а в минимуме малого ледникового периода примерно в 1720 г. была на 1.2—3 °С ниже современной. Последующее повышение температуры более отчетливо выражено в последнее столетие. Амплитуда плейстоцен-голоценового потепления на Южном Урале, реконструированная по термограммам из двух глубоких скважин Леузинская-1 и Ильменская-1, составляет 10—11 °С.

Результаты геотермических реконструкций палеоклимата Урала довольно хорошо согласуются с данными, полученными другими методами как для Северного полушария в целом, так и для прилегающих территорий [Немкова, Климанов, 1988; Клименко и др., 1996; Демежко, 2003; Climate change..., 1990; Moberg et al., 2005], а также с метеоданными за весь период наблюдений.

Полученные результаты имеют самостоятельное значение для изучения состояния и прогноза изменений климата. Кроме того, они позволяют учесть искажения теплового поля Земли, вызванные особенностями климатической истории, и уточнить существующие представления о распределении теплового потока на изучаемой территории.

## ЛИТЕРАТУРА

**Глобальные изменения** климата и природной среды позднего кайнозоя в Сибири / Ред. А.П. Деревянко. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2008, 511 с.

**Голованова И.В.** Тепловое поле Южного Урала. М., Наука, 2005, 189 с.

**Голованова И.В., Валиева Р.Ю.** Новые оценки амплитуды вюрм-голоценового потепления на Южном Урале по геотермическим данным // Геологический сборник № 5. Информационные материалы. Уфа, ДизайнПолиграфСервис, 2006, с. 201—203.

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

**Демежко Д.Ю.** Оценка роли антропогенных факторов в современных изменениях климата. Анализ геотермических данных // Ядерная геофизика. Геофизические исследования литосферы. Геотермия. Вторые научные чтения памяти Ю.П. Булашевича. Екатеринбург, ИГф УрО РАН, 2003, с. 34—35.

**Демежко Д.Ю., Уткин В.И., Шапов В.А., Голованова И.В.** Изменение температуры земной поверхности на Урале за последнее тысячелетие по геотермическим данным // Докл. РАН, 2005, т. 402, № 6, с. 815—817.

**Клименко В.В., Климанов В.А., Федоров М.В.** История средней температуры Северного полушария за последние 11000 лет // Докл. АН СССР, 1996, т. 348, № 1, с. 111—114.

**Немкова В.К., Климанов В.А.** Характеристики климата Башкирского Предуралья в голоцене // Некоторые вопросы биостратиграфии, палеомагнетизма и тектоники кайнозоя Предуралья. Уфа, БНЦ УрО АН СССР, 1988, с. 65—71.

**Сальников В.Е.** Геотермический режим Южного Урала. М., Наука, 1984, 88 с.

**Сухорукова К.В., Дучков А.А.** Восстановление температуры земной поверхности последних столетий по термограммам скважин Южной Сибири // Геология и геофизика, 1998, т. 39 (8), с. 1121—1129.

**Climate change:** The GPC Scientific Assessment. Report of working group I of the Intergovernmental panel on climate change. N.-Y., Cambridge Univ. Press, 1990, 364 p.

**Demezhko D.Yu., Shchapov V.A.** 80.00 years ground surface temperature history inferred from the temperature-depth log measured in the superdeep hole SG-4 (the Urals, Russia) // Global and Planetary Change, 2001, v. 29, p. 219—230.

**Demezhko D.Yu., Ryvkin D.G., Outkin V.I., Duchkov A.D., Balobaev V.T.** Spatial distribution of Pleistocene/Holocene warming amplitudes in Northern Eurasia inferred from geothermal data // Climate of the Past, 2007, v. 3, p. 559—568.

**Golovanova I.V., Selezniova G.V., Smorodov E.A.** Palaeoclimate change in the South Urals inferred from deep borehole geothermal measurements: the climate variations during the last Pleistocene Ice-Age // Geothermics at the turn of the Century: Abstracts. University of Evora, Portugal, April 3—7, 2000. p. 26.

**Golovanova I.V., Harris R.N., Selezniova G.V., Stulc P.** Evidence of climatic warming in the southern Urals region derived from borehole temperatures and meteorological data // Global and Planetary Change, 2001, v. 29, p. 167—188.

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

**Pollack H.N., Shen Y., Huang S.** Inference of ground surface temperature history from subsurface temperature data: interpreting ensembles of borehole logs // Pure Appl. Geophys., 1996, v. 147, № 3, p. 537—550.

**Pollack H.N., Demezhko D.Yu., Duchkov A.D., Golovanova I.V., Huang S., Shchapov V.A., Smerdon J.** Surface temperature trends in Russia over the past five centuries reconstructed from borehole temperatures // J. Geophys. Res., 2003, v. 108, № B4, 2180. doi:10.1029/2002JB002154.

**Shen P.Y., Beck A.E.** Least squares inversion of borehole temperature measurements in functional space // J. Geophys. Res., 1991, v. 96, № B12, p. 19965—19979.

**Shen P.Y., Pollak H.N., Huang S., Wang K.** Effects of subsurface heterogeneity on the inference of climate change from borehole temperature data: model studies and field examples from Canada // J. Geophys. Res., 1995, v. 100, № B4, p. 6383—6396.

**Stulc P., Golovanova I.V., Selezniova G.V.** Climate change record in the Earth — example of borehole data analysis in the Urals region, Russia // Phys. Chem. Earth, 1998, v. 23, № 9—10, p. 1109—1114.

**Wang K., Lewis T.J., Belton D.S., Sheen Y.** Difference in recent ground surface warming in eastern and western Canada: evidence from borehole temperatures // Geophysics. Res. Lett., 1994, v. 21, p. 2689—2692.

*Рекомендована к печати 16 февраля 2012 г.*

*А.Д. Дучковым*

*Поступила в редакцию*

*5 апреля 2011 г.*