

## НОВЫЕ ОЦЕНКИ АМПЛИТУДЫ ВЮРМ-ГОЛОЦЕНОВОГО ПОТЕПЛЕНИЯ НА ЮЖНОМ УРАЛЕ ПО ГЕОТЕРМИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Существующие на сегодняшний день оценки амплитуды вюрм-голоценового потепления на Урале по геотермическим данным получены усилиями двух научных коллективов: Института геологии УНЦ РАН и Института геофизики УрО РАН. Первая оценка была получена в Институте геологии УНЦ РАН по скважине Ильменская-1 [Golovanova et al., 2000], расположенной в Ильменском заповеднике и достигающей глубины 2000 м. Известно, что возмущения, вызванные влиянием палеоклимата, проникают на значительную 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 К.

Практически одновременно с этим в Институте геофизики УрО РАН выполнена реконструкция температурной истории, охватывающей период более 10 тыс. лет по данным из Уральской сверхглубокой скважины СГ-4 [Демежко, 2001]. Использована термограмма до глубины 4 км. Еще несколько температурных историй получено по скважинам глубиной до 2 км. Однако реконструированные амплитуды потепления были существенно занижены, а датировки уменьшены в несколько раз. Более надежны оценки амплитуды вюрм-голоценового потепления по анализу распределения усредненного геотермического градиента по большому количеству скважин. В этом случае амплитуда температурных колебаний подбирается с помощью решения прямой задачи теплопроводности. Использование большого количества скважин позволило оценить амплитуды потепления для трех районов Урала, вытянутых вдоль меридиана 60° в.д.: 58°–62° с.ш., 53°–57° с.ш., 48°–52° с.ш. и получить широтный профиль температур конца вюрмского оледенения. Позднее, с привлечением большего числа данных по объединенной базе данных Института геологии УНЦ РАН и Института геофизики УрО РАН, широтный профиль температур был уточнен и по последним представлениям выглядит следующим образом [Демежко и др., 2001]. По скорости увеличения градиентов с глубиной можно утверждать, что потепление сопровождалось на Урале увеличением температуры поверхности в среднем на 7,7 К. При этом в южной части региона (50°–54° с.ш.) оно составило 5,9 К, а в северной (54°–58° с.ш.) — 9,4 К. Амплитуда по-

тепления возрастает с юга на север примерно на 1 К/1 градус широты.

Все описанные реконструкции, кроме полученных по Уральской сверхглубокой скважине 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 скважины Леузинская-1, расположенной в башкирской части Юрюзано-Сылвенской впадины Предуральяского прогиба (рис. 1). Использована термограмма, записанная в апреле 2002 года до глубины 4512 м. Перед измерением температуры скважина находилась в консервации больше месяца; после окончания бурения прошло больше 3 месяцев. Изученная часть разреза включает отложения палеозоя (до глубины 3818 м) и верхнего рифея.

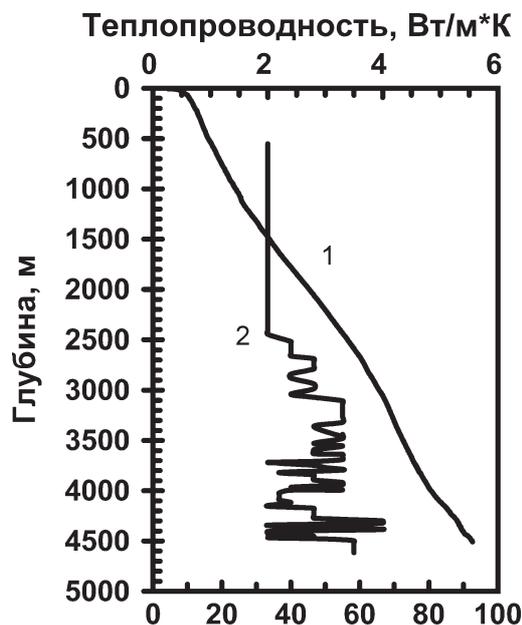


Рис. 1. Геотермические данные по скважине Леузинская-1  
1 — термограмма; 2 — распределение теплопроводности

Для реконструкции изменений климата применялся метод инверсии в функциональном пространстве (FSI) [Shen, Beck, 1991]. Задача состоит в отыскании кривой изменения температуры поверхности Земли по распределению температуры с глубиной. Для решения 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. Качество исходных геотермических данных по скважине позволяет использовать при инверсии значения стандартных отклонений для температуры  $0,05^{\circ}\text{C}$ . 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 [Голованова, 2005]. Теплового свойства горных пород были приняты по данным изучения соседних скважин, расположенных в этой же структурно-тектонической зоне, с учетом конкретного разреза скважины. Для теплопроводности значения стандартных отклонений принимались равными  $0,3 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ . По результатам вычислений амплитуда потепления, произошедшего на рубеже плейстоцена и голоцена, оценивается примерно в  $11^{\circ}\text{C}$  (рис. 2). Этот результат близок к оценке, полученной ранее по скважине глубиной 2000 м — Ильменская-1 ( $8,3^{\circ}\text{C}$ ) [Golovanova et al., 2000]. Независимая оценка амплитуды вюрм-голоценового потепления на Урале, полученная с использованием статистического подхода при анализе среднего геотермического градиента по большому количеству скважин, также хорошо согласуется с описанным результатом [Демежко и др., 2001]. Полученные результаты довольно хорошо согласуются с данными, полученными другими методами как для северного полушария в целом [Клименко и др., 1996 и др.], так и для Башкирского Предуралья [Немкова, Климанов, 1988].

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

В данном исследовании основное внимание уделялось потеплению на рубеже плейстоцена и голоцена. Однако более поздние по времени климатические события также уверенно реконструируются по геотермическим данным. Несмотря на значительные интервалы осреднения, четко выделяется оптимум голоцена 5–6 тысяч лет назад с пиком примерно на  $1,3^{\circ}\text{C}$  больше современной температуры. Климатические изменения за последнее тысячелетие также довольно четко выражены в реконструированной кривой: средневековый теплый период, малый ледниковый период с минимумом

примерно в 1750 г. и последующее потепление. Эти результаты хорошо согласуются с метеоданными и с данными других методов изучения климата.

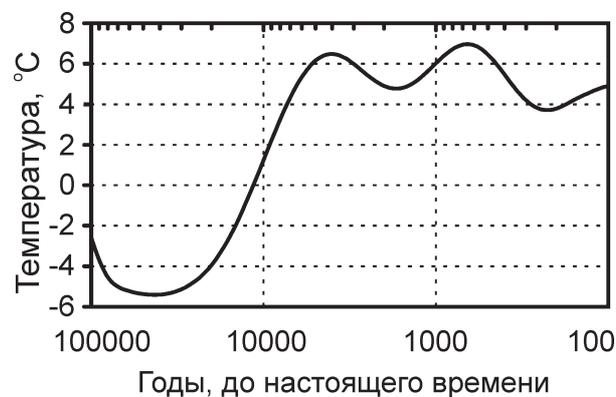


Рис. 2. Результаты реконструкции истории температуры поверхности Земли по термограмме скв. Леузинская-1

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. Для скважин Леузинская-1 и Ильменская-1 (рис. 3) выполнена совместная инверсия в функциональном пространстве. Амплитуда вюрм-голоценового потепления составляет  $10^{\circ}\text{C}$  (рис. 4). Полученные результаты позволяют более обоснованно оценить историю изменения климата на Южном Урале.

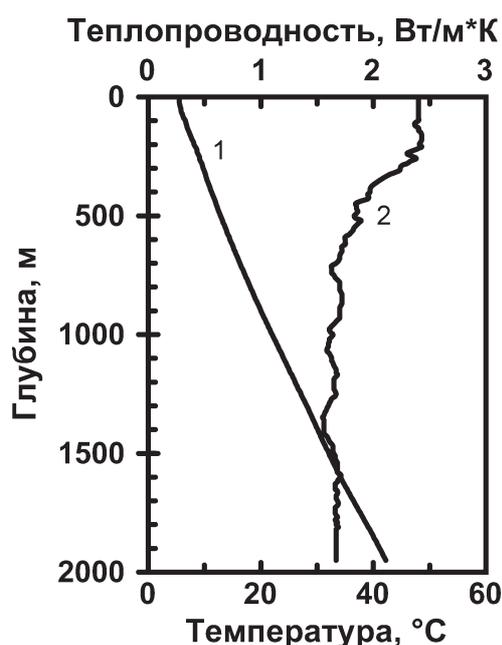
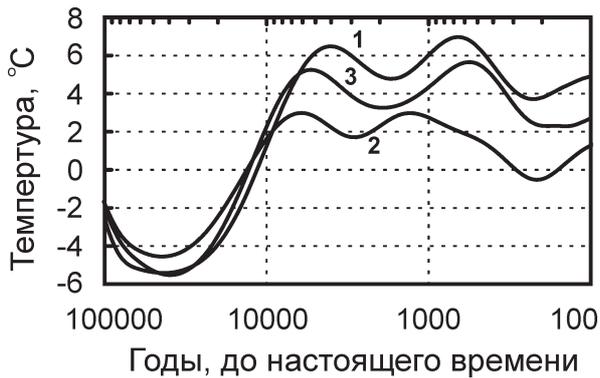


Рис. 3. Геотермические данные по скважине Ильменская-1  
1 — термограмма; 2 — распределение теплопроводности



**Рис. 4.** Результаты совместной 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

Таким образом, реконструкция истории изменения температуры поверхности Земли на Южном Урале проведена с использованием различных инверсионных схем и на различные интервалы времени. Геологические условия на Урале 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. При отборе качественных исходных данных результаты, полученные различными методами, близки. Результаты реконструкции хорошо согласуются с метеоданными за весь период наблюдений и с другими оценками палеоклимата.

Приведенные результаты реконструкции изменений температуры поверхности Земли позволяют более обоснованно оценить историю климата в изучаемом регионе. Полученные результаты имеют самостоятельное значение для изучения прошлых

изменений климата и его предсказания. Кроме того, они позволяют подойти к решению проблемы введения поправок на влияние палеоклимата в измеренные значения теплового потока. Учет влияния палеоклимата должен внести вклад в уточнение представлений о распределении теплового потока на Урале и в понимание природы Уральской аномалии тепловых потоков.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 05–05–64141).

#### Литература:

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

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

*Демезко Д.Ю., Голованова И.В., Щапов В.А., Селезнева Г.В.* Реконструкция температурной истории земной поверхности на Среднем и Южном Урале по геотермическим данным // Проблемы региональной геофизики: Мат-лы конф. 5–7 декабря 2001 г. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. С. 43–44.

*Климченко 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 / БНЦ УрО АН СССР. Уфа, 1988. С. 65–71.

*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.

*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.