

РЕКОНСТРУКЦИЯ ПОСЛЕЛЕДНИКОВОГО ПОТЕПЛЕНИЯ НА ЮЖНОМ УРАЛЕ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ ТЕМПЕРАТУРЫ В СКВАЖИНАХ

Для прогнозирования будущих изменений климата важно отделить естественный ход климатических событий от влияния антропогенных факторов, способствующих потеплению. В последнее время к традиционным способам оценки параметров естественных колебаний климата добавился метод реконструкции его изменений по измерениям температуры в скважинах. Этот метод широко применяется для изучения колебаний климата за последние несколько столетий, однако существует возможность получить информацию и о более отдаленных событиях.

Температуры, измеренные в скважинах, несут информацию о прошлых изменениях температуры поверхности Земли (ТПЗ), связанных с изменениями климата, и могут быть использованы для их реконструкции. Благодаря механизму теплопроводности, изменения температуры на поверхности проникают вглубь Земли, искажая температурное поле. С увеличением глубины короткопериодные искажения температуры затухают, и преобладает термически осредненный ясно выраженный сигнал от длиннопериодных вариаций температуры поверхности Земли. Чем глубже проникает возмущение температуры, тем больший промежуток истории изменения температуры на поверхности оно представляет. Следовательно, реконструированная ТПЗ в какой-либо момент времени в прошлом является средневзвешенной температурой за определенный период времени, при этом интервал осреднения увеличивается по мере удаления в прошлое. Например [1], при реконструкции истории ТПЗ на 3 тыс. лет назад интервал осреднения простирается примерно на период 4–2 тыс. лет назад, на 10 тыс. лет назад он составляет 15–5 тыс. лет назад, и на 30 тыс. лет назад — уже 50–10 тыс. лет назад. Так как холодный период во время последнего (Вюрмского) оледенения преобладал 80–10 тыс. лет назад, существует возможность получить среднюю температуру поверхности Земли для него, несмотря на значительные интервалы осреднения. Такие оценки были выполнены по данным измерения температуры в глубоких скважинах на территории Словении и Чехии [1, 2]. Целью настоящей работы является анализ возможностей метода и реконструкция истории ТПЗ по данным из скважины Ильменская–1, расположенной в Ильменском заповеднике на Южном Урале.

Для реконструкции изменений климата решается обратная задача геотермии. В данной работе использовался метод инверсии в функциональном пространстве [3]. Задача решается в предположении об одномерности среды и отсутствии конвективного теплопереноса. Достоинством метода является то, что все параметры среды могут быть определены одновременно. 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.

Перед тем как использовать метод для обработки скважинных данных, мы исследовали его разрешающую способность для реконструкции изменений климата за поздне- и послеледниковое время. Для этого выполнено моделирование влияния палеоклимата на распределение геотермического поля (прямая задача). Затем полученное распределение температуры с глубиной используется для инверсии (обратная задача). Все вычисления выполнялись для конкретной скважины — Ильменская–1. Моделирование выполнялось до глубины 7000 м. Предполагалось, что массив горных пород ниже забоя скважины однороден по теплофизическим свойствам и является продолжением вскрытого в нижней части скважины. Геофизические исследования в районе скважины подтверждают правдоподобность такого предположения [Макагонов, 1994 г.].

При решении прямой задачи рассчитано искажение температуры с глубиной, вызванное вариациями климата за последние 250 тыс. лет.

Решалось одномерное нестационарное уравнение теплопроводности для неоднородной среды с границами $x=0$ и $x=L$:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) = 0 \quad (1)$$

с начальным условием $T(x,0) = T_0(x)$

и граничными условиями $T(0,t) = T_1(t)$ (1')

$$\frac{\partial T(L,t)}{\partial x} = G_0,$$

где $T = T(x,t)$ — температура земной коры, $\rho c = C'(x)$ — теплоемкость единицы объема среды, $k = k(x)$ — коэффициент теплопроводности.

Задача решалась методом конечных разностей. В качестве граничного условия на поверхности Земли использованы данные о региональном палеоклимате. Они получены на основе литературных данных о среднеглобальной температуре северного полушария с учетом современной среднегодовой температуры и коэффициента, учитывающего возрастание амплитуды колебаний температуры с ростом широты местности [4]. Отметим, что граничным условием на поверхности Земли является температура горной породы на глубине затухания годовых колебаний температуры. Градиент температуры на нижней границе G_0 определялся по тепловому потоку на наиболь-

шей глубине, для которой имеются надежные геотермические данные.

Начальный профиль температуры в скважине рассчитывался по тепловому потоку, теплопроводности пород разреза и температуре поверхности для двух случаев. В первом варианте предполагалось, что температура поверхности в начальный момент времени была равна современной (как это обычно делается в литературе), во втором варианте — усредненной за последний миллион лет температуре поверхности Земли [4]. На рис. 1 приведены отклонения результирующего распределения температуры по скважине от исходного равновесного состояния для двух указанных случаев. Расчеты показали, что наиболее значительные отклонения вызваны потеплением примерно на 10 градусов, произошедшим в конце ледникового периода около 10 тыс. лет назад. Эффект от последующих вариаций климата выражен гораздо слабее. Они вызывают лишь незначительный всплеск на кривых рис. 1 в верхней части разреза, на глубинах до 1–1,5 км. Поэтому шансы для реконструкции послеледниковой потепления гораздо лучше, чем для реконструкции последующих вариаций.

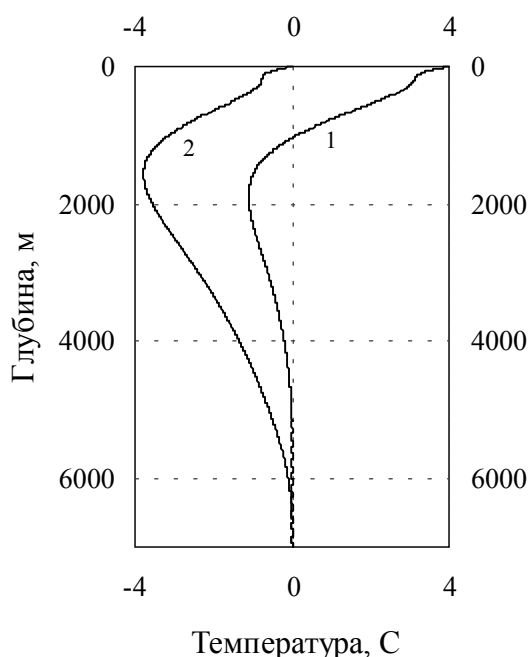


Рис. 1. Результаты моделирования влияния палеоклимата на геотермическое поле

Температура поверхности Земли в начальный момент времени равна: 1—современной, 2—усредненной за миллион лет температуре

При решении обратной задачи реконструированная ТПЗ зависит от глубины скважины, принятой для инверсии (рис. 2). При одной и той же глубине скважины инверсия второго варианта температурного профиля дает несколько лучший результат по сравнению с первым. Однако при глубине 2 км, соответствующей реальной глубине изученной скважины, это различие практически несущественно.

В этом случае амплитуда реконструированного потепления составляет примерно 80 % от действительного.

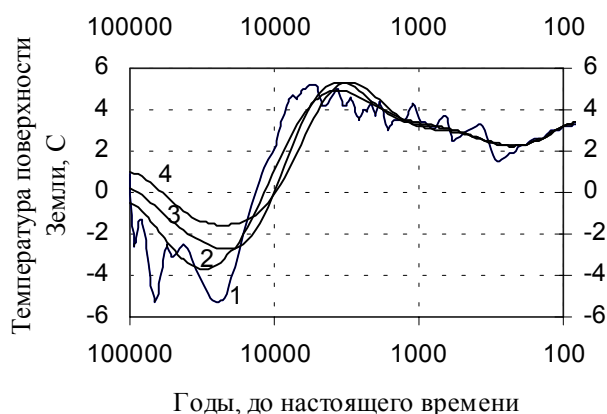


Рис. 2. Влияние глубины скважины на результаты инверсии (по результатам моделирования)

1—региональная палеотемпература, 2–4—реконструированная ТПЗ при глубине скважины 6000 м (2), 2500 м (3), 2000 м (4)

Скважина Ильменская–1 была выбрана как наиболее глубокая на изученной части восточного склона Южного Урала и, кроме того, достаточно хорошо удовлетворяющая условиям задачи. В верхней части скважина вскрыла нижнепротерозойские отложения ильменогорской и вишневогорской толщ, в состав которых входят амфиболиты, плагиогнейсы, плагиограниты, плагиосланцы. Глубже 500 м скважина прошла по миаскитовому массиву, довольно однородному по теплопроводности. По геофизическим данным положение нижней границы миаскитового массива в районе скважины оценивается в 3–4 км или глубже [Макагонов, 1994 г.]. Для инверсии были использованы результаты измерения температуры, выполненные одним из авторов через 6 месяцев после завершения бурения [5] до глубины 1945 м по вертикали. Погрешность определения температуры оценивается в 0,02–0,03°C, чувствительность термометра 0,01°C. Измерения теплопроводности проведены сравнительным методом на 95 образцах, отобранных через каждые 15–20 м. Погрешность отдельного измерения не превышает 7%. Геотермические параметры по скважине представлены на рис. 3. Показано распределение теплопроводности по разрезу, полученное путем осреднения в интервале протяженностью 190 м с шагом 10 м. В предыдущих работах отмечалось некоторое увеличение теплового потока в нижней части скважины, связанное, вероятно, с влиянием палеоклимата [5, 6].

Известно, что результат инверсии зависит от задаваемых априорных значений стандартных отклонений для входных параметров, в частности, для температуры и теплопроводности. Увеличение стандартных отклонений приводит к более сглаженной кривой ТПЗ. Чрезмерное сужение интервалов входных параметров приводит к тому, что «шум», неизбежно присутствующий во входных данных, может быть интерпретирован как результат прошлых

изменений климата. Качество исходных геотермических данных по скважине позволяет использовать при инверсии значения стандартных отклонений для температуры $\sigma_T = 0,02^\circ\text{C}$. Для теплопроводности принималось $\sigma_\lambda = 0,3 \text{ Вт/(мК)}$ в интервале глубин 0–500 м, и $\sigma_\lambda = 0,1 \text{ Вт/(мК)}$ ниже 500 м, где разрез становится достаточно однородным. Эти параметры использовались как при решении модельной задачи, так и при обработке реальных данных. Аналогичные низкие значения стандартных отклонений использовались ранее в работах [1, 2] для того, чтобы интерпретировать длинноволновое искривление термограммы в глубокой скважине как следствие удаленных во времени прошлых изменений температуры поверхности Земли.

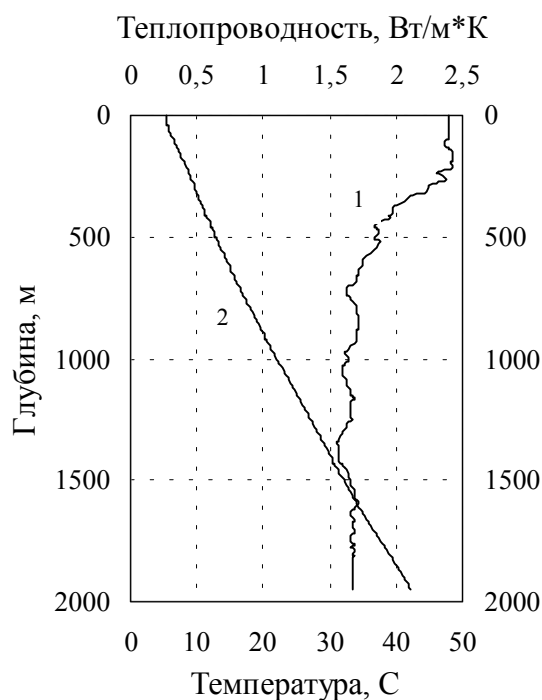


Рис. 3. Распределение теплопроводности (1) и температуры (2) по скважине Ильменская–1

Результаты инверсии для скважины Ильменская–1 приведены на рис. 4. Они воспроизводят минимум ледникового периода примерно 30 тыс. лет назад и последующее потепление на $6,9^\circ\text{C}$. С учетом результатов моделирования можно оценить амплитуду реального потепления приблизительно в $8,5^\circ\text{C}$.

По порядку величины это сопоставимо с реконструированной амплитудой послеледниковое потепления, полученной другими исследователями. Например, по ряду глубоких скважин в Словении оценка составляет $7\text{--}12^\circ\text{C}$, в Чехии — $5\text{--}14^\circ\text{C}$ [1, 2], по сверхглубокой скважине КТВ в Германии — 10°C [7].

Представляется, что полученные результаты довольно хорошо согласуются с данными, полученными другими методами как для северного полушария в целом [8, 9 и др.], так и для соседней территории — Башкирского Предуралья [10]. Несмотря на значительные интервалы осреднения,

четко выделяется оптимум голоцена 5–6 тыс. лет назад с пиком примерно на $1,3^\circ\text{C}$ больше современной температуры. Малый климатический оптимум, максимум которого был примерно 1000 лет назад [10] и предшествовавшее ему потепление нашли отражение во втором максимуме, примерно 1–2 тыс. лет назад. В данном исследовании основное внимание уделялось более отдаленным во времени событиям, однако климатические изменения за последние несколько столетий также довольно четко выражены в реконструированной кривой. Результаты, полученные для этого периода по измерениям температуры в ряде скважин на Южном Урале, в том числе и в Ильменской–1, детально обсуждались в предыдущих работах [11, 12 и др.]. Сравнение их с данными о среднегодовых температурах воздуха по 11 метеостанциям в том же регионе показало, что, несмотря на некоторые пространственные вариации, они отражают одну общую историю изменения температуры.

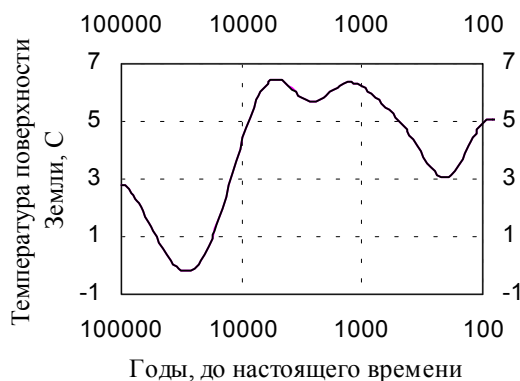


Рис. 4. Изменение температуры поверхности Земли по результатам инверсии скважинных температур (скв. Ильменская–1)

Таким образом, показана возможность получить среднюю температуру поверхности Земли для последнего оледенения, преобладавшего в период 80–10 тыс. лет назад. Впервые выполнены реконструкция изменений климата на период до 100 тыс. лет назад и прямая оценка амплитуды послеледниковое потепления по геотермическим данным для Южного Урала. Этот результат хорошо согласуется с данными, полученными другими методами, и является независимой оценкой послеледниковое потепления на Южном Урале.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 97–05–65123.

Литература: 1. *Rajver D., Safanda J., Shen P. Y.* The climate record inverted from borehole temperatures in Slovenia // *Tectonophysics*. 1998. 291. 1–4. P. 263–276. 2. *Safanda J., Rajver D.* Characteristics of the last glacial/interglacial warming in Central Europe inferred from deep borehole temperature logs // *Romanian Journal of Geophysics*. 1999. Special Issue. 3. *Shen P. Y., Beck A. E.* Least squares inversion of borehole temperature measurements in functional space // *J. Geophys. Res.* 1991. v. 96. NB12. P. 19965–19979. 4. *Пу-*

менов В. П., Попов Ю. А., Климанов В. А. Вертикальные вариации теплового потока и палеоклимат // Физика Земли. 1996. № 6. С. 84–92. **5. Голованова И. В.** Геотермические исследования в Ильменской скважине 1 // Ежегодник–1994. Информационные материалы / ИГ УНЦ РАН. 1995. С. 129–131. **6. Kukkonen I. T., Golovanova I. V., Khachay Yu. V. e. a.** Low Geothermal heat flow of the Urals fold belt—implication of low heat production, fluid circulation or palaeoclimate? // Tectonophysics. 1997. V. 276. P. 63–85. **7. Clauser C., Giese P., Huenges E. e. a.** The thermal regime of the crystalline continental crust—implications from the KTB // J. Geophys. Res. 1997. 102. P. 18417–18441. **8. Клименко В. В., Климанов В. А., Федоров М. В.** История средней температуры северного полушария за последние 11000 лет // Докл. АН СССР. 1996. Т. 348. ¹1. С. 111–114. **9. Climate change:**

The IPCC Scientific Assessment. Report of working group 1 of the Intergovernmental panel on climate change. N.–Y.: Cambridge Univ. press, 1990. 364 p. **10. Немкова В. К., Климанов В. А.** Характеристики климата Башкирского Предуралья в голоцене // Некоторые вопросы биоэволюции, палеомагнетизма и тектоники кайнозоя Предуралья / БНЦ УрО АН СССР. Уфа. 1988. С. 65–71. **11. Голованова И. В., Селезнева Г. В.** Реконструкция изменения климата на Южном Урале по измерениям температуры в скважинах // Ежегодник–1997. Информационные материалы / ИГ УНЦ РАН. Уфа. 1999. С. 103–110. **12. Stule 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. Vol. 23. N. 9–10. P. 1109–1114.

Я. Н. Хамидуллин

К ВОПРОСУ ПОСТРОЕНИЯ МЕТОДОЛОГИИ ВЫЯВЛЕНИЯ ОБЛАСТЕЙ ПОДГОТОВКИ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Проблема обнаружения областей подготовки сильных землетрясений является одной из самых актуальных в сейсмологии, представляющей наибольший интерес для прогноза и контроля сейсмоопасных явлений. Наиболее остро эта проблема стоит во внутриплитовых областях, где физическая природа возникновения сильных землетрясений до сих пор не выяснена.

Методология выявления областей подготовки сильных землетрясений должна базироваться на общем физическом описании процесса перераспределения упругой потенциальной энергии в литосфере. С позиций физики твердого тела возникновение этой энергии можно связывать с упругими смещениями атомов из их равновесного положения в кристаллической структуре вещества геологической среды. При этом запас упругой энергии принято в геофизике называть энергонасыщенностью среды.

Таким образом, проблема выявления областей подготовки сильных землетрясений в геофизическом аспекте сводится к инструментальному обнаружению зон с критической энергонасыщенностью. Исходя из общего физического описания сейсмического процесса [1], где под областью подготовки землетрясений с позиций

статистической физики понимается статистическая система, состоящая из ансамбля устойчивых и неустойчивых подсистем с неполными равновесиями, можно выделить следующие основные этапы по обнаружению областей подготовки землетрясений: 1 — выявление площадей с высокой энергонасыщенностью с помощью карт изолиний для параметра $S^{(b)}_{Mk}$, характеризующего степень энергонасыщенности в исследуемых объемах среды, оцениваемого по результатам регистрации сейсмической эмиссии в наиболее широком энергетическом диапазоне; 2 — анализ геоструктурных особенностей площадей с высокой энергонасыщенностью и исследование процессов накопления и высвобождения упругой энергии в этих областях, используя уравнение баланса, описывающее эти процессы; 3 — совместный анализ временных рядов параметра $S^{(b)}_{Mk}$, поля виброколебаний и особенностей флюидной динамики на выделенной площади с помощью запатентованного способа [2].

Литература: **1. Хамидуллин Я. Н.** Физика сейсмического процесса. Уфа, 1994. 183 с. **2. Пат. 2102780 РФ.** Способ контроля землетрясений / **Я. Н. Хамидуллин** / № 96 123157, Заяв. 1996 г.; Опубл. Бюл. 2. 1998.