

АТМОСФЕРНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И КЛИМАТ

УДК 550.361

ВЕКОВЫЕ ТРЕНДЫ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В ИСТОРИЧЕСКОЕ
ВРЕМЯ ПО ТЕРМОГРАММАМ СКВАЖИН

А. Д. Дучков, Г. Н. Поллак*

Институт геофизики СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Коптюга, 3, Россия

**Департамент геологических наук, Мичиганский университет, Ан Арбор, MI 48109-1063, США*

Дается краткое описание геотермического метода палеоклиматических реконструкций по термограммам скважин. Он позволяет изучать эволюцию поверхностной температуры в историческое время. Метод использован для анализа 17 термограмм по скважинам Алтае-Саянской области (Южная Сибирь). В итоге было установлено непрерывное увеличение средней поверхностной температуры в этом регионе с 1500 по 2000 г. Суммарный прирост поверхностной температуры составил в этот период ~ 1 °C. Для всех пяти столетий характерен положительный тренд изменения поверхностной температуры, однако с разной скоростью. Наибольшее увеличение температуры ($\sim 0,5$ — $0,6$ °C) произошло в XX веке. Указанные оценки практически совпали с результатами интерпретации глобальной базы данных (358 термограмм из разных районов мира). Это указывает на глобальность выявленных закономерностей. Геотермические данные свидетельствуют в пользу представлений о естественной природе процесса потепления. Выполненный анализ показал, что Южная Сибирь является благоприятным регионом для изучения основных тенденций изменения климата в историческое время геотермическим методом.

Термограммы скважин, инверсии термограмм, геотермический метод, палеоклиматические реконструкции, поверхностная температура, вековые тренды

CENTURY-LONG CLIMATE CHANGE TRENDS AT HISTORICAL
TIME, RECONSTRUCTED FROM BOREHOLE TEMPERATURE

A. D. Duchkov, H. N. Pollack*

Institute of Geophysics, SB RAS, 630090, Novosibirsk, prosp. Koptuyga, 3, Russia

**Department of Geological Sciences, University of Michigan, Ann Arbor, MI 48109-1063, USA*

Short description of a geothermal method of the paleoclimate reconstructions for the borehole temperature logs is given. It allows the surface temperature evolution at historical time to be studied. This method has been used to analyse the 17 temperature logs in Altai-Sayan area (South Asia). As a result a continuous increase in the mean surface temperature has been determined from 1500 up to 2000 years in this region. The total increase in the surface temperature during that period was about 1 °C. A positive trend of the surface temperature change (but at different rates) was typical for all five centuries. The highest increase in temperature, about 0.5—0.6 °C, took place in the XX century. These estimations practically coincided with the results of interpretation of the global data base (358 temperature logs from different areas of the world). This suggests that the determined regularities were global. Geothermal data evidence natural character of warming. Our analyses show that South Siberia is a favorable region for studying principal tendencies of climate changes at historical time by the geothermal method.

Borehole temperature logs, inversion of temperature logs, geothermal method, paleoclimate reconstructions, surface temperatures, century-long trends

ВВЕДЕНИЕ

Температурное поле верхнего (примерно до 1 км) слоя пород определяется двумя основными факторами — глубинным тепловым потоком и климатическими вариациями температуры приземного слоя воздуха (T_b). В однородных породах при постоянной T_b распределение температуры грунтов (T_r) (термограмма) является линейной функцией глубины (рис. 1). Если температура у

поверхности меняется со временем, то линейность термограмм нарушается, происходит или прогревание, или охлаждение пород. Разноприродные климатические колебания проникают до разной глубины в горные породы, уменьшаясь по амплитуде и освобождаясь от высокочастотных сигналов. В итоге в современном температурном поле формируются „климатические“ аномалии.

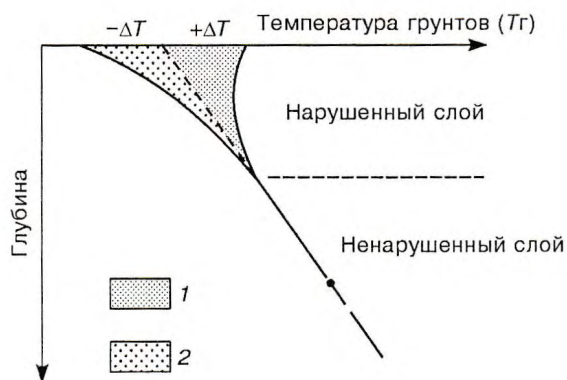


Рис. 1. Общий характер распределения температуры в верхнем слое горных пород.

1 — прогревание, 2 — охлаждение.

Преобладают в настоящее время на всех континентах положительные климатические аномалии (вогнутые термограммы), свидетельствующие о потеплении климата в историческое время. Климатические аномалии могут быть выделены, их интерпретация позволяет получить количественную информацию об эволюции температуры земной поверхности в прошлом. Здесь под поверхностной температурой (T_n) понимается температура горных пород на глубине 15–20 м (примерно на нижней границе слоя годовых колебаний) ниже поверхности. В северных широтах T_n обычно выше T_b на 3–7 °С, вследствие тепляющего влияния снежного покрова в зимний период. В зависимости от широты и местных условий это различие может существенно варьировать и для его определения требуется специальный анализ. Однако очевидно, что вариации T_n отражают основные тенденции изменения температуры приземного слоя воздуха. Это подтверждается инструментальными наблюдениями за температурой воздуха и почв (до глубин 3,2 м) на метеостанциях [Гиличинский и др., 2000; Дучков и др., 2000а].

Таким образом, современное температурное поле верхнего слоя пород сохраняет свидетельства температурных вариаций, происшедших у поверхности Земли. Со временем сигналы от удаленных климатических событий маскируются другими, более молодыми. Поэтому в геотермических данных наиболее отчетливы следы климатических вариаций, происшедших в последнее тысячелетие. Информация, содержащаяся в этом геотермическом „архиве“, является ценным дополнением к данным различных прямых методов (*проху* данные), используемых для понимания недавней истории климата. Извлечь эту информацию можно в результате соответствующей интерпретации (инверсии) термо-

грамм. Геотермический метод палеоклиматических реконструкций получил развитие в последние два десятилетия [Балобаев, 1991; Shen, Beck, 1991; Lewis, 1992; Сухорукова, Дучков, 1998; Балобаев, 2000; Демежко, 2001]. С его помощью можно исследовать эволюцию температуры земной поверхности в важный для истории человечества временной интервал, включающий малый ледниковый период, эпоху урбанизации и индустриализации. Метод применим для специального изучения техногенных аномалий T_n , вызванных вырубкой лесов, застройкой, и другими подобными действиями человека, тем более что он может обеспечить любое по детальности изучение территории при наличии скважин. Геотермический метод выявляет только основные тенденции (тренды) долговременных изменений поверхностной температуры и не может обеспечить годовое разрешение при изучении климатического сигнала.

В настоящей работе показана возможность использования геотермического метода для выявления основных закономерностей изменения палеотемператур во второй половине второго тысячелетия в Центральной Сибири, а также в ряде других районов мира. Основной упор делается на описание и анализ результатов интерпретации.

МЕТОДИКА

Оценка палеотемператур земной поверхности геотермическим методом осуществляется посредством инверсии современных температурных разрезов (термограмм). К настоящему времени разработано несколько инверсионных технологий, реализованных в виде компьютерных программ. Нами используется программа П. Шена [Shen, Beck, 1991; Shen et al., 1992], краткое описание которой дано в работе [Сухорукова, Дучков, 1998]. В данной работе мы напомним только некоторые аспекты методики.

Используемая математическая модель основывается на двух основных предположениях: среда считается одномерной (однородной или горизонтально-слоистой) и отсутствует конвективный теплоперенос. Отклонения этой идеализации от реальных условий проявляются в виде шумов. Прямая задача для одномерного уравнения теплопроводности формулируется в определенных интервалах глубин [z_n, z_r] и времен [t_0, t_1] с заданным начальным распределением поля температур $T(z, t)$:

$$\rho C(z) \frac{\partial}{\partial t} T(z, t) - \frac{\partial}{\partial z} [\lambda(z) \frac{\partial}{\partial z} T(z, t)] = A(z),$$

$$\begin{cases} T(z, t) = T(t), \\ -\lambda(z) \frac{\partial}{\partial z} T(z, t)|_{z=z} = q, \\ T(z, t_0) = T(z). \end{cases}$$

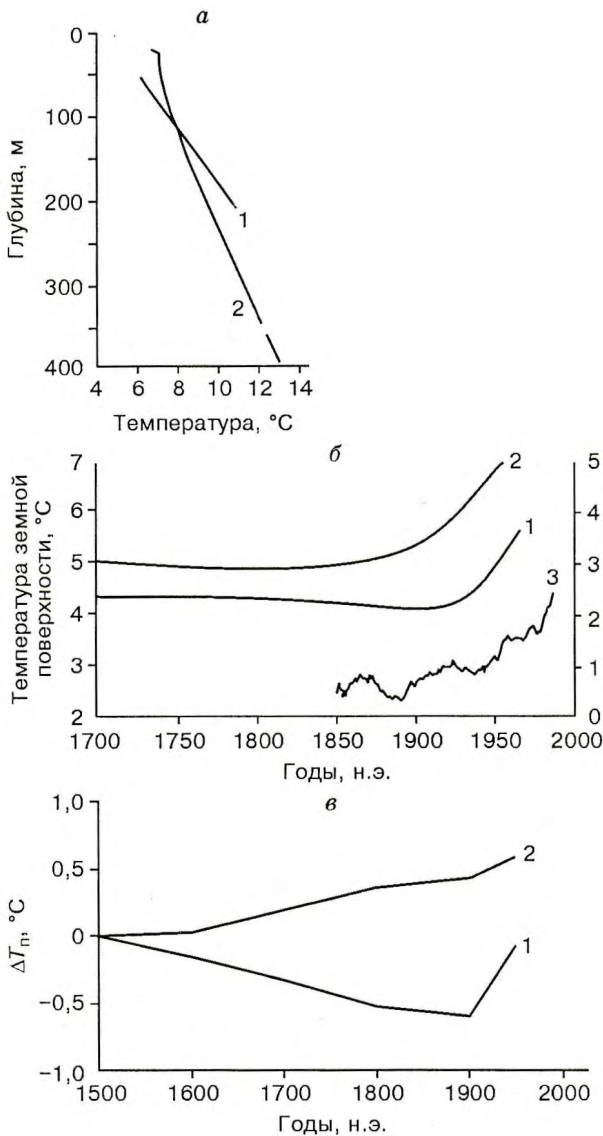


Рис. 2. Примеры результатов инверсии термограмм по скважинам Алтае-Саянской области.

а — термограммы по скважинам Гоньба-416 (1) и Богатырево-2045 (2); б — непрерывные графики изменения температуры земной поверхности (результат инверсии термограмм по методике [Shen, Beck, 1991]) по пунктам Гоньба-416 (1) и Богатырево-2045 (2) в течение трех последних столетий (до 1700 г.) и график изменения температуры воздуха (3) по наблюдениям на метеостанции г. Барнаул; в — графики изменения поверхностной температуры по скважинам Гоньба-416 (1) и Богатырево-2045 (2) за последние пять столетий (результат инверсии термограмм по упрощенной методике [Pollack et al., 1998]).

Здесь $T(z, t)$ — поле температур, $A(z)$ — интенсивность радиогенной теплогенерации в единице объема породы, $\lambda(z)$ — коэффициент теплопроводности, $\rho C(z)$ — теплоемкость породы при постоянном давлении, $T_n(t)$ — темпера-

тура земной поверхности и q — плотность теплового потока.

Обратная задача состоит в отыскании функции $T_n(t)$ по распределению температуры с глубиной в настоящий момент времени. Надо заметить, что обычно свойства пород на глубине z известны с плохой точностью. Это делает обратную задачу некорректной, с большим количеством возможных решений. Целесообразно переформулировать задачу в вероятностном смысле, как отыскание наиболее вероятного в статистическом смысле значения $T_n(t)$ в пространстве параметров модели. В итоге интерпретация будет заключаться в минимизации расхождения между наблюдавшимся и модельным температурными полями посредством подбора значений параметров модели. Решение находится методом конечных разностей в пространственной и временной областях.

Необходимо отметить, что использованное упрощение требует детального описания модели, включая и малоизвестные параметры. Поэтому проблема преодоления неединственности в большой степени перекладывается на плечи интерпретатора, который готовит исходные материалы к инверсии, задает входные параметры и их дисперсию. Результат инверсии будет тем ближе к истине, чем более точно будет задано начальное приближение и сужены интервалы входных параметров. Кроме того, область эквивалентности результатов, характеризующая степень неоднозначности инверсии, может быть уменьшена за счет более полной и информативной выборки данных, знания статистических свойств сигналов и многократности их измерений. Конечным результатом количественной интерпретации термограмм являются графики изменения температуры земной поверхности в последние несколько столетий (рис. 2).

Наиболее уверенные данные получаются при инверсии высокоточных ($\sim 0,01$ °C) термограмм, измеренных в выстоявшихся скважинах глубиной до 500–600 м, пробуренных в массивах плотных непроницаемых пород при минимальном влиянии поверхностных факторов с детальным изучением теплопроводности пород. Таких скважин мало. Обычно для палеоклиматических реконструкций используется фонд термограмм, полученных при изучении теплового потока. Чаще всего они осложнены неклиматическими помехами, неподдающимися предварительному учету.

Разными авторами геотермическим методом проанализированы сотни термограмм [Lewis, 1992; Clauser, Mareschal, 1995; Harris, Chapman, 1995; Shen et al., 1995; Сухорукова, Дучков, 1998; Дучков и др., 2000а; Демежко, 2001]. Получены важные для изучения палеоклимата

исторического времени результаты. Однако обозначились и некоторые дополнительные проблемы. Появление огромного количества графиков T_n по отдельным пунктам потребовало их совместного анализа для выявления региональных климатических изменений. Это оказалось довольно сложно в связи с различным подходом авторов к процессу инверсии. В то же время очевидно, что в большинстве случаев в результате инверсии удается уверенно определить основные характеристики климатического сигнала: амплитуды и тренды изменения поверхностной температуры за длительные отрезки времени.

Стремясь упростить и стандартизировать инверсионную процедуру, Г. Поллак с коллегами [Huang et al., 1996; Pollack et al., 1998] и авторы статьи ограничились при изучении истории поверхностной температуры только определением трендов столетних климатических изменений. В этом подходе используется то обстоятельство, что в общем случае геотермический метод лучше восстанавливает трендовую (низкочастотную) составляющую температурной истории. Рассмотрение наличного фонда скважин (термограмм) и характеристик уровня шумов позволило выбрать пять последних столетий в качестве практического интервала, в пределах которого целесообразно выполнять климатические реконструкции по геотермическим данным. Все основные температурные аномалии, связанные с климатическими изменениями в прошлые пять столетий, зафиксированы в температурном поле верхнего пятисотметрового слоя горных пород. В результате упрощенной инверсии также получают графики T_n , но уже в более обобщенном виде (см. рис. 2).

Новый подход позволяет повысить надежность результатов и дает возможность объединять результаты инверсии из разных скважин для получения осредненных значений изменения поверхностной температуры в прошлом для региона в целом. Результаты инверсий по отдельным скважинам могут быть весьма сложны и разнообразны. Индивидуальные особенности окружающей скважину обстановки осложняют результат интерпретации, маскируя региональный климатический сигнал. Для характеристики глобальных или региональных климатических изменений целесообразно рассматривать средние характеристики по группам скважин. При осреднении случайные шумы взаимно уничтожаются, а климатический сигнал, присущий всей рассматриваемой территории, наоборот, усиливается. Тем самым как бы решается основная задача выделения полезного сигнала на фоне неклиматических помех.

Упрощенная схема инверсии использована нами при оценке эволюции климата в Алтае-Са-

янской области. Еще ранее она применена Г. Поллаком с коллегами [Pollack et al., 1998] для анализа глобальной базы данных (358 термограмм). Рассмотрим полученные при этом результаты.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИНВЕРСИЙ

Алтае-Саянская область. Для палеоклиматических реконструкций были выбраны термограммы по 17 скважинам, пробуренным в разных тектонических зонах Алтае-Саянской складчатой области (Томь-Кольванская зона, Рудный Алтай, Бийско-Барнаульская и Тувинская впадины, Кузнецкий Алатау и Восточный Саян). Расположение скважин схематично показано на рис. 3 (квадрат $45 \div 56^\circ$ с.ш. и $80 \div 95^\circ$ в.д.); наибольшее их число приходится на восточную часть Северной Америки, Европу, Южную Африку и Австралию. Глубина скважин — 220—600 м. Термокартаж выполнялся электрическим термометром, относительная точность измерений — $0,01-0,02^\circ\text{C}$. Скважины вскрывают различные геологические разрезы: как горизонтально залегающие осадочные породы, так и сложные по форме тела метаморфических и магматических пород. Тепловые свойства пород изучены не достаточно детально, чаще всего из-за отсутствия керна. Весьма разнообразна география мест бурения: от равнин до горных хребтов. Не во всех случаях удалось учесть специальными поправками влияние неклиматических факторов на распределение температуры.

В результате инверсии получено 17 графиков изменения поверхностной температуры в последние пять столетий — от 1500 г. до 2000 г. Все они показаны на рис. 4 в нормированном по современной температуре виде (ΔT_n). В индивидуальных случаях фиксируется как увеличение, так и уменьшение ΔT_n со временем, хотя основная тенденция потепления проглядывает и в этой мешанине кривых. Очевидно, что интер-

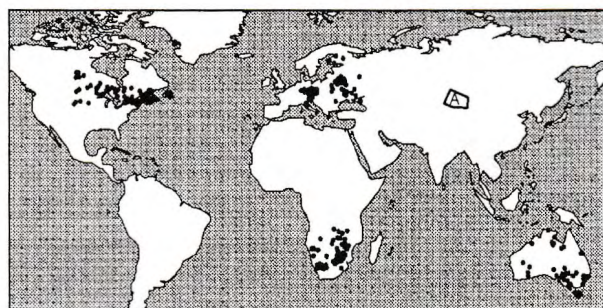


Рис. 3. Карта расположения скважин, термограммы по которым анализировались в настоящей работе (полигон А) и в работе [Pollack et al., 1998].

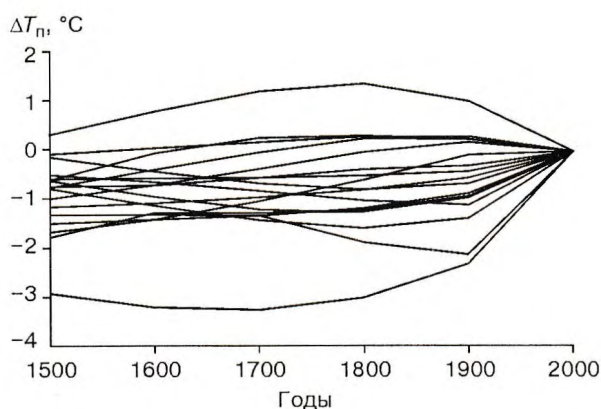


Рис. 4. Индивидуальные графики изменений поверхностной температуры (относительно современной) за пять последних столетий, полученные в результате инверсии 17 термограмм из Алтае-Саянской области (месторасположение показано на рис. 3) по упрощенной методике [Pollack et al., 1998].

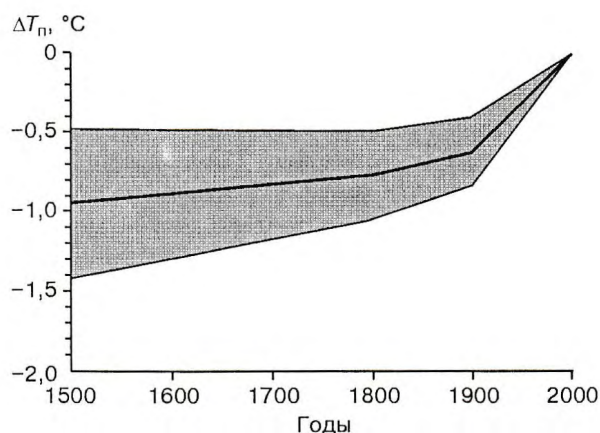


Рис. 5. Сводный график (черная ломаная линия) изменений поверхностной температуры (относительно современной) в Алтае-Саянской области за пять последних столетий, полученная в результате сложения графиков рис. 4.

Заштрихованная полоса характеризует стандартное отклонение.

претировать графики по отдельности практически бесперспективно. Для снижения уровня случайных шумов и усиления климатического сигнала мы воспользовались процедурой осреднения. Результат показан на рис. 5. Здесь черным выделена средняя кривая изменения поверхностной температуры для всей Алтае-Саянской области. Заштрихованная область соответствует дисперсии средних значений. Оценки температурного тренда за столетние периоды приведены в таблице.

Несмотря на большой разброс данных, результаты инверсии свидетельствуют о непрерывном повышении с возрастающей скоростью средней поверхностной температуры в Центральной Сибири в течение последних 500 лет. За этот период T_n повысилась в среднем на $0,9\text{ }^\circ\text{C}$. Наиболее теплым оказалось XX столетие, тогда же наблюдался и максимальный тренд нарастания поверхностной температуры.

Закономерен вопрос о значимости этих результатов: имеют они чисто местное значение или отражают глобальную тенденцию?

Глобальные данные. Для ответа на этот вопрос рассмотрим результаты подобного изу-

чения истории поверхностной температуры по более обширной (глобальной) базе данных, включающей 358 термограмм по скважинам, пробуренным в разных районах Европы, Африки, Австралии и Северной Америки [Pollack et al., 1998]. Местоположение изученных пунктов показано на рис. 3. Отметим, что в базе данных совершенно отсутствовали материалы из Азии. На рис. 6 приведена гистограмма оценок амплитуд изменения поверхностной температуры (ΔT_n) за 500 лет по отдельным термограммам из этой выборки. Она показывает, что в этот период примерно в 80 % пунктов происходило потепление климата. Усредненная температурная история для всех 358 пунктов приведена на рис. 7. Она идентична полученной для Южной Сибири (см. рис. 5), но со значительно более низкой дисперсией. В таблице приведены оценки прироста поверхностной температуры за каждое из пяти столетий. Глобальный анализ свидетельствует, что современная средняя температура в изученных пунктах в среднем на $1\text{ }^\circ\text{C}$ выше, чем была пять столетий назад. Наибольшее увеличение температуры ($\sim 0,5\text{ }^\circ\text{C}$) фиксируется так-

Средние оценки прироста поверхностной температуры (T_n , $^\circ\text{C}$) за каждое из пяти столетий в период с 1500 по 2000 г.

Регион	1500—1600 гг.	1600—1700 гг.	1700—1800 гг.	1800—1900 гг.	1900—2000 гг.	1500—2000 гг.
Алтае-Саянская область (17 терм.)	0,05	0,07	0,08	0,13	0,57	0,90
Северная Америка, Центральная Европа, Южная Африка, Австралия (358 терм.)	0,04	0,07	0,14	0,23	0,51	1,0

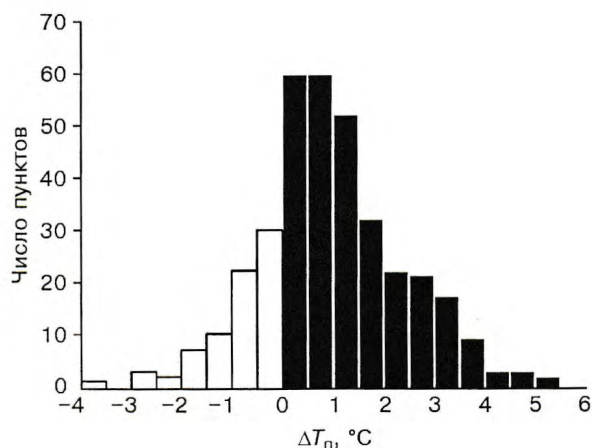


Рис. 6. Гистограмма оценок амплитуд изменения поверхностной температуры (ΔT_n) за 500 лет по отдельным термограммам из глобальной базы данных (месторасположение показано на рис. 3) [Pollack et al., 1998].

Черным отмечено общее потепление, белым — похолодание.

же в XX веке. Усредненные метеоданные за полтора последних столетия по той же территории (также показаны на рис. 7) в целом подтверждают эту тенденцию.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Инверсии термограмм из Алтае-Саянской области выявили такие же изменения поверхностной температуры в последние пять столетий, которые были зафиксированы в других районах мира при глобальном анализе. Это совпадение результатов повышает достоверность сибирских оценок и свидетельствует о глобальном характере подмеченных закономерностей. Геотермические данные подтверждают непрерывное увеличение средней поверхностной температуры (потепление климата) как в Южной Сибири, так и во многих районах мира на протяжении последних пяти столетий. Общее возрастание T_n за этот период повсеместно составило 0,9—1 °C. Зафиксирована различная скорость нарастания температуры во времени. В XVI—XVII вв., в малый ледниковый период, нарастание T_n было незначительным (~0,04—0,05 °C/100 лет). Основное потепление произошло в XVIII—XX вв. Наибольшее увеличение поверхностной температуры (~0,5—0,6 °C/100 лет), а соответственно и T_n , произошло в XX веке. Таким образом, геотермический анализ, основывающийся на прямых температурных измерениях и отличающийся по методологии от остальных *proxu* данных, обеспечивает независимое подтверждение

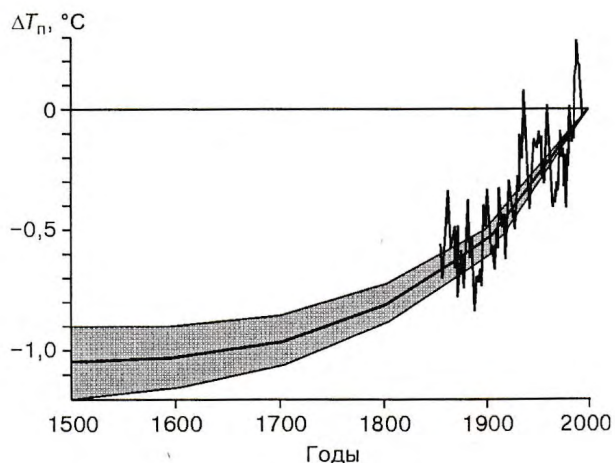


Рис. 7. Сводный график (черная ломаная линия) изменений поверхностной температуры (относительно современной) за пять последних столетий, полученный в результате сложения результатов инверсии 358 термограмм [Pollack et al., 1998].

Заштрихованная область характеризует стандартное отклонение.

необычного характера климата в XX веке, который по всем оценкам является теплейшим в прошедшем тысячелетии.

Если наблюдавшийся в последнее столетие темп увеличения T_n сохранится, то к концу XXI века глобальная поверхностная температура может возрасти еще не более чем на 0,5—0,6 °C. И это скорее всего минимальный прогноз. Экспериментальные данные свидетельствуют, что в последнюю треть XX века темп возрастания поверхностной температуры увеличился в Сибири примерно на порядок и составил 0,03—0,07 °C/год [Дучков и др., 2000б; Скачков и др., 2000].

Результаты инверсии термограмм свидетельствуют в поддержку представлений о природном характере процесса потепления. По геотермическим данным, оно началось значительно раньше (XVIII век?), чем мог проявиться техногенный фактор, связанный с индустриализацией и сопутствующим ростом концентрации „парниковых“ газов в атмосфере. Однако техногенный фактор мог наложиться на природный процесс, усилив тем самым потепление климата в XX веке. Уместно напомнить, что в последнее время появились модели, пытающиеся объяснить как потепление климата, так и возрастание концентрации „парниковых“ газов в атмосфере сугубо естественными причинами, без привлечения техногенных факторов [Китр, 2000; Найденов, Швейкина, 2000].

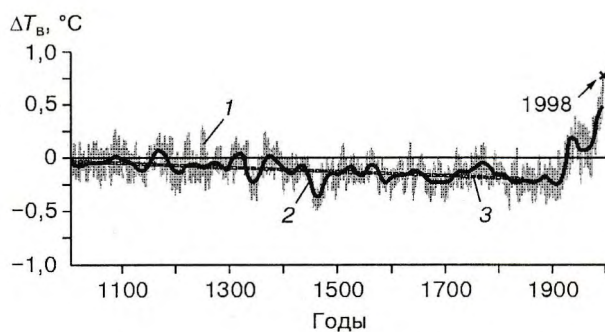


Рис. 8. Реконструкция изменений средней температуры приземного слоя воздуха в прошедшее тысячелетие [Mann et al., 1999].

1 — вариации среднегодовой температуры: до 1902 г. — оценки, полученные при анализе колонок льда, озерных и других осадочных пород, годовых колец деревьев, характера роста коралловых рифов и др. (геотермические данные не учитывались); в период 1902—1998 гг. — по измерениям на метеостанциях; 2 — осредненные вариации температуры воздуха (окно осреднения 40 лет); 3 — линейный тренд за 1000—1900 гг. Ось „0 °C“ — среднее за период 1902—1998 гг.

Следует отметить, что геотермические оценки эволюции поверхностной температуры существенно противоречат выводам работы М. Манна и др. [Mann et al., 1999], в которой выполнен синтез палеотемпературной информации, полученной при изучении колец деревьев и кораллов, ядер осадков и льда. Геотермические реконструкции эти авторы не использовали. Выполненная по *проху* данным реконструкция палеоклимата прошедшего тысячелетия показана на рис. 8. На ее основании авторы делают вывод о непрерывном похолодании климата (тренд порядка минус 0,03 °C/100 лет) в этот период вплоть до начала XX века. Последовавшее затем быстрое потепление, зафиксированное уже инструментальными наблюдениями, в цитируемой работе прямо связывается с влиянием техногенного фактора. Эта работа получила большой резонанс. В частности, она способствовала тому, что в опубликованном в апреле 2000 г. отчете Межправительственной комиссии по изменениям климата признается существование заметных признаков „влияния человека на глобальный климат“ [Силкин, 2000].

Нам представляется, что этот вывод нуждается в уточнении. Очевидно, что нельзя исключать из рассмотрения результаты геотермического метода, дающего прямые количественные оценки палеотемператур, в то время как остальные *проху* методы требуют предварительной градуировки. Однако ясно также, что совместное использование и интерпретация геотермических и других данных затруднено, вследствие их раз-

личного временного разрешения: годы—десяtkи лет — по указанным выше *проху* методам и тренды — по геотермии. Необходимо дальнейшее развитие методики совместного анализа всего массива палеотемпературной информации для выяснения законов эволюции поверхностной температуры в историческое время.

ВЫВОДЫ

1. В результате палеоклиматической интерпретации 17 термограмм по скважинам Алтае-Саянской области установлено непрерывное увеличение средней поверхностной температуры (потепление климата) на протяжении последних пяти столетий (1500—2000 гг.). За этот период поверхностная температура увеличилась примерно на 1 °C. Однако скорость процесса постоянно возрастала. Максимальное потепление климата (на 0,5—0,6 °C) произошло в XX веке, который и по другим данным является теплейшим в прошедшее тысячелетие. Палеоклиматические оценки для Алтае-Саянской области практически совпали с результатами интерпретации более обширной базы данных (358 термограмм по скважинам из разных континентов). Идентичность результатов свидетельствует о глобальности выявленных закономерностей.

2. Палеоклиматические реконструкции по термограммам скважин приводят к выводу о том, что потепление климата началось значительно раньше, чем мог проявиться техногенный фактор. Тем самым геотермические данные свидетельствуют в пользу представлений о естественной природе процесса потепления.

3. Выполненные расчеты показали, что Южная Сибирь является благоприятным регионом для изучения основных тенденций изменения климата в историческое время геотермическим методом. Для получения более достоверных параметров процесса потепления, а, возможно, и выяснения их пространственных изменений, необходимо продолжить инверсию термограмм и из других регионов Сибири.

Исследование выполнено при поддержке Интеграционного проекта СО РАН № 76 „Основные закономерности глобальных и региональных изменений климата и природной среды в позднем кайнозое Сибири“. Авторы благодарят S. Huang (Мичиганский университет, США) и А.А. Дучкова (ИГФ СО РАН) за помощь в выполнении данного исследования.

Литература

- Балобаев В.Т. Геотермия мерзлой зоны литосферы севера Азии. Новосибирск, Наука, 1991, 194 с.
 Балобаев В.Т. Реконструкция палеоклиматических условий севера Сибири по современным геотермическим данным // Проблемы климатических реконструкций в плейстоцене и

голоцене Сибири. Вып. 2. Новосибирск, Изд-во ИАЭТ СО РАН, 2000, с. 30—35.

Гличинский Д.А., Быховец С.С., Сороковиков В.А. и др. Использование данных метеорологических станций для оценки тенденций многолетних изменений температуры почв на территории сезонной и многолетней криолитозоны России // Криосфера Земли, 2000, т. IV, № 3, с. 59—66.

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

Дучков А.Д., Дучков А.А., Сухорукова К.В. Количественная оценка изменений поверхностной температуры в историческое время в Южной Сибири по геотермическим данным // Проблемы климатических реконструкций в плейстоцене и голоцене Сибири. Вып. 2. Новосибирск, Изд-во ИАЭТ СО РАН, 2000а, с. 199—207.

Дучков А.Д., Соколова Л.С., Павлов А.В. Оценка современных изменений температуры воздуха и грунтов в Западной Сибири // Криосфера Земли, 2000б, т. IV, № 1, с. 52—59.

Найденов В.И., Швейкина В.И. Вода же усиливалась и уменьшалась на Земле... // Наука в России, 2000, № 5, с. 42—49.

Силкин Б.Н. Признание антропогенного характера потепления климата // Сообщения Национального геофизического комитета РАН, 2000, № 7—8, с. 2—3.

Скачков Ю.Б., Скрябин П.Н., Варламов С.П. Термическая устойчивость криолитозоны Якутии при современном потеплении климата // Наука и образование (Якутск), 2000, № 3, с. 26—31.

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.

Clauser C., Mareschal J.-C. Ground temperature history in central Europe from borehole temperature data // Geophys. J. Internat., 1995, vol. 121, p. 805—817.

Harris R.N., Chapman D.S. Climate change on the Colorado Plateau of eastern Utah inferred from borehole temperature // J. Geophys. Res., 1995, vol. 100, p. 6367—6381.

Huang S., Shen P.-Y., Pollack H.N. Deriving century-long trends of surface temperature change from borehole temperatures // Geophys. Res. Lett., 1996, vol. 23, No. 3, p. 257—260.

Kump L.R. What driver climate? // Nature, 2000, vol. 408, p. 651—652.

Lewis T. (Ed.). Climatic change inferred from underground temperatures // Global and Planetary Change, 1992, vol. 6, No. 2/4, 281 p.

Mann M.E., Bradley R.S., Hughes M.K. Northern hemisphere temperatures during the past millennium: inferences, uncertainties, and limitations // Geophys. Res. Lett., 1999, vol. 26, No. 6, p. 759—762.

Pollack H.N., Huang S., Shen P.-Y. Climate change record in subsurface temperatures: a global perspective // Science, 1998, vol. 282, p. 279—281.

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

Shen P.-Y., Wang K., Beltrami H., Mareschal J.-C. A comparative study of inverse methods for estimating climatic history from borehole temperature data // Global and Planetary Change, 1992, vol. 6, No. 2/4, p. 113—127.

Shen P.-Y., Pollack 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, vol. 100, p. 6383—6396.

Поступила в редакцию
19 июня 2001 г.