

РЕКОНСТРУКЦИИ ДОЛГОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕПЛОвого ПОТОКА ЧЕРЕЗ ЗЕМНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ ПО ДАННЫМ ГЕОТЕРМИИ ГЛУБОКИХ СКВАЖИН

Д.Ю. Демежко, А.А. Горностаева

Институт геофизики УрО РАН, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 100, Россия

На основе анализа данных геотермии Уральской сверхглубокой СГ-4 и Онежской параметрической скважин впервые получены реконструкции изменений теплового потока через земную поверхность за последние 40 тыс. лет. Увеличение теплового потока в период плейстоцен/голоценового потепления (20—10 тыс. лет назад) примерно на 2 тыс. лет опережало рост температуры земной поверхности и, достигнув максимальных значений 0.08—0.13 Вт/м² около 13 тыс. лет назад, сменилось его снижением. Согласованные изменения теплового потока и среднегодовой инсоляции на широте 60° с.ш. 5—24 тыс. лет назад указывают на орбитальные факторы как основную причину климатических изменений этого периода. Анализируются соотношения между изменениями температуры, потока и концентраций двуокиси углерода в антарктических ледовых кернах.

Геотермия, реконструкция палеоклимата, тепловой поток, тепловой баланс земной поверхности, плейстоцен, голоцен, Урал, Карелия.

RECONSTRUCTIONS OF LONG-TERM GROUND SURFACE HEAT FLUX CHANGES FROM DEEP-BOREHOLE TEMPERATURE DATA

D.Yu. Demezhko and A.A. Gornostaeva

Based on analysis of geothermal data from the Ural superdeep borehole (SG-4) and Onega parametric borehole, the first reconstructions of the ground surface heat flux changes for the last 40 kyr have been made. The increase in heat flux during the Pleistocene–Holocene warming (20–10 ka) proceeded ~2 kyr earlier than the growth in the surface temperature; reaching the maximum value of 0.08–0.13 W/m² at ~13 ka, the heat flux was reduced. The coordinated changes in heat flux and average annual insolation at 60° N at 5–24 ka indicate that the orbital factors were the main cause of climatic changes in this period. The correlations between the changes in heat flux and CO₂ content in the Antarctic ice cores with temperature changes are analyzed.

Geothermy, paleoclimatic reconstructions, heat flux, energy balance of the Earth's crust, Pleistocene, Holocene, Urals, Karelia

ВВЕДЕНИЕ

Геотермические реконструкции температурной истории земной поверхности достаточно давно и прочно вошли в арсенал методов палеоклиматологии [Cermak, 1971; Lachenbruch, Marshall, 1986; Pollack et al., 1998; Dahl-Jensen et al., 1998; Demezhko, Shchapov, 2001; Majorowicz et al., 2002; Demezhko, Golovanova, 2007; и др.]. Они основаны на анализе современного распределения температур горных пород, измеренных по скважинам, и решении уравнения теплопроводности относительно верхнего граничного условия — изменений температуры земной поверхности. Получаемые реконструкции дают представление о длиннопериодных составляющих температурных колебаний, которые плохо воспроизводятся (или не воспроизводятся вовсе) другими косвенными палеоклиматическими свидетельствами [Кренке и др., 1995]. Эта задача допускает и другое граничное условие — изменения теплового потока через земную поверхность. Реконструкции длиннопериодных вариаций климатически обусловленного теплового потока имеют большое значение для понимания энергетики климатических процессов и факторов, определяющих естественную и антропогенную составляющие климатической изменчивости. Климатически обусловленные вариации теплового потока, в отличие от геотермического теплового потока, приводят к изменениям теплосодержания литосферы. Эти потоки совместно с потоком приходящей радиации и уходящими явными и скрытыми потоками тепла формируют тепловой баланс планеты.

Несмотря на актуальность рассматриваемой задачи, до настоящего времени известны лишь несколько публикаций, реализующих описанный подход. В работах [Beltrami, 2001; Beltrami et al., 2002] была обозначена проблема исследований, предложены пути ее решения, получены реконструкции теплового потока и оценки теплосодержания верхней части литосферы за период от нескольких столетий (Северное полушарие) до тысячи лет назад (Восточная Канада). Очевидно, что этими немногочисленными исследованиями информационный потенциал метода далеко не исчерпан. Остается неохваченной

значительная часть существующей базы данных термометрии. Не исследованы изменения теплового потока и теплосодержания пород в период глобальной перестройки климатической системы на границе голоцена и плейстоцена — около 10 тыс. лет назад.

В настоящей статье впервые приводятся и анализируются реконструкции историй изменения теплового потока через земную поверхность за последние 40 тыс. лет, полученные по данным геотермии Уральской сверхглубокой СГ-4 и Онежской параметрической скважин.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Реконструкция температурной истории земной поверхности по скважинным термограммам (инверсия) базируется на решении одномерного нестационарного уравнения теплопроводности в однородной или горизонтально-слоистой среде в отсутствии источников тепла и конвективных факторов теплопереноса. В качестве граничного условия задают изменения температуры земной поверхности $T(z=0, t)$, где z — глубина, t — время, в виде суммы простых функций (гармонические колебания, ступень, линейное изменение температуры), для которых решение уравнения теплопроводности имеется в явном виде. Так как это решение линейно по отношению к неизвестным параметрам граничного условия, то для каждой точки термограммы можно составить уравнение, содержащее $m + 2$ неизвестных параметров, в число которых входят m параметров температурной истории, начальная температура и невозмущенный температурный градиент. Задача инверсии в этом случае сводится к решению системы линейных уравнений и формулируется как поиск набора таких значений параметров, которые обеспечивали бы наименьшее в заданной метрике расхождение между наблюдаемыми и модельными температурами. Различные методы инверсии геотермических данных отличаются способами задания функций, аппроксимирующих температурную историю, и методом решения условно корректных задач. Для этого используются различные способы ограничения семейства эквивалентных решений, основанные на привлечении дополнительной информации, сглаживаниях и ограничениях амплитуд реконструируемых температур.

В качестве граничного условия на поверхности можно задать также тепловой поток $q(z=0, t)$. Методики реконструкции тепловой истории при этом будут аналогичны методикам реконструкции температур. Между двумя решениями — относительно температуры и потока — можно найти функциональную зависимость. В простейшем случае, когда на поверхности заданы гармонические колебания температуры с амплитудой A , частотой ω и начальной фазой φ :

$$T(0, t) = A \sin(\omega t + \varphi), \quad (1)$$

распространение температурных волн в однородном полупространстве с теплопроводностью a будет описываться выражением

$$T(z, t) = A e^{-kz} \sin(\omega t - kz + \varphi), \quad k = \sqrt{\omega/2a}. \quad (2)$$

Продифференцировав (2) по z , найдем изменения потока q через земную поверхность:

$$q(0, t) = -\lambda \left. \frac{\partial T(z, t)}{\partial z} \right|_{z=0} = AE\sqrt{\omega} \sin\left(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{4}\right) = E\sqrt{\omega} T\left(0, t + \frac{\pi}{4\omega}\right), \quad (3)$$

где λ — теплопроводность, E — тепловая активность (тепловая инерция) среды, определяемая через теплопроводность, теплопроводность и объемную теплоемкость пород ρC : $E = (\lambda \cdot \rho C)^{1/2} = \lambda(a)^{1/2} = \rho C(a)^{1/2}$. Изменения теплового потока опережают изменения температуры на $\pi/4$, или одну восьмую периода колебаний. Физический смысл такого сдвига понятен: именно изменения внешнего потока определяют изменения температуры, а не наоборот. Приведенные соотношения, например, хорошо описывают температурные колебания земной поверхности в суточном цикле под воздействием меняющейся инсоляции. Максимум инсоляции приходится на астрономический полдень, а максимальная температура земной поверхности наблюдается примерно на 3 ч позднее. Отметим, что E вопреки своему второму названию — «тепловая инерция» — определяет не величину запаздывания температур, а лишь соотношение между амплитудами колебаний потока и температуры.

Интегральное соотношение, связывающее изменения поверхностных температуры и потока в общем случае, получено в работе [Wang, Bras, 1999], а его конечно-разностная аппроксимация для случая, когда температурная история представлена непрерывной кусочно-линейной функцией, заданной в узлах равномерной сетки, приведена в [Beltrami et al., 2002]:

$$q(0, t_i) = \frac{2E}{\sqrt{\pi\Delta t}} \sum_{j=1}^i [T_j - T_{j-1}] \cdot [\sqrt{i - (j-1)} - \sqrt{i - j}]. \quad (4)$$

Здесь T — температура земной поверхности, заданная через равные промежутки времени Δt , $t_i = i\Delta t$, $i = 1 \dots n, j = 1 \dots i$. Эту формулу удобно использовать, когда необходимо оценить тепловую историю земной поверхности по ранее реконструированным температурным историям.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведены реконструкции тепловой истории земной поверхности на Урале и в Карелии, рассчитанные с помощью соотношения (4) по ранее полученным нами реконструкциям температурных историй [Demezhko, Shcharov, 2001; Демежко и др., 2013]. Формы кривых $T(0, t)$ и $q(0, t)$ существенно различаются. Изменения теплового потока предшествуют изменениям температуры земной поверхности, достигая максимальных значений (0.08—0.13 Вт/м²) в моменты максимальной скорости потепления и затем спадая. Хронологии изменений температуры и потока при этом различны для Урала и Карелии. На Урале максимум теплового потока был достигнут 10 тыс. лет назад, в Карелии — 14 тыс. лет назад. Эти различия, возможно, объясняются тем, что при оценке температурной истории по Уральской сверхглубокой скважине СГ-4 теплопроводность пород была принята равной $a = 1.0 \cdot 10^{-6}$ м²/с [Demezhko, Shcharov, 2001], а для Онежской параметрической скважины $a = 0.75 \cdot 10^{-6}$ м²/с [Демежко и др., 2013]. Выбор значения коэффициента теплопроводности вследствие недостатка экспериментальных данных часто бывает весьма субъективен, что приводит к значительным неопределенностям в оценке хронологии реконструированных событий.

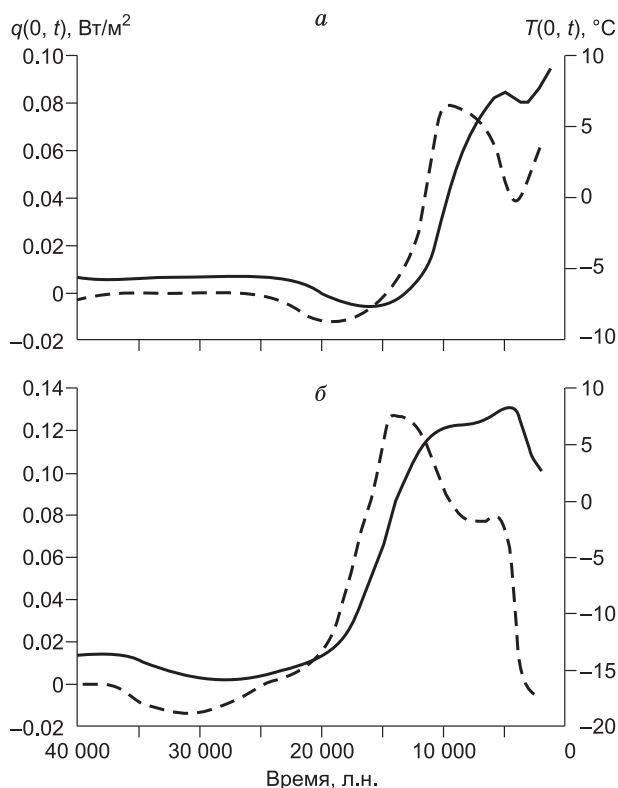
Более обоснованную привязку реконструкций к временной шкале можно сделать, предположив, что изменения теплового потока связаны с внешним радиационным воздействием (форсингом). Таким воздействием, определяющим плейстоценовые ледниково-межледниковые климатические колебания, является изменение инсоляции, обусловленное вариациями эксцентриситета, наклона земной орбиты и прецессии земной оси. На рис. 2 приведена теоретическая кривая среднегодовой инсоляции I для 60° с.ш. за последние 40 тыс. лет [Berger, Loutre, 1991]. В интервале 24—5 тыс. лет назад она хорошо коррелирует с реконструкцией теплового потока для Карелии. Отсутствие на реконструированной кривой максимума около 35 тыс. лет назад связано с естественными ограничениями геотермического метода — ухудшением его разрешающей способности по мере удаления в прошлое [Demezhko, Shcharov, 2001]. Соотношение амплитуд изменений теплового потока и инсоляции составляет $\Delta q/\Delta I = 1.1$ %.

Для уральской реконструкции потока максимальная корреляция с инсоляцией достигается при уменьшении теплопроводности на 30 % от исходной до $a = 0.7 \cdot 10^{-6}$ м²/с (см. рис. 2). Такая корректировка сдвигает кривую $q(0, t)$ дальше в прошлое, а ее амплитуда возрастает до 0.09 Вт/м² вследствие увеличения тепловой активности при уменьшении теплопроводности. Соотношение амплитуд изменений инсоляции и теплового потока: $\Delta q/\Delta I = 0.8$ %.

Согласованные изменения инсоляции и теплового потока указывают на то, что в период 5—24 тыс. лет назад изменения температуры земной поверхности определялись главным образом орбитальными факторами. При этом лишь около 1 % дополнительной радиации было израсходовано на увеличение теплосодержания Земли. В Карелии за этот период теплосодержание увеличилось на $4.1 \cdot 10^{10}$ Дж/м², на Урале на $2.9 \cdot 10^{10}$ Дж/м². Эти оценки характеризуют количество тепла, адсорбированного в столбе породы поперечным сечением 1 м², ограниченном по вертикали глубиной распространения аномалии плейстоцен/голоценового потепления приблизительно 2 км. Для сравнения, при значении стационарного геотермического теплового потока в исследуемых районах 0.040—0.045 Вт/м²

Рис. 1. Температурные ($T(0, t)$, сплошные линии) и тепловые ($q(0, t)$, штриховые) истории земной поверхности на Урале (а) и в Карелии (б).

Условия расчетов: $a = 1.0 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $\lambda = 2.5$ Вт/(м·К), $E = 2.5 \cdot 10^3$ Дж/(м²·К·с^{1/2}) (Урал); $a = 0.75 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $\lambda = 2.5$ Вт/(м·К), $E = 2.9 \cdot 10^3$ Дж/(м²·К·с^{1/2}) (Карелия).



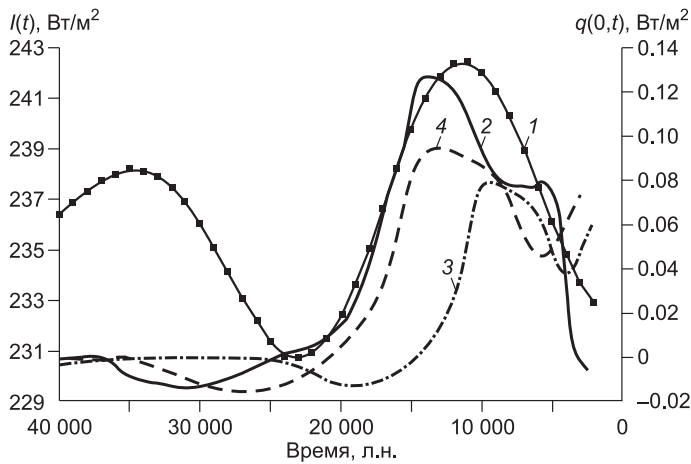


Рис. 2. Сопоставление изменений инсоляции $I(t)$ (I) на широте 60° с.ш. [Berge, Loutre, 1991] и реконструированных изменений теплового потока через земную поверхность $q(0, t)$ в Карелии (2) и на Урале (3, 4).

Кривая 3 соответствует теплопроводности пород $a = 1.0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, кривая 4 — $0.7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ($E = 3.0 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{с}^{1/2})$).

ческий эффект потепления на границе плейстоцена и голоцена сопоставим с выработкой тепла внутренними источниками Земли, главным образом — радиоактивными.

В моделях теплового баланса Земли реконструированный нами поток описывается как разность $q = Q_N - Q_H - Q_E$, где Q_N — входящая радиация на земной поверхности, Q_H и Q_E — потоки явного и скрытого тепла соответственно. Его величину обычно оценивают как долю потока входящей радиации. Для годового цикла она составляет 3—30 % [Choudhury et al., 1987; Krarez et al., 2009] и определяется значением параметра LAI (leaf area index). Полученные нами оценки $\Delta q/\Delta I \approx 1\%$ еще ниже, так как учитывают долю энергии, прошедшей через атмосферу и преобразованной в ней.

Интересно также сравнить геотермические реконструкции температур и потоков с данными об изменениях содержания двуокиси углерода в антарктических ледовых ядрах [Blunier et al., 1998; Barnola et al., 2003; Pedro et al., 2012]. Обычно данные об изменениях CO_2 во время последней дегляциации сопоставляют с глобальными или полушарными температурами, чтобы оценить причинно-следственные отношения между этими факторами (см. [Shakun et al., 2012] и ссылки в этой работе). Если рост CO_2 опережает рост температур, делается вывод о присутствии в механизме потепления дополнитель-

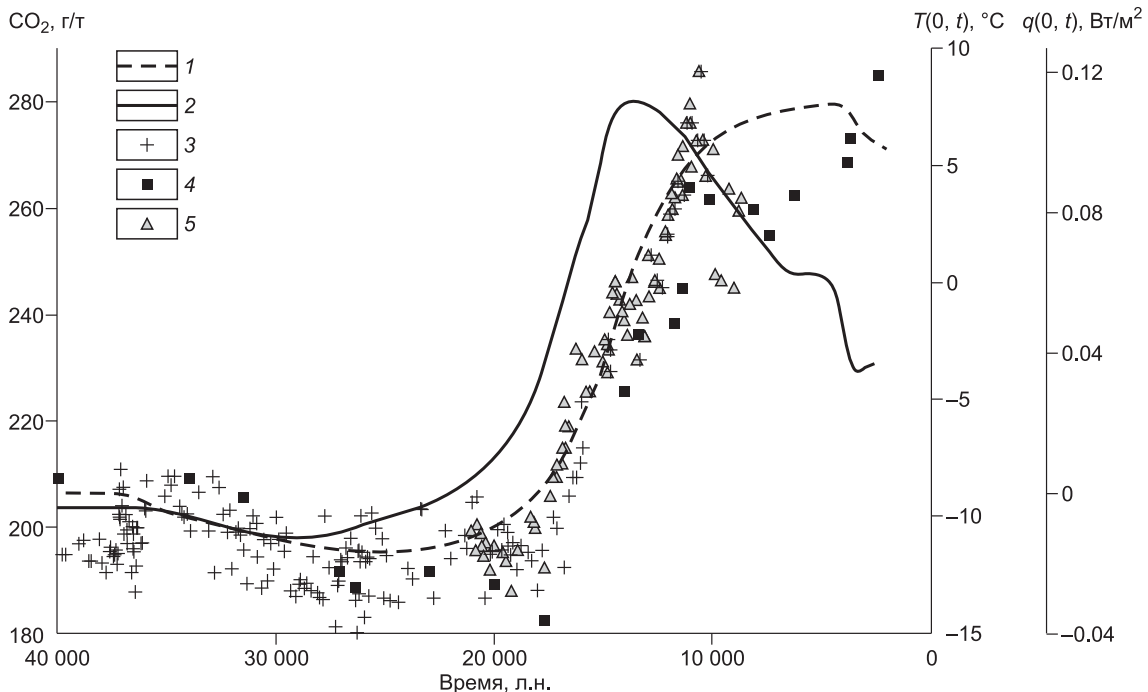


Рис. 3. Сопоставление усредненных по Уралу и Карелии изменений температуры земной поверхности (T), теплового потока (2) и содержаний двуокиси углерода в антарктическом ядре (3—5):

3 — [Blunier et al., 1998], 4 — [Barnola et al., 2003], 5 — [Pedro et al., 2012].

ного форсинга, обусловленного парниковым эффектом. Напротив, опережение температурной кривой указывает на подчиненную роль двуокиси углерода в потеплении. На наш взгляд, выводы, которые делают из подобных сравнений, весьма ненадежны, поскольку оценки содержаний двуокиси углерода, так же как и оценки возраста пузырьков воздуха, полученные разными авторами, сильно отличаются. Для подтверждения гипотезы о первичности CO₂ и парникового эффекта было бы логичнее сравнивать эти данные не с температурами, а с изменениями теплового потока. На рис. 3 приведены усредненные (по Уралу и Карелии) кривые $T(0, t)$ и $q(0, t)$ совместно с данными об изменениях CO₂. Сопоставление кривых показывает, что изменения двуокиси углерода гораздо ближе по форме и хронологии к изменениям температуры, нежели к изменениям теплового потока. Рост теплового потока начался раньше и происходил более высокими темпами, а 12 тыс. лет назад сменился падением. Увеличение концентрации двуокиси углерода продолжалось до рубежа 10 тыс. лет назад примерно с теми же темпами, что и рост температуры. Эти различия хорошо заметны даже на фоне неопределенностей в оценках CO₂. Если бы парниковый эффект, обусловленный ростом концентрации двуокиси углерода, играл значительную роль в плейстоцен/голоценовом потеплении, это неизбежно отразилось бы на форме кривой изменений потока. Последняя, однако, отражает лишь изменения среднегодовой инсоляции.

Проведенные исследования подтвердили высокую палеоклиматическую информативность геотермических данных, предложив новый инструментарий климатического анализа. Впервые реконструированы изменения теплового потока через земную поверхность в период последней, самой значительной естественной перестройки климатической системы на рубеже плейстоцена и голоцена. Полученные данные указывают на то, что происходившее потепление было обусловлено главным образом внешними, орбитальными, факторами.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 13-05-00724-а.

ЛИТЕРАТУРА

Демежко Д.Ю., Горностаева А.А., Тарханов Г.В., Есипко О.А. Реконструкция температурной истории земной поверхности за последние 30 тыс. лет по данным термометрии Онежской параметрической скважины // Геофизические исследования, 2013, т. 14, № 2, с. 38—48.

Кренке А.Н., Чернавская М.М., Браздил Р., Раунер Ю.Л., Золотокрылин А.Н., Ляхов М.Е., Попова В.В., Фогель Г.А., Тарусов А.В., Сурова Т.Г., Пушкин А.В., Добры Я., Кынцл Й., Карапавичус И. Изменчивость климата Европы в историческом прошлом. М., Наука, 1995, 224 с.

Barnola J.-M., Raynaud D., Lorius C., Barkov N.I. Historical CO₂ record from the Vostok ice core // Trends: a compendium of data on global change. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A., 2003.

Beltrami H. Surface heat flux histories from geothermal data: inferences from inversion // Geophys. Res. Lett., 2001, v. 28, № 4, p. 655—658.

Beltrami H., Smerdon J., Pollack H., Huang S. Continental heat gain in the global climate system // Geophys. Res. Lett., 2002, v. 29, № 8, doi:10.1029/2001GL014310.

Berger A., Loutre M.F. Insolation values for the climate of the last 10 million years // Quat. Sci. Rev., 1991, v. 10, № 4, p. 297—317.

Blunier T., Chappellaz J., Schwander J., Dällenbach A., Stauffer B., Stocker T., Raynaud D., Jouzel J., Clausen H.B., Hammer C.U., Johnsen S.J. Asynchrony of Antarctic and Greenland climate change during the last glacial period // Nature, 1998, v. 394, p. 739—743.

Cermak V. Underground temperature and inferred climatic temperature of the past millennium // Palaeogeogr. Palaeoclim. Palaeoecol., 1971, v. 10, p. 1—19.

Choudhury B.J., Idso S.B., Reginato R.J. Analysis of an empirical model for soil heat flux under a growing wheat crop for estimating evaporation by an infrared-temperature based energy balance equation // Agric. For. Meteorol., 1987, v. 39, p. 283—297.

Dahl-Jensen D., Mosegaard K., Gundestrup N., Clow G.D., Johnsen S.J., Hansen A.W., Balling N. Past temperatures directly from the Greenland Ice Sheet // Science, 1998, v. 282, p. 268—271.

Demezhko D.Yu., Shchapov V.A. 80,000 years ground surface temperature history inferred from the temperature-depth log measured in the superdeep hole SG-4 (the Urals, Russia) // Global Planet. Change, 2001, v. 29, № 1—2, p. 219—230.

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

Golovanova I.V., Puchkov V.N., Sal'manova R.Y., Demezhko D.Y. A new version of the heat flow map of the Urals with paleoclimatic corrections // Doklady Earth Sci., 2008, v. 422, № 1, p. 1153—1156.

Krapez J.-C., Oliosob A., Coudert B. Comparison of three methods based on the Temperature-NDVI diagram for soil moisture characterization // Proc. SPIE, 2009, v. 7472, 74720Y, p. 1—12, doi: 10.1117/12.830451.

Lachenbruch A.H., Marshall B.V. Changing climate: geothermal evidence from permafrost in the Alaskan Arctic // Science, 1986, v. 234, p. 689—696.

Majorowicz J., Wybraniec S. New terrestrial heat flow map of Europe after regional paleoclimatic correction application // Int. J. Earth Sci., 2011, v. 100, № 4, p. 881—887.

Majorowicz J., Safanda J., Skinner W. East to west retardation in the onset of the recent warming across Canada inferred from inversions of temperature logs // J. Geoph. Res., 2002, v. 107, № B10, 2227, doi:10.1029/2001JB000519.

Pedro J.B., Rasmussen S.O., van Ommen T.D. Tightened constraints on the time-lag between Antarctic temperature and CO₂ during the last deglaciation // Climate of the Past, 2012, v. 8, p. 1213—1221, doi:10.5194/cp-8-1213-2012.

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

Shakun J.D., Clark P.U., He F., Marcott S.A., Mix A.C., Liu Z., Otto-Bliesner B., Schmittner A., Bard E. Global warming preceded by increasing carbon dioxide concentrations during the last deglaciation // Nature, 2012, v. 484, № 7392, p. 49—54.

Wang J., Bras R.L. Ground heat flux estimated from surface soil temperature // J. Hydrol., 1999, v. 216, № 3—4, p. 214—226.

*Рекомендована к печати 11 октября 2013 г.
А.Д. Дучковым*

*Поступила в редакцию
22 июля 2013 г.*