
Научная статья

УДК 550.3: 550.361

DOI: 10.31084/2619-0087/2023-1-9

НОВЫЕ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ПАЛЕОКЛИМАТА НА ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОвого ПОТОКА

И. В. Голованова, Р. Ю. Сальманова

*Институт геологии Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук,
г. Уфа.*

golovanova@ufaras.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6015-0949>

vrushana@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9851-1666>

Изучение глубоких континентальных скважин выявило существенные вертикальные вариации теплового потока. Этот факт до сих пор не имеет удовлетворительного объяснения. Одной из возможных причин может быть влияние прошлых изменений климата, а именно изменений температуры поверхности Земли. В работе на примере платформенной части Республики Башкортостан обсуждаются некоторые следствия учета влияния палеоклимата на измеренный тепловой поток. Выполнено численное моделирование влияния палеоклимата на распределение теплового поля в скважине с использованием двух моделей прошлых изменений климата. Первая модель, принятая ранее, включает два крупных климатических эпизода прошлого — вюрмское оледенение 80–10 тысяч лет назад, и малый ледниковый период, 600–150 лет назад. Вторая использует климатическую кривую для мезокайнозоя, которая учитывает также потепление, начавшееся примерно 65 млн лет назад, достигшее максимума около 45 млн лет назад и сменившееся похолоданием, продолжающимся с некоторыми колебаниями до настоящего времени [Величко, 1987]. Показано, что при анализе вертикальных вариаций теплового потока использование модели прошлых изменений климата с учетом более отдаленных крупных климатических событий, чем это делалось ранее, позволяет оценить влияние палеоклимата как гораздо более значительное, чем считалось. Однако на данном этапе исследований при принятых моделях изменений температуры на поверхности Земли вертикальные вариации теплового потока, установленные по результатам экспериментальных геотермических исследований, невозможно объяснить лишь влиянием палеоклимата. Для решения проблемы необходимо детальное изучение теплофизических свойств пород, качественные замеры температуры в скважинах, совершенствование модели прошлых изменений климата в исследуемом регионе.

Ключевые слова: Тепловой поток, палеоклимат, вертикальные вариации

Благодарности: Работа выполнена в рамках Государственного задания ИГ УФИЦ РАН № FMRS-2022–0013

Original article

NEW ESTIMATES OF THE INFLUENCE OF PALEOCLIMATE ON THE VERTICAL DISTRIBUTION OF HEAT FLOW

I. V. Golovanova, R. Yu. Sal'manova

*Institute of Geology of the Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences,
Ufa, Russia*

Для цитирования: И. В. Голованова, Р. Ю. Сальманова. Новые оценки влияния палеоклимата на вертикальное распределение теплового потока // Геологический вестник. 2023. № 1. С. 96–104. DOI: 10.31084/2619-0087/2023-1-9

For citation: I. V. Golovanova, R. Yu. Sal'manova. (2023) New estimates of the influence of paleoclimate on the vertical distribution of heat flow. *Geologicheskii vestnik*. 2023. No. 1. P. 96–104. DOI: 10.31084/2619-0087/2023-1-9

© И. В. Голованова, Р. Ю. Сальманова, 2023

golovanova@ufaras.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6015-0949>
vrushana@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9851-1666>

The study of deep continental boreholes revealed significant vertical variations in heat flow. This fact still has no satisfactory explanation. One possible cause could be the effects of past climate changes, namely changes in the Earth's surface temperature. The paper discusses some consequences of accounting for the influence of paleoclimate on the measured heat flow using the example of the platform part of the Republic of Bashkortostan. A numerical simulation of the influence of paleoclimate on the distribution of the thermal field in the borehole was performed using two models of past climate changes. The first model, adopted earlier, includes two major climatic episodes of the past, the Würm glaciation 80–10 thousand years ago, and the Little Ice Age, 600–150 years ago. The second model uses the climatic curve for the Meso-Cenozoic, which additionally takes into account the warming that began about 65 Ma, reached its maximum about 45 Ma, and followed by a cooling that continued with some fluctuations until the present time [Velichko, 1987]. It is shown that, in the analysis of vertical variations in heat flow, the use of a model of past climate changes, taking into account more distant large climatic events than has been done previously, allows us to estimate the paleoclimate influence as much more significant than previously thought. However, at this stage of the research, with the accepted models of temperature changes at the Earth's surface, the vertical variations of the heat flow established by the results of experimental geothermal studies cannot be explained only by the influence of the paleoclimate. To solve the problem, we need a detailed study of the thermophysical properties of rocks, high-quality temperature measurements in wells, and improvement of the model of past climate changes in the region under study.

Keywords: Heat flow, paleoclimate, vertical variations

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the State Assignment of IG UFIC RAS No. FMRS-2022–0013

Введение

Изучение теплового состояния недр — одна из важнейших проблем геофизики. Тепловой поток является основным источником информации о тепловом состоянии Земли и энергетике происходящих в ней процессов. Прикладные аспекты исследования теплового поля связаны с оценкой геотермальных ресурсов для их использования как источника энергии, а также с применением геотермического метода при поисково-разведочных работах. Информация о реальном тепловом потоке и термических свойствах горных пород необходима для моделирования осадочных бассейнов и нефтегазоносных систем. Показано, что неопределенность в этих данных приводит к резкому снижению достоверности моделирования [Chekhonin et al., 2020].

В данной работе на примере платформенной части Республики Башкортостан обсуждаются некоторые следствия учета влияния палеоклимата на измеренный тепловой поток. Рассматривается зависимость плотности теплового потока от исследованной глубины скважин.

Изученность

Изучение глубоких континентальных скважин выявило существенные вертикальные вари-

ации теплового потока. Данные о возрастании теплового потока с глубиной во всех изученных континентальных сверхглубоких скважинах относятся к наиболее важным научным результатам [Пименов и др., 1996; Emmermann and Lauterjung, 1997; Попов и др., 1999; Popov et al., 1999; Mottaghy et al., 2005 и др.]. В прилегающей к Уралу части Восточно-Европейской платформы также пробурено несколько скважин глубиной до 5 км. Тепловой поток, вычисленный по этим скважинам, также имеет значительные вертикальные вариации и возрастает с глубиной [Голованова, 2005]. Этот факт до сих пор не имеет удовлетворительного объяснения. Одной из возможных причин может быть влияние прошлых изменений климата, а именно изменений температуры поверхности Земли.

Обычно при построении карт распределения теплового потока принято использовать измеренные значения теплового потока, без учета каких либо поправок, которые могут изменяться от региона к региону. Для дальнейшего использования данных по тепловому потоку необходимо, по возможности, исключить влияние искажающих факторов. Одним из таких факторов, влияние которого можно учесть и исключить, является палеоклимат.

Известно, что благодаря механизму теплопроводности колебания температуры на поверхности проникают вглубь Земли, с затуханием

амплитуды и запаздыванием по времени, искажая температурное поле, поэтому современное распределение температур в верхних слоях пород зависит от предыстории климатического процесса. Для учета влияния палеоклимата на измеряемую плотность теплового потока необходимы надежные сведения об изменении температуры поверхности Земли в прошлом, а также о тепловых свойствах пород, слагающих разрез. Влияние климатических изменений температуры поверхности Земли на распределение температуры с глубиной в приповерхностных слоях пород известно с 1930-х годов, когда началось изучение теплового потока Земли. Активные международные исследования влияния палеоклимата на вертикальные вариации теплового потока, начатые в 1988 г. Международной комиссией по тепловому потоку (IHFC), показали, что влияние палеоклимата на вертикальные вариации теплового потока ранее существенно недооценивалось.

На юго-восточной окраине Восточно-Европейской платформы и на Урале при определении теплового потока поправки на климат прошлых эпох ранее не вводились из-за отсутствия точных данных о длительности климатических эпох и амплитуде изменения температур за это время [Сальников, 1984]. Первая попытка внести поправки на влияние палеоклимата в измеренный тепловой поток на этой территории была сделана И. Кукконеном в работе [Kukkonen et al., 1997]. Он использовал упрощенный подход, когда учитывалась только максимальная глубина определения теплового потока, в то время как искажения, вызванные влиянием палеоклимата, распределены по глубине неравномерно [Пименов и др., 1996; Голованова др., 2000].

В последнее время сведения об изменении температуры поверхности Земли в изучаемом регионе существенно пополнились [Демежко, 2001; Голованова, 2005; Голованова, Валиева, 2006; Demezhko, Golovanova, 2007 и др.], что позволяет более обоснованно учесть влияние палеоклимата на измеряемый тепловой поток. По геотермическим данным получены многочисленные оценки изменений палеоклимата. Результаты геотермических реконструкций проанализированы совместно с метеоданными и немногочисленными другими имеющимися сведениями о прошлых изменениях климата. Анализ геотермических данных по уральским скважинам позволил выявить широтную зависимость климатического сигнала за последние несколько столетий [Демежко, 2001]. Более отда-

ленные климатические события, включая вюрм-голоценовое потепление, оценены по данным из трех глубоких скважин в Предуралье и на Южном и Среднем Урале [Демежко, 2001; Голованова, Валиева, 2006]. Анализ геотермических данных по более обширной территории, выполненный Д. Ю. Демежко с соавторами, позволил выявить закономерности пространственного распределения амплитуды плейстоцен-голоценового потепления в северной Евразии [Demezhko et al., 2007]. С учетом всех имеющихся данных для Урала и прилегающих территорий предложена модель прошлых изменений климата, учитывающая закономерности пространственного распределения климатического сигнала, и построена карта теплового потока, исправленного на влияние палеоклимата [Голованова и др., 2008]. Для территории Европы на основе аналогичной, но несколько упрощенной модели, введены региональные поправки в измеренный тепловой поток и построена карта теплового потока с учетом влияния палеоклимата [Majorowicz, Wybraniec, 2010]. Показано, что поправки могут быть весьма значительными и достигать 50% от измеренных классическим способом значений теплового потока. Это в свою очередь ставит вопрос о необходимости пересмотра прежних результатов измерений теплового потока в различных регионах и уточнения выводов, сделанных на основе их анализа. Отметим, что в перечисленных работах фактически учитывались изменения температуры поверхности Земли, начиная с плейстоцен-голоценового потепления. Более ранние значительные изменения температуры не учитывались. Как будет показано ниже, они тоже могут оказать значительное влияние на вертикальное распределение теплового потока.

Методика расчетов

Анализируя масштаб палеотемпературных изменений, оставивших заметный след в современном геотемпературном поле, Д. Ю. Демежко [2001] пришел к выводу, что заметный след сохраняют лишь те эпизоды, длительность которых равна или более времени, прошедшего после их окончания. Считается, что в современном геотемпературном поле наиболее заметный след оставили два климатических эпизода прошлого — вюрмское оледенение 80–10 тысяч лет назад, и малый ледниковый период, 600–150 лет назад [Демежко, 2001].

Предложенная модель прошлых изменений климата, учитывающая закономерности про-

странственного распределения климатического сигнала [Голованова и др., 2008], использована для математического моделирования вызванных ими искажений теплового потока и геотермического градиента.

Выполнено численное моделирование влияния палеоклимата за последние 250 тыс. лет на распределение теплового поля в скважине. Решалось одномерное нестационарное уравнение теплопроводности для неоднородной среды с заданными начальным и граничными условиями. Программа написана Е. А. Смородовым [Голованова и др., 2000].

Численными методами решается нестационарное уравнение теплопроводности для неоднородной среды с границами $x = 0$ и $x = L$:

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

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

и граничными условиями $T(0, t) = T_1(t)$

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

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

Задача решалась методом конечных разностей.

Программа позволяет использовать данные о распределении тепловых свойств по разрезу конкретной скважины. К сожалению, имеющиеся сведения о теплофизических свойствах явно недостаточны для того, чтобы охарактеризовать весь разрез. Кроме того, вычисленные искажения градиента температуры зависят только от теплопроводности. Поэтому для расчета искажений градиента температуры использовалось типичное для кристаллических пород значение коэффициента температуропроводности $a = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. Также выполнена оценка влияния изменений температуропроводности на распределение искажений градиента.

В качестве граничного условия на поверхности Земли использованы данные о региональном палеоклимате. При расчетах мы опирались на сведения об изменении средней глобальной температуры

воздуха в северном полушарии в отклонениях от современной температуры, приведенные в работе [Демежко, 2001] как компиляция из работ [Jouzel et al., 1987; Клименко и др. 1996], с учетом регионального коэффициента (рис. 1). В первом приближении для получения региональной палеотемпературы можно умножить среднеглобальное отклонение температуры от современной на коэффициент K , зависящий от широты местности φ . Мы использовали зависимость, рекомендованную в работе [Пименов и др., 1996]:

$$K(\varphi) = 1.5 + (\varphi - 40) / 30$$

Влияние долготы учитывается введением так называемой эквивалентной широты, которая включает влияние одновременно широты и долготы местности:

$$\varphi_{\text{ЭКВ}} = \varphi - (l - 60) \times 0.25,$$

где φ — широта, l — долгота.

Отметим, что были предложены также несколько другие зависимости для описания регионального распределения палеоклиматического сигнала [Demezhko et al., 2007], однако для изучаемой территории результат практически не изменяется.

При моделировании влияния палеоклимата на распределение теплового поля в скважине существенное значение имеет начальная температура поверхности Земли T_0 . При расчетах для временного интервала 200–300 тыс. лет эта начальная

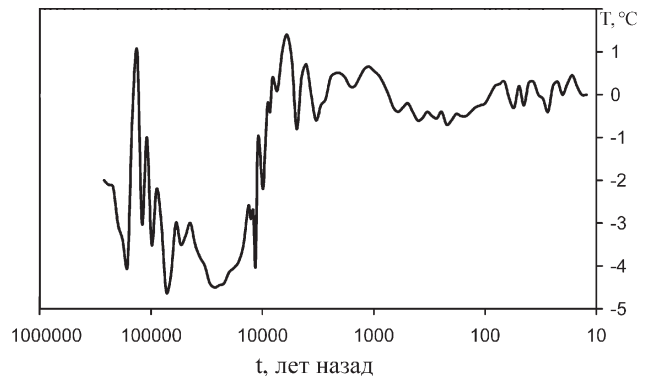


Рис. 1. Среднеглобальная температура воздуха в северном полушарии в отклонениях от современной температуры [Демежко, 2001] (компиляция из работ [Jouzel et al., 1987; Клименко и др. 1996])

Fig. 1. The average global air temperature in the Northern Hemisphere as deviated from today's temperature (according to [Demezhko, 2001]) (compilation from [Jouzel et al., 1987; Klimenko et al. 1996])

температура принимается равной усредненной за последний 1 млн лет температуре и рассчитывается для района конкретной скважины с учетом регионального коэффициента [Пименов и др., 1996].

Градиент температуры на нижней границе G_0 определялся по тепловому потоку на наибольшей глубине, для которой имеются надежные геотермические данные. Отметим, что изменение задаваемого на нижней границе теплового потока не влияет на рассчитанные искажения градиента температуры по глубине.

Начальный профиль температуры в скважине рассчитывался по тепловому потоку, теплопроводности пород разреза и температуре поверхности. Предполагалось, что температура поверхности в начальный момент времени была равна усредненной за последний миллион лет температуре поверхности Земли [Пименов и др., 1996].

При наличии сведений о более отдаленных во времени изменениях климата можно попытаться оценить и их влияние на вертикальные вариации геотермического градиента и теплового потока. При моделировании осадочных бассейнов, например, в пакете ГАЛО [Галушкин, 2007], такая возможность заложена. Однако существует проблема недостатка надежных сведений о прошлых изменениях климата и о теплофизических свойствах пород. Насколько известно авторам, специально для анализа вертикальных вариаций теплового потока такой подход не использовался.

Для южной части Русской равнины известна климатическая кривая для мезокайнозоя (рис. 2) [Величко, 1987], которую можно использовать для оценки влияния палеоклимата на распределение теплового потока по глубине на территории Республики Башкортостан.

На кривой отчетливо выделяется потепление, начавшееся примерно 65 млн лет назад, достигшее максимума около 45 млн лет назад и сменившееся похолоданием, продолжающимся с некоторыми колебаниями до настоящего времени. Несомненно, такой значительный эпизод должен был оставить заметный след в геотемпературном поле.

Выполнено моделирование влияния палеоклимата на вертикальное распределение искажений геотермического градиента и теплового потока описанным выше способом. Расчеты велись на период от 80 млн лет назад до настоящего времени. Распределение температуры по глубине, полученное для времени 250000 лет назад, использовалось в качестве начального для дальнейших расчетов до настоящего времени.

Обсуждение результатов

Результаты моделирования, полученные при значении коэффициента температуропроводности $a = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ представлены на рис. 3.

Расчеты на период до 250000 лет назад с учетом влияния вюрмского оледенения и малого ледникового периода показали, что наиболее значительные отклонения градиента вызваны потеплением примерно на 10 градусов, произошедшим в конце ледникового периода около 10 тыс. лет назад. Тепловое поле массива горных пород может быть значительно искажено до глубины 2–2.5 км, однако искажения, вызванные влиянием палеоклимата, затухают только на глубинах 6–7 км. Похолодание малого ледникового периода (150–650 лет назад) оказывает решающее влияние на распределение теплового потока в верхних 400–500 м.

При изменении температуропроводности кривая искажений градиента несколько сдвигается по глубине: при уменьшении температуропроводности — вверх, а при увеличении — вниз. При этом амплитуда колебаний увеличивается при уменьшении температуропроводности. Тем не менее, на глубинах, изученных в глубоких скважинах на территории Республики Башкортостан, искажения градиента температуры невелики.

На рисунке 3 показаны также искажения градиента температуры по глубине, полученные при расчетах на период до 80 млн лет назад. Видно, что при использовании такой модели палеоклимата искажения градиента в самой верхней части скважины оказываются меньше, чем при моделировании на 250000 лет, а тепловой поток в верхней части занижен в меньшей степени. С увеличением глубины искажения градиента меняют знак, и на глубинах ниже 1 км градиент, а, следовательно, и тепловой поток оказываются завышенными гораздо больше, чем в случае расчета только на 250000 лет.

Как уже отмечалось, в глубоких скважинах на изучаемой территории, так же, как и в других регионах, наблюдаются значительные вертикальные вариации и возрастание теплового потока с глубиной [Голованова, 2005]. Профиль измеренного теплового потока в этих глубоких скважинах свидетельствует об его увеличении с глубиной и в какой-то мере может быть объяснен влиянием климата прошлого. Значительные вертикальные вариации, которыми осложнен профиль, имеют другую природу [Голованова, 2005].

Искажения теплового потока влиянием палеоклимата в интервале его определения можно

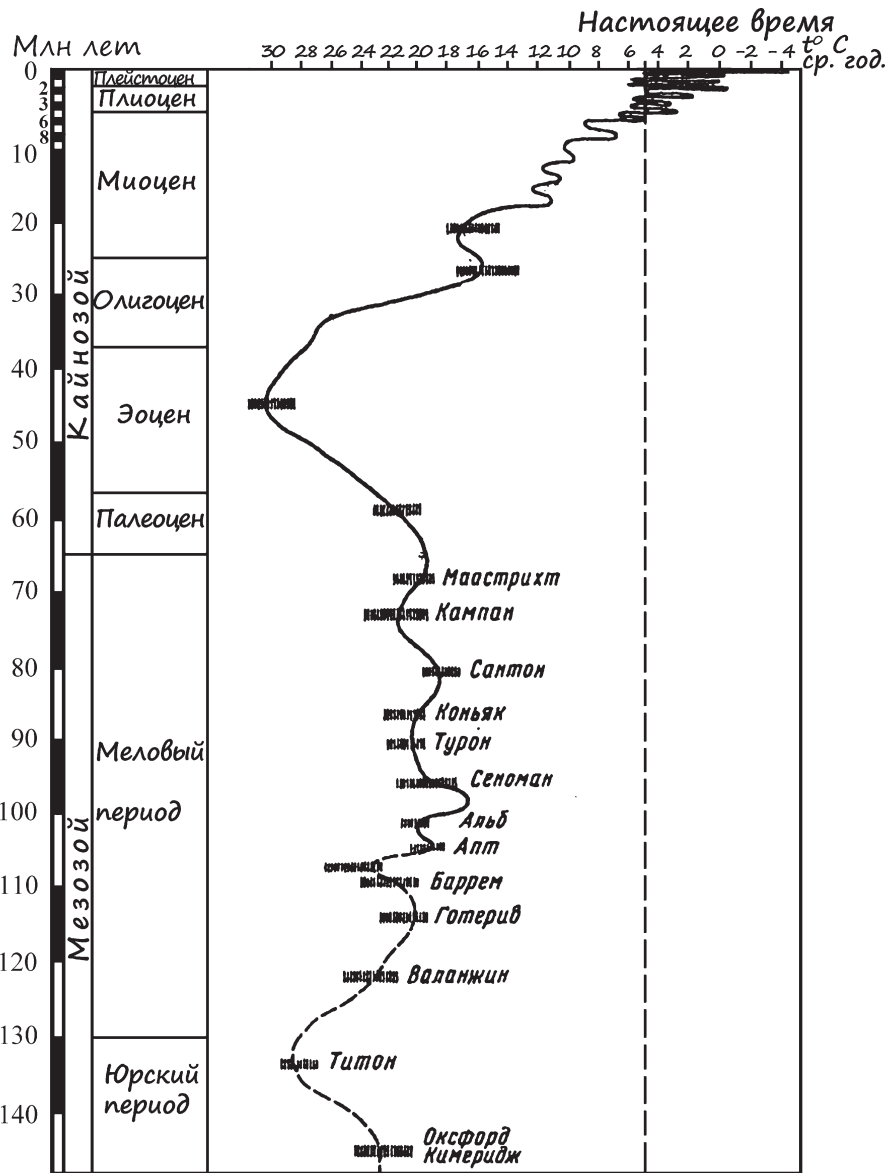


Рис. 2. Термическая кривая для мезо-кайнозоя южной части Русской равнины [Величко, 1987]

Fig. 2. Thermal curve for the Meso-Cenozoic of the southern part of the Russian Plain [Velichko, 1987]

вычислить, умножив теплопроводность на искажения градиента температуры. По результатам моделирования с использованием разных моделей прошлых изменений климата выполнены оценки возможного искажения теплового потока. К сожалению, изученность теплофизических свойств по разрезам отдельных скважин совершенно недостаточна для того, чтобы получить детальный профиль искажений, вызванных влиянием палеоклимата. Поэтому для расчета искажений теплового потока использовалось типичное среднее для пород разреза значение коэффициента теплопроводности 2.5 Вт/(м×К).

При использовании модели на 250000 лет отклонения градиента температуры, обусловленные палеоклиматом, невелики и достигают максимума 0.30–0.35 мК×м⁻¹ на глубине 2200–2700 м, что эквивалентно отклонению градиента температуры на 1.3–1.6%. Это эквивалентно весьма небольшому отклонению плотности теплового потока, не превышающему 1–1.3 мВт×м⁻². Выше 1500 м возмущение температурного градиента выше, чем в нижней части скважины. Вертикальные вариации плотности теплового потока (определенные на основе экспериментальных геотермических исследований скважин) в этом случае не могут

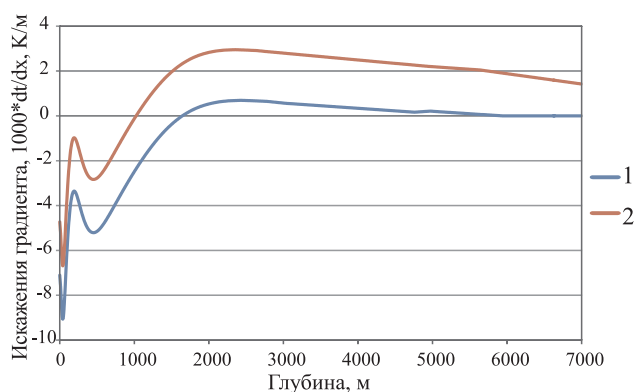


Рис. 3. Искажения градиента температуры с глубиной
Условные обозначения: 1 — моделирование на 250 000 лет; 2 — моделирование на 80 млн лет. $a = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

Fig. 3. Temperature gradient distortions with depth

Legend: 1 — simulation for 250,000 years; 2 — simulation for 80 million years. $a = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

быть объяснены только палеоклиматическим эффектом.

При использовании модели палеоклимата на 80 млн лет искажения градиента и теплового потока в самой верхней части скважины оказываются меньше, чем при моделировании на 250 000 лет, а тепловой поток в верхней части занижен в меньшей степени. С увеличением глубины искажения градиента меняют знак, и на глубинах ниже 1 км градиент и тепловой поток оказываются завышенными гораздо больше, чем в случае расчета только на 250 000 лет и могут достигать $10 \text{ мВт} \times \text{м}^2$ и больше, в зависимости от теплопроводности. В этом случае влияние прошлых изменений климата на распределение теплового потока в скважинах с глубиной оказывается гораздо более значительным, чем в случае моделирования на 250 000 лет, хотя и не может полностью объяснить наблюдаемое увеличение теплового потока с глубиной. Вероятнее всего, определенную роль в вертикальных вариациях теплового потока играют изменения теплофизических свойств пород с глубиной и, возможно, эффекты миграции жидкости [Mottaghy et al., 2005; Popov et al., 2021].

Заключение

Таким образом, при анализе вертикальных вариаций теплового потока использование модели прошлых изменений климата с учетом более отдаленных крупных климатических событий, чем это делалось ранее, позволяет оценить влияние палеоклимата как гораздо более значительное,

чем считалось. Однако на данном этапе исследований при принятых моделях изменений температуры на поверхности Земли вертикальные вариации теплового потока, установленные по результатам экспериментальных геотермических исследований, невозможно объяснить лишь влиянием палеоклимата. Для решения проблемы совершенно необходимо детальное изучение теплофизических свойств пород, качественные замеры температуры в скважинах, совершенствование модели прошлых изменений климата в исследуемом регионе.

Список литературы

- Величко А. А. Структура термических изменений палеоклимата мезокайнозоя по материалам изучения Восточной Европы // Климаты Земли в геологическом прошлом. — М.: Наука, 1987. — С. 5–43.
- Галушкин Ю. И. Моделирование осадочных бассейнов и оценка их нефтегазоносности. — М.: Научный мир, 2007. — 456 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 ИГ УНЦ РАН. — Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2006. — С. 201–203.
- Голованова И. В., Пучков В. Н., Сальманова Р. Ю., Демежко Д. Ю. Новый вариант карты теплового потока Урала, построенный с учетом влияния палеоклимата // Доклады Академии наук. — 2008. — Т. 422. — № 3. С. 394–397.
- Голованова И. В., Селезнева Г. В., Смородов Е. А. Реконструкция послеледникового потепления на Южном Урале по измерениям температуры в скважинах // Геологический сборник. — № 1. Информационные материалы, ИГ УНЦ РАН, Уфа. — 2000. — С. 113–116.
- Демежко Д. Ю. Геотермический метод реконструкции палеоклимата (на примере Урала). — Екатеринбург: УрО РАН, 2001. — 144 с.
- Клименко В. В., Климанов В. А., Федоров М. В. История средней температуры северного полушария за последние 11 000 лет // Докл. АН СССР. — 1996. — Т. 348. — № 1. — С. 111–114.
- Пименов В. П., Попов Ю. А., Климанов В. А. Вертикальные вариации теплового потока и палеоклимат // Физика Земли. — 1996. — № 6. — С. 84–92.
- Попов Ю. А., Ромушкевич Р. А., Попов Е. Ю., Бахта К. Г. Геотермические характеристики разреза СГ — 4 // Результаты бурения и исследований Уральской сверхглубокой скважины (СГ — 4). Научное бурение в России: Сборник науч. тр. ФГУП НПП «Недра». Ярославль, 1999. — Вып. 5. — С. 77–88.
- Сальников В. Е. Геотермический режим Южного Урала. — М.: Наука, 1984. — 88 с.

Chekhonin E., Popov Y., Peshkov G., Spasennykh M., Popov E., Romushkevich R. On the importance of rock thermal conductivity and heat flow density in basin and petroleum system modelling. *Basin Res.* 2020. 32. P. 1261–1276. DOI: 10.1111/bre. 12427

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. (www.clim-past.net/237/1/2007/)

Demezhko D. Yu., Ryzkin 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. (www.climpast.net/3/559/2007).

Emmermann R., Lauterjung J. The German continental deep drilling program KTB: Overview and major results. *J. Geophys. Res.*, 1997. V. 102. P. 18179–18201. DOI: 10.1029/96JB03945

Jouzel J., Lorius C., Petit J. R. C. Genthon, N. I. Barkov, V. M. Kotlyakov, V. M. Petrov Vostok ice core: a continuous isotope temperature record over the last climatic cycle (160000 years) // *Nature.* 1987. 329 (6138). P. 403–408. https://doi.org/10.1038/329403a0

Kukkonen I. T., Golovanova I. V., Khachay Yu. V., Druzhinin V. S., Kosarev A. M., Schapov V. 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.

Majorowicz J., Wybraniec S. New terrestrial heat flow map of Europe after regional paleoclimatic correction application. *Int. J. Earth Sci. (Geol Rundsch).* 2010. DOI: 10.1007/S00531-010-0526-1

Mottaghy D., Schellschmidt R., Popov Y. A., Clauser C., Romushkevich R. A., Kukkonen I. T., Nover G., Milanovsky S. New heat flow data from the immediate vicinity of the Kola super-deep borehole: Vertical variation in heat flow confirmed and attributed to advection // *Tectonophysics.* 2005. V. 401. P. 119–142. DOI: 10.1016/j. tecto. 2005.03.005

Popov Y., Pevzner S., Pimenov V., Romushkevich R. New geothermal data from the Kola superdeep well SG-3 // *Tectonophysics.* 1999. V. 306. P. 343–366. DOI: 10.1016/S40–1951 (99) 00065–7

Popov Y., Spasennykh M., Shakirov A., Chekhonin E., Romushkevich R., Savelev E., Gabova A., Zagranovskaya D., Valiullin R., Yuarullin R., Golovanova I., Sal'manova R. Advanced Determination of Heat Flow Density on an Example of a West Russian Oil Field. // *Geosciences (Switzerland).* 2021. V. 11. N 8. P. 346. DOI: 10.3390/geosciences11080346

References

Velichko A. A. (1987). Структура термических изменений палеоклиматов мезокайнозой по материалам изучения Восточной Евropy [Structure of thermal changes in the Meso-Cenozoic paleoclimates based on materials from studies of Eastern Europe] // *Климат Земли в геологическом прошлом.* М.: Наука, 5–43. (In Russian).

Galushkin Yu. I. (2007). Modelirovanie osadochnykh basseinov i otsenka ikh neftegazonosnosti [Sedimentary basins modeling and assessment their oil-gas generation]. M.: Scientific World. 457 p. (In Russian).

Golovanova I. V. (2005). Teplovoe pole Yuzhnogo Urala [Thermal Field of the South Urals]. M.: Nauka. 189 p. (In Russian).

Golovanova I. V., Valieva R. Yu. (2006). Novye otsenki amplitudy vyurm-golotsenovogo potepeniya na Yuzhnom Urale po geotermicheskim dannym [New estimates of the magnitude of the Würm-Holocene warming in the Southern Urals from geothermal data] // *Geological Collection No. 5. Information Materials. DizainPoligrafServis, Ufa,* 201–203. (In Russian).

Golovanova I. V., Puchkov V. N., Sal'manova, R. Yu., Demezhko, D. Yu. (2008). Novyi variant karty teplovogo potoka Urala, postroyenniy s uchetom vliyaniya paleoklimata [A New Version of the Heat Flow Map of the Urals with Paleoclimatic corrections]. *Dokl. Earth Sci.*, 422 (7), 1153–1156. [In Russian]. DOI: 10.1134/S1028334X08070350

Golovanova I. V., Selezneva G. V., Smorodov E. A. (2000). Rekonstruktsiya poslednikovogo potepeniya na Yuzhnom Urale po izmereniyam temperatury v skvazhinakh [Reconstruction of postglacial warming in The Southern Urals using the temperature logging data]. *Geol. Sb.* (1), 113–116. (In Russian).

Demezhko D. Yu. (2001). Geotermicheskii metod rekonstruktsii paleoklimata (na primere Urala) [Geothermal method for paleoclimate reconstruction (examples from the Urals, Russia)]. Yekaterinburg: UB RAS, 144 p. (In Russian).

Klimenko V. V., Klimanov V. A., Fedorov M. V. (1996). Istoriya srednei temperatury severnogo polushariya za poslednie 11 000 let [History of average temperature in the northern hemisphere for the last 11000 years]. *Dokl. of the Academy of Sciences of the USSR*, 348 (1), 111–114. (In Russian).

Pimenov V. P., Popov Yu. A., Klimanov V. A. (1996). Vertikal'nye variatsii teplovogo potoka i paleoklimat [Vertical variations of heat flow and paleoclimate]. *Izv., Phys. Solid Earth*, 32 (6), 547–554. (In Russian).

Popov Y. A., Romushkevich R. A., Popov E. Y., Bashta K. G. (1999). Results of Drilling and Investigating Super-Deep Ural Well; Nedra Publ.: Yaroslavl, Russia, 77–88. (In Russian).

Sal'nikov V. E. (1984). Geotermicheskii rezhim Yuzhnogo Urala [Geothermal Regime of the South Urals]. M.: Nauka. 88 p. (In Russian).

Chekhonin E., Popov Y., Peshkov G., Spasennykh M., Popov E., Romushkevich R. (2020). On the importance of rock thermal conductivity and heat flow density in basin and petroleum system modelling. *Basin Res.* 32, 1261–1276. DOI: 10.1111/bre. 12427

Demezhko D. Yu., Golovanova I. V. (2007). Climatic changes in the Urals over the past millennium — an analysis of geothermal and meteorological data // *Climate of the Past.* 3, 237–242, (www.clim-past.net/237/1/2007/).

Demezhko D. Yu., Ryzkin D. G., Outkin V. I., Duchkov A. D., Balobaev V. T. (2007). Spatial distribution of Pleistocene/Holocene warming amplitudes in Northern

Eurasia inferred from geothermal data // *Climate of the Past*. 3, 559–568. (www.climpast.net/3/559/2007).

Emmermann R., Lauterjung J. (1997). The German continental deep drilling program KTB: Overview and major results. *J. Geophys. Res.* 102, 18179–18201. DOI: 10.1029/96JB03945

Jouzel J., Lorius C., Petit J. R., Genthon C., Barkov N. I., Kotlyakov V. M., Petrov V. M. (1987). Vostok ice core: a continuous isotope temperature record over the last climatic cycle (160000 years) // *Nature*. (329), 403–408. <https://doi.org/10.1038/329403a0>

Kukkonen I. T., Golovanova I. V., Khachay Yu. V., Druzhinin V. S., Kosarev A. M., Schapov V. A. (1997). Low Geothermal heat flow of the Urals fold belt — implication of low heat production, fluid circulation or palaeoclimate? // *Tectonophysics*. 276, 63–85.

Majorowicz J., Wybraniec S. (2010). New terrestrial heat flow map of Europe after regional paleoclimatic cor-

rection application. *Int. J. Earth Sci. (Geol Rundsch)*. DOI: 10.1007/S00531-010-0526-1

Mottaghy D., Schellschmidt R., Popov Y. A., Clauser C., Romushkevich R. A., Kukkonen I. T., Nover G., Milanovsky S. (2005). New heat flow data from the immediate vicinity of the Kola super-deep borehole: Vertical variation in heat flow confirmed and attributed to advection // *Tectonophysics*. 401, 119–142. DOI: 10.1016/j.tecto.2005.03.005

Popov Y., Pevzner S., Pimenov V., Romushkevich R. (1999). New geothermal data from the Kola superdeep well SG-3 // *Tectonophysics*. 306, 343–366. DOI: 10.1016/S40–1951(99)00065–7

Popov Y., Spasennykh M., Shakirov A., Chekhonin E., Romushkevich R., Savelev E., Gabova A., Zagranovskaya D., Valiullin R., Yuarullin R., Golovanova I., Sal'manova R. (2021). Advanced Determination of Heat Flow Density on an Example of a West Russian Oil Field. / *Geosciences (Switzerland)*. 11 (8), 346. DOI: 10.3390/geosciences11080346

Сведения об авторах:

Голованова Инесса Владимировна, доктор физ.-мат. наук. Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), г. Уфа. golovanova@ufaras.ru

Сальманова Раушания Юрисовна, кандидат физ.-мат. наук. Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), г. Уфа. vrushana@mail.ru

About the authors:

Golovanova Inessa Vladimirovna, doctor of physical and mathematical sciences, Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa. golovanova@ufaras.ru

Sal'manova Raushaniya Yurisoovna, candidate of physical and mathematical sciences, Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa. vrushana@mail.ru

Статья поступила в редакцию 10.02.2023; одобрена после рецензирования 10.02.2023; принята к публикации 13.04.2023

The article was submitted 10.02.2023; approved after reviewing 10.02.2023; accepted for publication 13.04.2023