

*И.В. Голованова, Р.Ю. Сальманова*

## АНАЛИЗ ДАННЫХ ПО ТЕПЛОВОМУ ПОТОКУ УРАЛА

Изучение распределения плотности теплового потока с целью оценки энергетического состояния недр на Южном Урале начало проводиться Институтом геологии Башкирского филиала АН СССР в 1969 г. Уже на первом этапе исследований была получена геотермическая характеристика основных структурно-тектонических зон Южного Урала, причем наиболее детально для складчатой области [Сальников, 1984 и др.], и выявлена Южно-Уральская региональная аномалия теплового потока, прослеженная позднее в Мугоджарах [Сальников, 1982] и на Среднем и Северном Урале [Сальников и др., 1983; Булашевич, Шапов, 1978, 1983, 1986]. В последующие годы сведения об основных чертах геотермического режима всех структурно-тектонических зон Южного Урала и прилегающей части Восточно-Европейской платформы существенно пополнены [Хуторской, 1982; Голованова, 2005 и др.]. Уточнены границы южной части Уральской зоны аномально низких тепловых потоков, выявлен ряд локальных аномалий и охарактеризованы неизученные ранее районы. Составлены новый вариант карты теплового потока Урала и каталог данных по тепловому потоку Урала.

Установлено, что Уральская зона аномально низких (менее  $30 \text{ мВт/м}^2$ ) тепловых потоков, прослеживаемая с небольшими перерывами от Южной оконечности Мугоджар до  $61^\circ \text{ с. ш.}$ , локализована в западной части Тагило-Магнитогорской зоны и не захватывает, как это считалось ранее, прилегающие части Урала и Предуральского прогиба. Уральская область пониженных тепловых потоков образует обширную зону северо-западного простирания, в которую входит часть Волго-Уральской антеклизы, Уральская складчатая область, юг Западно-Сибирской плиты. Выявлены участки резкой дифференциации теплового потока (от  $23$  до  $58 \text{ мВт/м}^2$ ), приуроченные к зоне сочленения Восточно-Европейской платформы и Уральской складчатой системы.

В настоящее время существует несколько возможных объяснений возникновения зоны аномально низких тепловых потоков на Урале. Наиболее вероятным представляется вывод о том, что основной причиной ее возникновения является низкая теплогенерация в Тагило-Магнитогорской зоне. Наблюдаемый минимум теплового потока в какой-то мере усилен искажающим влиянием палеоклимата, сильнее выраженным в неглубоких скважинах, по измерениям в которых установлено существование зоны аномально низких тепловых потоков.

Таким образом, один из существенных источников искажения естественного теплового поля Земли — изменения температуры поверхности Земли в прошлом. Искажения, вызванные влиянием палеоклимата, играют определенную роль в формировании Уральской зоны аномально низких тепловых потоков, выделяющейся на карте, построенной по измеренным значениям теплового потока.

Климатически обусловленные колебания температуры поверхности Земли распространяются на глубину с затуханием амплитуды и запаздыванием во времени и вызывают возмущение стационарного температурного поля, формируемого глубинным тепловым потоком и тепловыми свойствами пород. Оценка плотности теплового потока осуществляется по данным измерений температуры горных пород в выстоявшихся скважинах на глубинах от нескольких сотен метров до нескольких километров. Температурный профиль на этих глубинах искажен влиянием климатических изменений прошлого. Таким образом, прошлые изменения климата (температуры поверхности Земли) являются одним из возможных факторов, искажающих наблюдаемое распределение теплового потока, и корректная оценка плотности теплового потока требует учета влияния палеоклимата.

На Урале при определении теплового потока поправки на климат прошлых эпох не вводились из-за отсутствия точных данных о длительности климатических эпох и амплитуде изменения температур за это время [Сальников, 1984; и др.]. Первая попытка внести поправки на влияние палеоклимата в измеренный тепловой поток на Урале была сделана И. Кукконеном в работе [Kukkonen et al., 1997]. При этом подход был упрощенный, во внимание принималась только максимальная глубина определения теплового потока, в то время как искажения, вызванные влиянием палеоклимата, распределены по глубине неравномерно [Пименов и др., 1996]. До сих пор не существует единой методики учета этих искажений. Часть исследователей либо отрицает существенное влияние палеоклимата на измеренный тепловой поток, либо, наоборот, преувеличивает, полностью объясняя таким образом возникновение аномалии.

В последнее время сведения об изменении температуры поверхности Земли в изучаемом регионе существенно пополнились [Демежко, 2001; Голованова, 2005; Голованова, Валиева, 2006; и др.], что позволяет более обоснованно учесть влияние палеоклимата на измеряемый тепловой поток.

По геотермическим данным получены многочисленные оценки изменений палеоклимата за последнее тысячелетие. Результаты геотермических реконструкций проанализированы совместно с метеоданными и немногочисленными другими имеющимися сведениями о прошлых изменениях климата. Более отдаленные климатические события, включая вюрм-голоценовое потепление, оценены по данным из трех глубоких скважин: Ильменской-1, Уральской сверхглубокой СГ-4 и Леузинской-1, расположенной в башкирской части Предуральяского прогиба. Анализ геотермических данных по уральским скважинам позволил выявить широтную зависимость климатического сигнала. Анализ геотермических данных по более обширной территории, выполненный Д.Ю. Демежко с соавторами, позволил обнаружить закономерности пространственного распределения амплитуды плейстоцен-голоценового потепления в северной Евразии [Демежко и др., 2006; Demezhko et al., 2007]. Таким образом, при введении палеоклиматической поправки в измеренный тепловой поток на Урале появилась возможность учесть зависимость палеоклиматического сигнала от широты и долготы местности. Полученные результаты использованы для более обоснованной оценки прошлых изменений климата на Урале и для математического моделирования вызванных ими искажений теплового потока и геотермического градиента.

Известно, 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]. Поэтому считается, что без значимой погрешности для решения задачи возможно использование упрощенной климатической модели, включающей лишь

эти два палеоклиматических эпизода. Однако в самой верхней части разреза, на глубинах до 200 м, аномальные градиенты, рассчитанные по упрощенной и более детальной палеоклиматическим моделям существенно различаются. В то же время, среди опубликованных данных по тепловому потоку Урала довольно много таких скважин, в которых при определении теплового потока включен самый верхний интервал. Поэтому в данной работе мы не используем упрощенную модель палеоклимата. Мы опираемся на сведения об изменении средней глобальной температуры воздуха в северном полушарии в отклонениях от современной температуры, приведенные в монографии Д.Ю. Демежко [2001] как компиляция литературных данных, с учетом регионального коэффициента.

В первом приближении для получения региональной палеотемпературы можно умножить среднеглобальное отклонение температуры от современной на коэффициент  $K$ , зависящий от широты местности  $\varphi$ . Мы использовали зависимость, рекомендованную в работе В.П. Пименова с соавторами [1996]:

$$K(\varphi) = 1,5 + (\varphi - 40) / 30.$$

Зависимость от долготы связана с осеасимметричным характером вюрм-голоценового потепления. Согласно палинологическим оценкам, подтверждаемым и данными геотермии [Демежко и др., 2006; Demezhko et al., 2007], центр потепления находился в Северной Атлантике (рис. 1). Новые результаты реконструкции палеоклимата по данным из скважины Леузинская-1 [Голованова, Валиева, 2006] хорошо согласуются с этой моделью, подтверждая тем самым ее справедливость. Изолинии потепления снижаются примерно на  $5^\circ$  широты при удалении на  $20^\circ$  долготы на запад от уральского меридиана. Результаты реконструкции палеоклимата по данным из глубоких уральских скважин хорошо согласуются с этой моделью, подтверждая тем самым ее справедливость. Влияние долготы учитывается введением так называемой эквивалентной широты, которая учитывает влияние одновременно и широты, и долготы местности:

$$\varphi_{\text{экв}} = \varphi - (\lambda - 60) \times 0,25,$$

где  $\varphi$  — широта,  $\lambda$  — долгота.

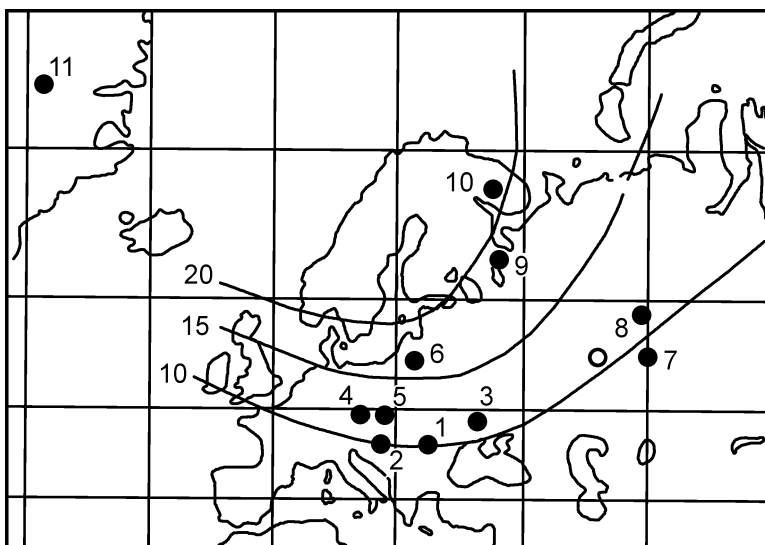


Рис. 1. Изоаномалы (в  $^\circ\text{C}$ ) геотермических оценок амплитуды голоценового потепления в Европе по Д.Ю. Демежко и др. [2006]

Точки — расположение исследованных скважин. Дополнительно, незалитым кружочком показано расположение скважины Леузинская-1

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.

С учетом эквивалентной широты и зависимостей, предложенных в работе В.П. Пименова и др. [1996], рассчитаны значения регионального коэффициента и начальной температуры поверхности Земли для различных зон изучаемого региона. Полученные при таком подходе амплитуды вюрм-голоценового потепления хорошо согласуются с данными об их широтном изменении вдоль уральского меридиана  $60^\circ$  в. д. Амплитуды похолодания и потепления малого ледникового периода также хорошо согласуются с оценками, выполненными по геотермическим данным [Демежко, 2001; и др.].

С учетом полученных значений регионального коэффициента и начальной температуры поверхности Земли выполнено моделирование искажений теплового потока и геотермического градиента для различных зон изучаемого региона. Искажения геотермического градиента и теплового потока под влиянием палеоклимата распределены неравномерно по глубине (рис. 2). Наиболее значительные отклонения вызваны вюрм-голоценовым потеплением, его влияние распространяется до первых километров. Малый ледниковый период (150–600 лет назад) оказывает влияние на распределение градиента в верхних 400–500 м. В целом, наиболее значительные искажения наблюдаются на глубинах до 1–1,5 км. В результате геотермический градиент, а следовательно и тепловой поток в этом интервале оказываются пониженными.

Определение теплового потока на изучаемой территории проводилось классическим раздельным способом. При этом средневзвешенная величина теплового потока по скважине определялась по его поинтервальным значениям. Поэтому мы предлагаем рассчитывать средневзвешенную поправку на влияние палеоклимата во всем интервале определения теплового потока, исходя из результатов моделирования.

Таким образом, полученная зависимость искажений градиента температуры от глубины используется для определения средневзвешенного искажения теплового потока в интервале его определения. Кроме того, результаты моделирования позволяют оценить искажения теплового потока на отдельных интервалах глубин.

Введены поправки на влияние палеоклимата в измеренный тепловой поток по всем скважинам в изучаемом регионе, в которых выполнены его измерения. При этом за основу принят Каталог данных по тепловому потоку Урала, приведенный

в монографии [Голованова, 2005]. Составлен новый вариант карты теплового потока Урала, исправленного на влияние палеоклимата (рис. 3). Результаты свидетельствуют о том, что искажающее влияние палеоклимата сильнее выражено в неглубоких скважинах, расположенных преимущественно в Тагило-Магнитогорской зоне, пространственно совпадающей с зоной аномально низких тепловых потоков. Однако зона аномально низких тепловых потоков в Магнитогорской зоне четко выявляется и при внесении поправок, то есть возникновение этой аномалии невозможно объяснить только влиянием палеоклимата.

Проанализированы исправленные значения теплового потока по отдельным интервалам глубин. Существующие на сегодняшний день данные позволяют выполнить сопоставление поинтервальных значений теплового потока для разных зон только для южной части территории и только для глубин до 1000 м. Сопоставление измеренных и исправленных на влияние палеоклимата значений теплового потока на глубине до 1000 м по скважинам, расположенным в поперечном сечении Южного Урала вдоль профиля УРСЕЙС-95 в полосе шириной 200 км, также свидетельствует о том, что зона аномально низких тепловых потоков в западной части Магнитогорской зоны выделяется и при внесении палеоклиматических поправок (рис. 4).

Для проверки объективности существования аномальной зоны выполнен статистический

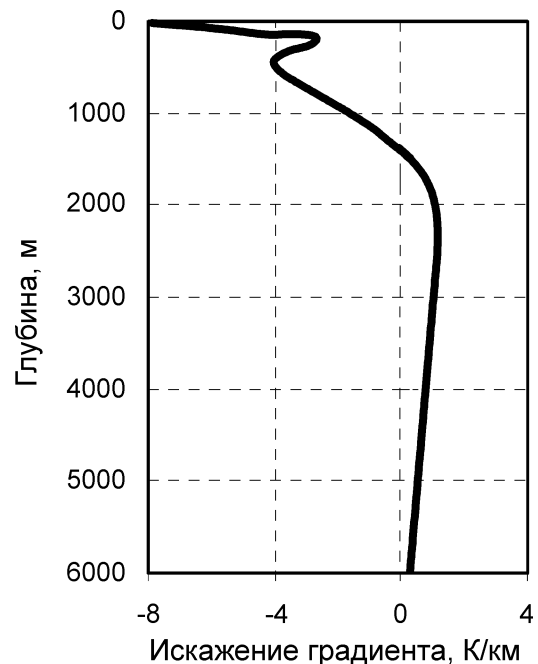


Рис. 2. Расчетная зависимость искажений градиента температуры от глубины

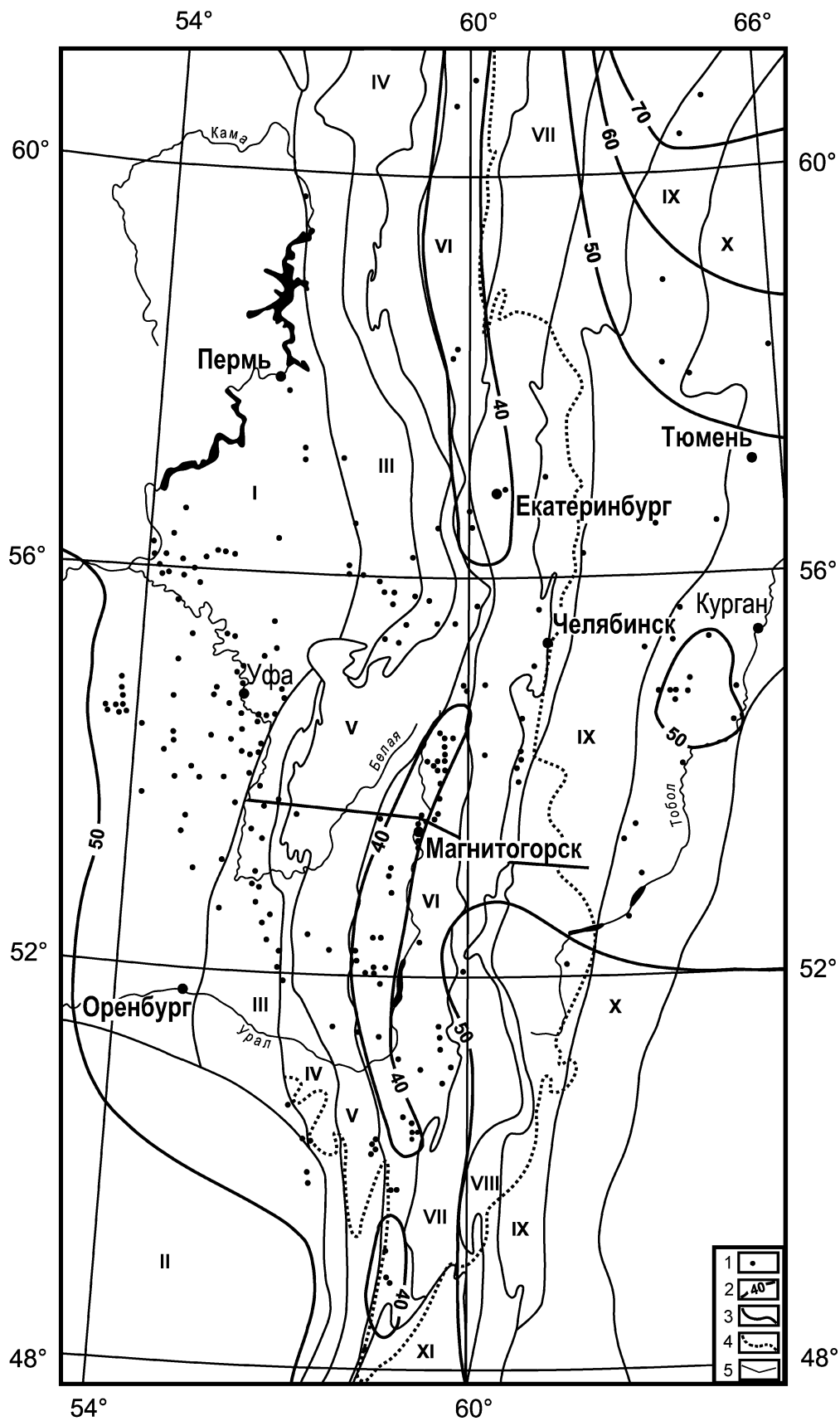
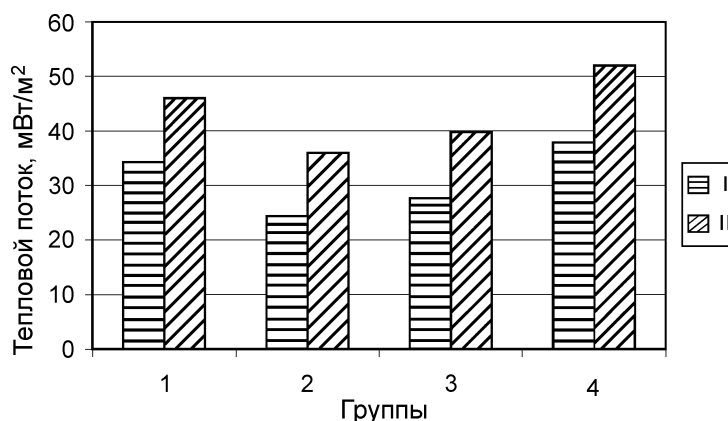


Рис. 3. Карта теплового потока Урала, исправленного на влияние палеоклимата

**Рис. 4. Распределение теплового потока по отдельным зонам вдоль профиля УРСЕЙС-95**

I — измеренные, II — исправленные значения теплового потока. Группы включают: 1 — восточную окраину Восточно-Европейской платформы, Предуральский прогиб, Западно-Уральскую внешнюю зону складчатости, Центрально-Уральское поднятие; 2 — западную часть Тагило-Магнитогорской зоны; 3 — центральную и восточную части Тагило-Магнитогорской зоны; 4 — Восточно-Уральское поднятие, Восточно-Уральский прогиб



анализ данных по тепловому потоку Урала, измеренных и исправленных на влияние палеоклимата.

При вероятностно-статистическом анализе фактических данных необходимо выполнение ряда требований: однородность анализируемых данных, независимость и равномерность. Требование однородности ряда можно считать выполненным, если рассматриваются однотипные геолого-тектонические области [Смирнов, 1970]. Требование независимости (т. е. отсутствие влияния предыдущих экспериментов на последующие) всегда выполняется для фактических измерений теплового потока. А требование равномерности расположения данных в однородных выборках имеет подчиненный характер.

Мы будем проводить статистическую проверку соответствия эмпирического ряда стандартным функциям распределения и сравнение выборок по дисперсиям и средним значениям при совпадении законов распределения [Теория ..., 2006; и др.].

Главным этапом анализа является статистическая проверка гипотез соответствия эмпирического ряда стандартным функциям распределения. Проверяемая гипотеза называется обычно нулевой, а противоположная — альтернативной. Для проверки необходимо предположить, что эмпирический ряд может быть описан одной из известных функций распределения. Оценку соответствия эмпирического ряда теоретическому распределению будем проводить по критериям Пирсона ( $\chi^2$ ), Романовского и Колмогорова. Сравнение двух выборок — по критерию Стьюдента ( $t$ ) и по критерию Фишера ( $F$ ) при соответствующем числе степеней свободы.

Все известные данные по тепловому потоку объединены в три группы с учетом геолого-тектонического строения региона. В первую группу вошли данные по восточной окраине Восточно-

Европейской платформы, Предуральскому краевому прогибу, Западно-Уральской внешней зоне складчатости и Центрально-Уральскому поднятию. Во вторую — по западной части Тагило-Магнитогорской зоны. В третью группу включены данные по центральной и восточной частям Тагило-Магнитогорской зоны, Восточно-Уральскому поднятию, Восточно-Уральскому прогибу и Зауральскому поднятию. В табл. 1 приведены обобщенные данные по тепловому потоку, измеренному и исправленному на влияние палеоклимата, по отдельным выделенным зонам. Среднее значение отражает отток тепла из недр, дисперсия — «случайные» факторы.

Здесь еще раз отметим следующее. Искажения градиента температуры, а следовательно и теплового потока, вызванные прошлыми изменениями температуры поверхности Земли, распределены по глубине неравномерно. Влияние палеоклимата будет больше, если тепловой поток определялся в неглубокой скважине, или если интервал определения теплового потока включает верхнюю часть разреза скважины. Если тепловой поток определялся в глубоких скважинах, особенно, если учитывались данные только по нижней части разреза, то поправки могут быть незначительными. В западной части территории, в первой зоне, глубина скважин составляет 1300–3000 м, несколько скважин имеют глубину около 5000 м. Верхняя граница интервала определения теплового потока здесь находится на глубинах, превышающих, иногда значительно, 500 м. Поэтому поправки на влияние палеоклимата в этой зоне не очень велики и составляют в среднем 6,7 мВт/м<sup>2</sup>. Глубина скважин, по которым проводилось определение теплового потока

**Условные обозначения к рис. 3:** 1 — пункты определения теплового потока; 2 — изолинии теплового потока (мВт/м<sup>2</sup>); 3 — границы структур первого порядка; 4 — граница распространения сплошного мезо-кайнозойского покрова; 5 — линия профиля УРСЕЙС-95. Схема тектонического районирования, по [Тектоническая ..., 1968, 1983]: I — Волго-Уральская антеклиза; II — Прикаспийская синеклиза; III — Предуральский краевой прогиб; IV — Западно-Уральская внешняя зона складчатости; V — Центрально-Уральское поднятие; VI — Тагило-Магнитогорский прогиб; VII — Восточно-Уральское поднятие; VIII — Восточно-Уральский прогиб; IX — Зауральское поднятие; X — Тюменско-Кустанайский прогиб; XI — Берчогурско-Челкарский периклинальный прогиб

Тепловой поток в отдельных геолого-тектонических областях

Зоны	Тепловой поток	Число определений	Значение теплового потока, мВт/м <sup>2</sup>			
			min	Max	среднее	стандартное отклонение
I	Измеренный	141	26	45	36	4,4
	Исправленный	141	30	54	42	5,5
II	Измеренный	90	18	32	24	3,3
	Исправленный	90	30	44	36	3,5
III	Измеренный	63	20	52	34	7,2
	Исправленный	63	33	63	46	7,8

в Тагило-Магнитогорской зоне и в восточной части изучаемой территории, за редким исключением не превышает 1 км. На этих глубинах искажения, вызванные влиянием палеоклимата, наиболее значительны. Поправки на влияние палеоклимата во второй и третьей зонах составляют в среднем 12 мВт/м<sup>2</sup> при средних значения измеренного теплового потока 24 мВт/м<sup>2</sup> и 34 мВт/м<sup>2</sup> соответственно.

Среди данных, выбранных для статистического анализа, иногда присутствуют наблюдения, сильно отличающиеся от других значений. Если подозрительным является минимальный или максимальный по величине результат, то его называют резко выделяющимся наблюдением или грубой ошибкой. Такие наблюдения могут исказить статистические выводы. С использованием правила Томпсона [Мюллер и др., 1982] из всех выделенных групп были исключены резко выделяющиеся наблюдения.

Вероятностно-статистический анализ величин теплового потока на континентах, выполненный Б.Г. Поляком и Я.Б. Смирновым [1970], показал, что в однотипных геолого-тектонических областях распределение теплового потока обычно близко к нормальному. Для выделенных нами групп данных была проведена проверка гипотезы о соответствии распределения в каждой группе нормальному. Для исследования однородной выборки необходимо составить ряд эмпирических частот распределения, который связывает величину признака с частотой его повторения. Этот ряд распределения является исходным для вероятностно-статистического анализа, позволяющего по ограниченной выборке оценить распределение вероятности признака. Оценка обычно производится при помощи сравнения эмпирических рядов с теоретическими моделями с помощью критериев соответствия.

Статистический анализ как измеренных, так и исправленных значений плотности теплового потока в каждой группе, выполненный с использо-

ванием критериев соответствия Пирсона, Романовского и Колмогорова, показал, что распределение в каждой группе соответствует нормальному. Расхождение между эмпирическим и теоретическим распределением не существенно при уровнях значимости 0,05 и 0,01 и соответствующем числе степеней свободы в каждой группе.

Следующей задачей статистического анализа, решаемой после определения основных (выборочных) характеристик и анализа одной выборки, является совместный анализ нескольких выборок. Важнейшим вопросом, возникающим при анализе двух выборок, является вопрос о наличии различий между выборками. Обычно для этого проводят проверку статистических гипотез о принадлежности обеих выборок одной генеральной совокупности или о равенстве средних.

Тот факт, что распределение во всех группах данных имеет один и тот же характер, позволяет сравнивать выборки по отдельным группам между собой. Нами проверялась гипотеза о равенстве средних в двух выборках с помощью критерия Стьюдента (t-критерий). Для проверки гипотезы о равенстве дисперсий в двух выборках использовался критерий Фишера.

Сравнение выборок измеренных значений теплового потока по всем трем выделенным группам показало, что с вероятностью ошибки 0,05 можно утверждать, что западная часть Тагило-Магнитогорской зоны отличается от окружающих территорий по критерию Стьюдента. При этом первая и третья зона не отличаются друг от друга по средним значениям, несмотря на различия в геолого-тектоническом строении. После внесения поправок в измеренный тепловой поток все три зоны отличаются друг от друга по t-критерию. При сравнении дисперсий по критерию Фишера различия во всех случаях оказались статистически значимыми.

Таким образом, вероятностно-статистический анализ показал, что западная часть Тагило-Магнитогорской зоны выделяется по критериям Стью-

дента и Фишера при уровне значимости 0,05 как по измеренным, так и по исправленным на влияние палеоклимата значениям теплового потока.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что зона аномально низких тепловых потоков в Тагило-Магнитогорской зоне четко выявляется и при рассмотрении измеренных значений теплового потока, и при внесении поправок на влияние палеоклимата. Следовательно, возникновение этой аномалии невозможно объяснить только влиянием палеоклимата. Скорее всего, аномалия теплового потока связана с особенностями глубинного строения и геологического развития региона, и основной ее причиной является низкая теплогенерация в Тагило-Магнитогорской зоне.

### *Литература:*

- Булашевич Ю.П., Шапов В.А.** Геотермические особенности Уральской геосинклинали // Докл. АН СССР. 1978. Т. 243, № 3. С. 715–718.
- Булашевич Ю.П., Шапов В.А.** Геотермическая характеристика Урала // Применение геотермии в региональных и поисково-разведочных исследованиях. Свердловск, 1983. С. 3–17.
- Булашевич Ю.П., Шапов В.А.** Новые данные об аномально низком тепловом потоке Тагильского синклинория // Докл. АН СССР. 1986. Т. 290, № 1. С. 173–176.
- 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 / ИГ УНЦ РАН. Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2006. С. 201–203.
- Демежко Д.Ю.** Геотермический метод реконструкции палеоклимата (на примере Урала). Екатеринбург: УрО РАН, 2001. 144 с.
- Демежко Д.Ю., Уткин В.И., Дучков В.И., Рывкин Д.Г.** Геотермические оценки амплитуд голоценового потепления в Европе // Докл. РАН. 2006. Т. 406, № 5. С. 688–690.
- Мюллер П., Нойман П., Шторм Р.** Таблицы по математической статистике. М.: Финансы и статистика, 1982. 278 с.
- Пименов В.П., Попов Ю.А., Климанов В.А.** Вертикальные вариации теплового потока и палеоклимат // Физика Земли. 1996. № 6. С. 84–92.
- Поляк Б.Г., Смирнов Я.Б.** Связь теплового потока с геолого-тектоническим строением земной коры // Тепловой режим недр СССР. М.: Наука, 1970. С. 162–172.
- Сальников В.Е.** Новые данные о распределении теплового потока на Южном Урале // Докл. АН СССР. 1982. Т. 265, № 4. С. 944–947.
- Сальников В.Е.** Геотермический режим Южного Урала. М.: Наука, 1984. 88 с.
- Сальников В.Е., Сергиенко С.И., Смирнов Я.Б.** Методика и результаты определения теплового потока в зоне сочленения докембрийской Восточно-Европейской и палеозойской Западно-Сибирской платформ // Применение геотермии в региональных и поисково-разведочных исследованиях. Свердловск, 1983. С. 27–33.
- Смирнов Я.Б.** Методы интерпретации данных о тепловом потоке // Тепловой режим недр СССР. М.: Наука, 1970. С. 152–162.
- Тектоническая карта нефтегазоносных областей СССР, масштаб 1:2 500 000. М.: Изд-во Мин-ва геол. СССР, 1969.
- Тектоническая карта Урала, масштаб 1:1 000 000 / *Ред. И.Д. Соболев.* Свердловск, 1983.
- Теория статистики / *Под ред. проф. Г.Л. Громыко.* М.: Изд-во ИНФРА-М, 2006. 476 с.
- Хуторской М.Д.** Тепловой поток в областях структурно-геологических неоднородностей. М.: Наука, 1982. 77 с.
- Demezhko D.Y., Rvkin D.G., Outkin V.I. et al.** Spatial distribution of Pleistocene / Holocene warming amplitudes in Northern Eurasia inferred from geothermal data // *Climate of the Past.* 2007. 3. P. 559–568. (<http://www.clim-past.net/3/559/2007>).
- 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.