

ТЕМПЕРАТУРА И ТЕПЛОЙ ПОТОК В ГРАНИТО-ГНЕЙСОВОМ СЛОЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ

**(по результатам экспериментальных измерений в скважинах
Татарского свода)**

Основу статьи составляют геотермические исследования в архейском кристаллическом фундаменте Восточно-Европейской платформы, выполненные в 12 глубоких длительно простаивающих скважинах с установившимся температурным режимом. Экспериментальные измерения проводились с шагом 20 см-5 м до глубины 5812 м. Температура в изученной части фундамента варьирует от 33 до 129.9 °С. Обнаружен перепад в температурах порядка 10-15 °С на всех глубинах кристаллического фундамента. Каждая изотерма в изученной части гранито-гнейсового слоя варьирует по глубине более чем на 500 м. Градиент температуры в породах возрастом более 2.5 миллиарда лет почти не меняется с глубиной и составляет приблизительно 2 °С/100 м. Такая крупномасштабная однородность дополняется сильными вариациями мелкого масштаба: 0.7-4 °С/100 м. Тепловые потоки, определенные в глубинном фундаменте: 53-69 мВт/м² совпадают с потоками в нижних слоях осадочной толщи, но значительно отличаются от приповерхностных измерений на кристаллических массивах. В разрезе ряда скважин вскрыты низко- и высокоградиентные слои, которые рассматриваются как зоны конвективного теплопереноса. Итак, термограммы гранито-гнейсового слоя дают нам прямые доказательства **неоднородности теплового поля и динамики глубинной гетерогенной среды**, - факторов, безусловно связанных с тектоническими процессами региона.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение температур и тепловых потоков в кристаллическом фундаменте в основном проводится на щитах, где эти породы подходят близко к поверхности (Hurtig et al., 1991). Однако, измерения на больших глубинах позволяют предположить, что геотермические условия глубинного строения гранито-гнейсового слоя земной коры коренным образом отличаются от приповерхностных.

В Восточной Европе из известных скважин, где измерения температуры проводились на сравнительно большой глубине в достаточно мощной толще архейского фундамента, могут быть названы Кольская сверхглубокая (Козловский, 1984), Миннибаевская 20000 (Муслимов и др., 1980) и Ново-Елховская 20009 (Khristoforova et al., 1997, 1999).

Расшифровка глубинных термограмм фундамента дает ответ на ряд вопросов, принципиально важ-

ных для понимания теплового состояния Земли. Действительно ли тепловой поток из недр на архейских щитах имеет низкие значения, порядка 30-40 мВт/м²? Идентичны ли тепловые потоки, измеряемые на поверхности и глубинные, как вне, так и под осадочным чехлом? Изменяются ли с глубиной градиент температуры и тепловой поток в фундаменте? Новые измерения, возможно, позволят разгадать загадку так называемой «градиентной аномалии» Кольской сверхглубокой, где рост температуры в гранитно-метаморфическом слое оказался равным 1.8-2.0 вместо ожидаемых 1.0-1.2 °С/100 м (Моисеенко и Смыслов, 1986). При этом наибольший интерес представляют прикладные вопросы, - существуют ли разуплотненные зоны в кристалле и приуроченные к ним залежи полезных флюидов?

Геотермические замеры, обсуждаемые в данной статье, выполнены в десяти глубоких и в двух сверх-

глубоких скважинах, которые перешагнули рубеж 5 км. По возможности, измерения проводились многократно, иногда в течение нескольких лет. В какой-то степени они проливают свет на поставленные выше вопросы.

1. КРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ ФУНДАМЕНТ ТАТАРСКОГО СВОДА

Все изученные нами глубокие скважины, вскрывшие гранито-гнейсовый слой земной коры расположены в пределах Южного купола Татарского свода и его склонов в центрально-восточной части Русской (Восточно-Европейской) платформы, рис. 1.

Основные черты геологического строения фундамента Татарского свода приводятся здесь на основе публикаций (Муслимов, 1976; Муслимов и др., 1980; Пеньков И. Н., 1986; Муслимов и Лапинская, 1996). Кристаллическое основание Южного купола представляет собой огромный блок-выступ в Татарской системе сводовых поднятий. Оно состоит из ряда крупных блоков, отличающихся друг от друга как петрографическим составом, так и особенностями геофизических полей. Блоки сочленяются крупными разломами и сопутствующими им мобильными зонами древнего заложения, неоднократно проявлявшими тектоническую активность.

Характерной особенностью является расчлененность фундамента на ряды субмеридиональными прогибами. Фундамент не является монолитным, для него характерно наличие зон повышенной трещиноватости, количество которых возрастает вниз по разрезу. Внутренняя гетерогенная структура фундамента определилась из совокупности унаследованных и наложенных тектономагматических и метаморфических процессов нескольких стадий переработки земной коры (Муслимов, 1976).

В составе кристаллического фундамента востока Русской платформы под 1.5-2.2-километровым покровом фанерозоя выделяются два комплекса: архейский и протерозойский. В соответствии со стратиграфической схемой докембрия породы в изученных скважинах относятся к большечеремшанской толще архея (Муслимов и др., 1980).

Черемшанская толща, имеющая первично осадочный характер, и сложена интенсивно метаморфизованными гнейсами, гранито-гнейсами и кристаллическими сланцами. Судя по литологическому составу, толща возникла за счет существенно дифференцированной терригенно-глиноземистой исходной формации. Ее изначальная неоднородность отражается в перемежаемости первично осадочных,

преимущественно пелитовых пород (высокоглиноземистые кристаллосланцы и гнейсы) и пород первично магматических, вулканогенных (основные пироксен-плагиоклазовые кристаллосланцы и гнейсы) (Муслимов, 1976).

Архейские породы интенсивно насыщены разновозрастными и различными по составу ультраметаморфическими и магматогенными образованиями. Глубокие скважины вскрывают в фундаменте многочисленные зоны милонитизации и катаклаза, зеркала скольжения, дайки габбро-диабазов и т.п. При бурении сверхглубоких скважин во вскрытом разрезе архея обнаружены коллекторские толщи, битумо- и газопроявления, а также «проблематичные» образования, представляющие собой продукты перетиранья и раздавливания обычных метаморфических пород вдоль крупных тектонических нарушений (Муслимов, 1976; Муслимов и Лапинская, 1996).

2. ТЕХНИКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Температурные замеры выполнялись с помощью электронной дистанционной исследовательской станции ЭДИС-КТУ. Аппаратура сочетает высокие метрологические параметры - быстродействие, точность, чувствительность (0.05 °С) - с мобильностью, надежностью и минимальными эксплуатационными затратами (Непримеров и др., 1963; Христофорова и др., 1999). Она содержит скважинный прибор, включающий термомчувствительный элемент (микротерморезисторы конструкции Карманова) и измерительный преобразователь, канал связи и приемное регистрирующее устройство. Разрешающая способность прибора позволяет измерять температуру по стволу скважины с шагом 20 см.

Геотермические исследования проводились в длительно простаивающих скважинах с восстановившимся температурным режимом. Измерения велись при опускании прибора в невозмущенный столб жидкости с выдержкой в каждой точке, через 20 см - 5 м. Почти во всех скважинах проводились повторные замеры через год и более, в ряде скважин выполнены измерения в течение нескольких лет (скважины: 2880, 2092, 966, сверхглубокая 20009 и др.). Повторные исследования позволяют полностью исключить так называемый техногенный фактор, включающий приборные эффекты, погрешности измерения, наличие пробок в скважине и т.п.

Температурные замеры в скважине Ново-Елховская 20009 мб выполняли совместно с Альметьевским УГР (Управление геофизических работ). Замеры проводились по специально разработанной методике, которая позво-

ляла достичь высокой точности измерений и тем самым выделить мелкомасштабные температурные аномалии и точно очертить их границы. Так, замеры температуры всегда выполнялись при спуске, что исключало дополнительное перемешивание столба жидкости в скважине. Скорость опускания прибора была сделана минимально возможной - 200 м/час. Такая скорость обеспечивает точную регистрацию значений температу-

ры в каждой точке. Измерения при подъеме прибора, а также высокая скорость движения прибора и кабеля (1000 – 1200 м/час), обычно используемая в замерах геофизиков (стандартный термокаротаж), ведут к интенсивному перемешиванию скважинного раствора, что практически делает невозможным точное выделение аномальных зон, так как приводит к их «размазыванию» по глубине и амплитуде.

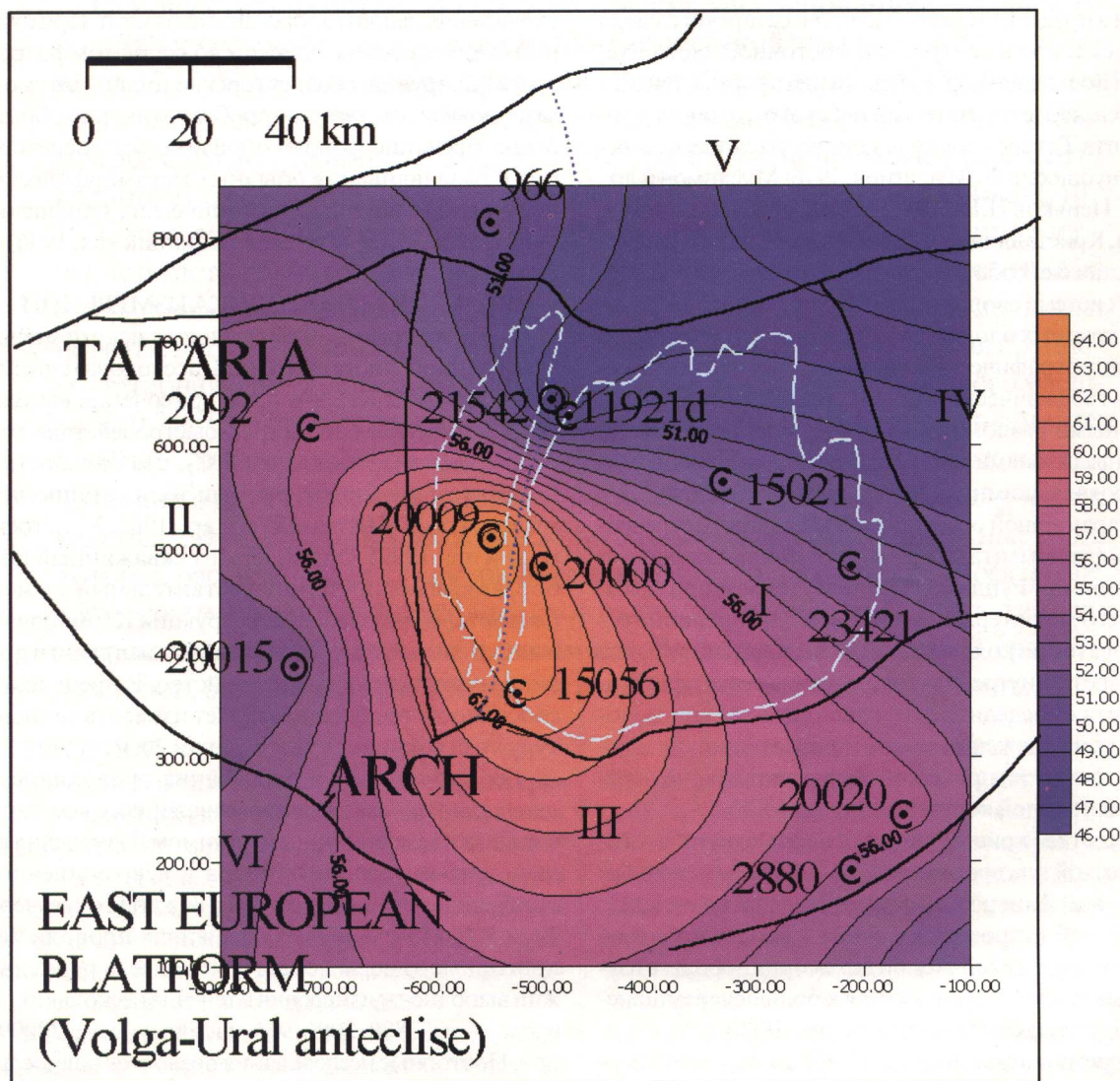


Рис. 1. Карта изолиний температуры в кристаллическом фундаменте на абсолютной отметке -2500 м. Тонкие линии – границы структурных элементов: I - Южный купол Татарского свода, II, III, IV, V - склоны Южного купола. Голубым пунктиром околорены Ромашкинское и Ново-Елховское месторождения нефти. Точками показан Алтунино-Шунакский прогиб.

3. ЗАКОНОМЕРНОСТИ В РАСПРЕДЕЛЕНИИ ГЕОТЕРМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

ТЕМПЕРАТУРА. На картах изолиний температуры в изученной части кристаллического фундамента (T_{ϕ}), рис. 1, выделяется крупная положительная аномалия в центральной и юго-западной частях Южного купола с максимальными значениями в районе Куак-Башской (скв. 15056) и Ново-Елховской (скв. 20009) площадей. Низкими значениями (T_{ϕ}) выделяются север и северо-восток территории.

В целом, изменение температур по кровле фундамента совпадает с распределением T в осадочной толще (Христофорова и Непримеров, 1985).

Неоднородность температурного поля в фундаменте, которая составляет 10-15 °С на срезах, сохраняется с глубиной. Каждая изотерма в изученной части гранито-гнейсового слоя варьирует по глубине более чем на 500 м, что хорошо видно при сравнении температурных кривых в сопоставимых интервалах глубин на геотермическом профиле, рис. 2. Дан-

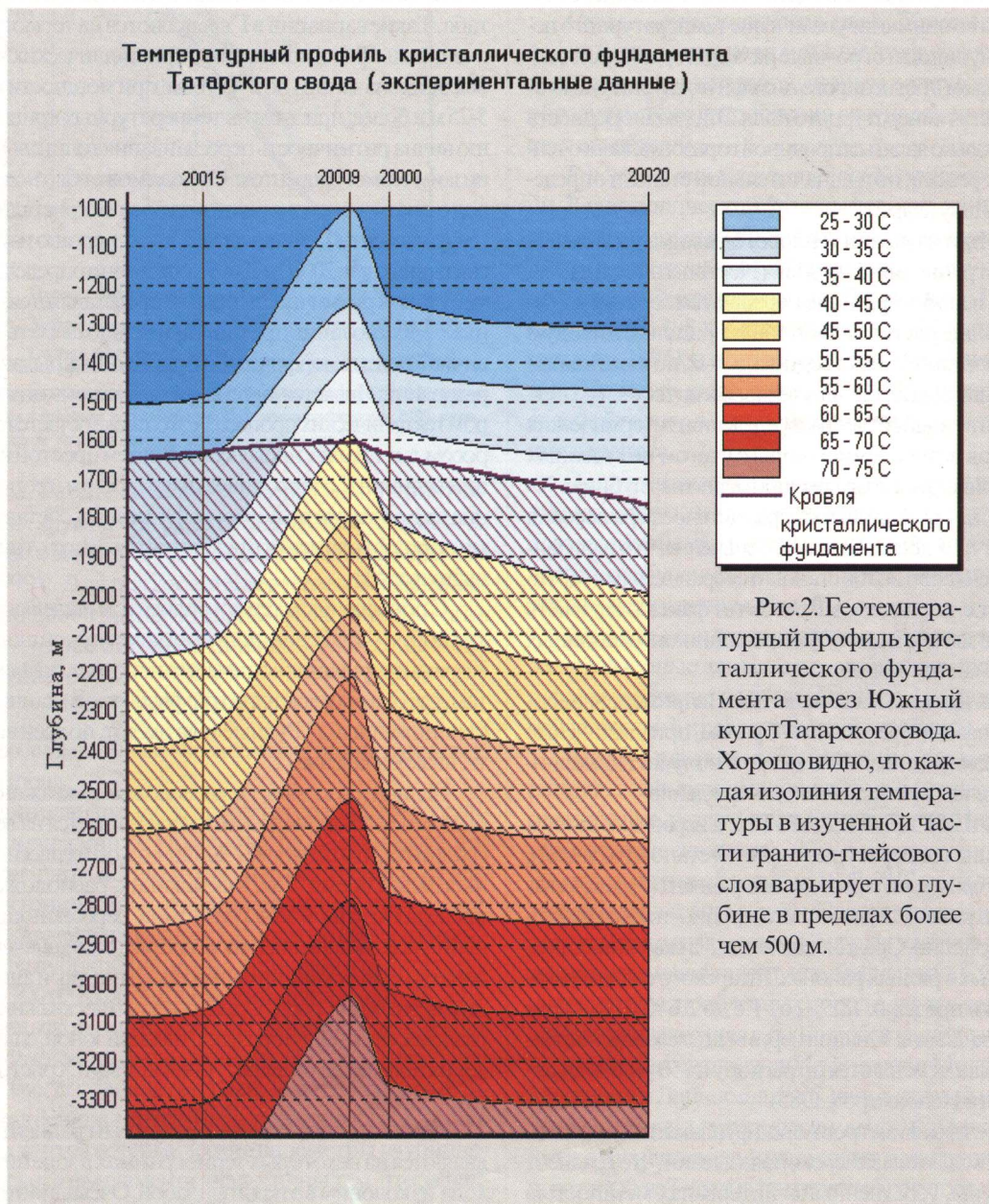


Рис.2. Геотемпературный профиль кристаллического фундамента через Южный купол Татарского свода. Хорошо видно, что каждая изолиния температуры в изученной части гранито-гнейсового слоя варьирует по глубине в пределах более чем 500 м.

ный температурный перепад обусловлен следующими факторами: структурным; переменным тепловым потоком из недр (см. ниже) и вариациями геотермических параметров в вышележащей осадочной толще, где основной эффект вносят инфильтрация холодных и восходящее движение теплых вод (Khrystoforova et al., 1996).

Обнаруженный перепад в температурах порядка 10-15 °С на всех глубинах в изученной части гранито-гнейсового слоя, каким бы небольшим он не был, задает постоянно действующий горизонтальный тепловой поток. Принимая во внимание увеличение температурного перепада с глубиной и огромные размеры гранитной толщи, мы можем прогнозировать сильную глубинную неоднородность температурного поля. Эта неоднородность может не только являться причиной горизонтального теплопереноса, но и в значительной степени определять тектонику недр.

Ранее, при изучении теплового режима различных районов страны, мы получили (Neprimerov et al., 1983, 1989), что в любом регионе перепад температур в осадочной толще растет с глубиной и пришли к выводу о существовании не только вертикальных, но и постоянно существующих латеральных тепловых потоков.

Элементарный расчет распределения геотермических параметров вглубь земной коры с учетом полученных данных приводит к тому, что примерно на глубинах 70-100 км, т.е. на границе литосфера - астеносфера перепад в температурах достигает такого значения, что горизонтальный тепловой поток становится сравнимым с вертикальным, т.е. порядка 60 мВт/м². Этот факт может иметь решающее значение для формирования конвекционных течений в мантии Земли.

Данная идея, высказанная Н.Н. Непримеровым более 20 лет назад (1983), таким образом, при увеличении глубины измерений до 5800 метров, получает дополнительное экспериментальное подтверждение.

ГРАДИЕНТ ТЕМПЕРАТУРЫ. С первого же взгляда на поведение температурной кривой становится ясно, что характеризуя геотермический градиент (G), мы должны рассматривать отдельно его крупно- и мелко масштабные вариации. Средние значения G в скважинах, расположенных в разных районах Татарского свода и укладываются в пределах 12.5%, от 1.6 до 2.6 °С/100м. При том, что градиенты T , например, в вышележащих карбонатных толщах меняются по региону на 50 - 100% (Христофорова и Непримеров, 1985).

Четыре тысячи метров пород фундамента, пройденных геотермическим замером, показывают, что градиент температуры, усредненный в интервалах мощностью более 200-300 м остается постоянным с глубиной, рис. 3.

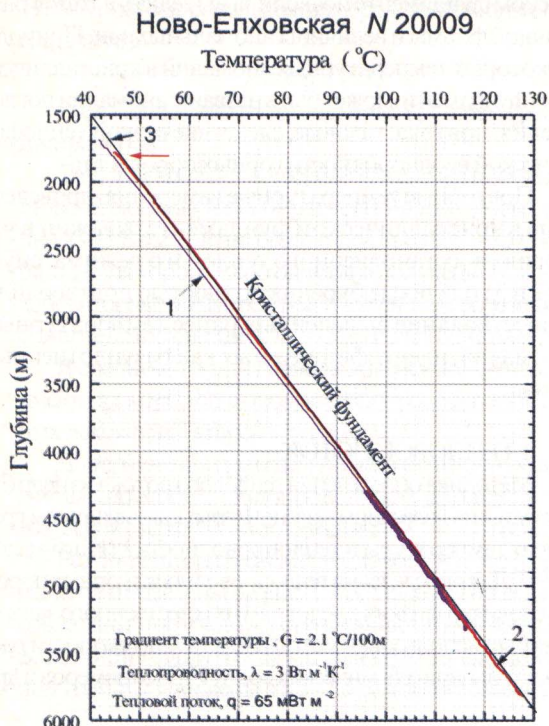
Это свидетельствует о том, что не наблюдается ожидаемого плавного увеличения теплопроводности горных пород, обусловленного увеличением их плотности. Аналогичное поведение параметров по разрезу наблюдается и для Кольской сверхглубокой скважины, где в исследованном интервале с увеличением глубины не происходит ни предполагаемого уменьшения градиента температуры, ни плавного возрастания скорости сейсмических волн (Резанов, 1981; Козловский, 1984).

Геотермические замеры, рассматриваемые в данной статье, фиксируют неоднородности более мелкого масштаба. Такие вариации в G выявляются на термограммах очень рельефно и достигают в кристаллических породах высоких значений - до 3 °С/100м, при мощности пластов 5-25 м и более; при этом на температурных кривых хорошо видна ритмичность переслаивания толщ с высоким и низким термоградиентом. Отсюда может быть сделан вывод о таком же неоднородном строении кристаллического фундамента. Однако даже в таких хорошо изученных скважинах, как 20000 и 20009 достоверно определить причину такой ритмичности пока не представляется возможным. Можно лишь предположительно связать ее с первичной дометаморфической природой вскрываемых образований. Является ли температурная кривая индикатором тектонических процессов, это также остается под вопросом, т.к. анализ, проведенный путем простой корреляции величин G с тектоническим разрезом и сопоставление их с разными по петрографическому составу пачками пород фундамента в целом показывают отрицательный результат.

Сповышенным термоградиентом выделяются дайки габбро - диабазов, достигающие по мощности 90м. Кора выветривания встречается не во всех скважинах, но там, где она выделяется по геофизическим данным, имеет пониженный G . Рудные тела имеют, по всей видимости, низкое значение G .

Наличие разломов, т.е. расположение скважины в приразломной зоне фундамента не сказывается на величине градиента, что позволяет заключить об их пассивности в настоящее время. Так, в скважинах, расположенных в пределах крупной зоны разломов, пересекающей Южный купол свода в широтном направлении, значения температур имеют как аномально высокие, так и аномально низкие значения, рис. 1. Однако, вскрытые скважиной зоны разлома, связанного с разуплотненной зоной, сильно влияет на поведение температурной кривой (Христофорова и др., 1999).

Резкие аномалии в температурах и градиентах T проявляются на некоторых термограммах в зоне ниже перехода из колонны в открытый забой. Очевидно эти аномалии имеют техногенную природу и не должны прини-



- 1 - измерения в условиях восстановленного режима температур, 1999, январь.
2 - измерения в условиях восстановленного режима температур, 1999, июль.
3 - прямая линия. Красная стрелка - кровля фундамента.

Рис. 3. Распределение температуры в кристаллическом фундаменте сверхглубокой скважины Ново-Елховская N 20009. Измерения выполнены в июле 1999 г. Для построения геотермы использовано около 20000 экспериментальных точек; можно видеть, что все они практически ложатся на одну прямую линию.

маться во внимание при анализе естественного невозмущенного поля.

Удивительным представляется совпадение градиентов T в скважинах, удаленных на тысячи километров друг от друга. Несмотря на существенные различия в тектоническом строении регионов, рост температуры в архейских толщах Татарского свода и Кольской сверхглубокой примерно одинаков и составляет $2 - 2.1 \text{ } ^\circ\text{C}/100\text{м}$. Кристаллический фундамент Фенно-Скандинавского щита выходит на поверхность Земли. Поэтому логично было ожидать, что глубинные значения G будут совпадать с теми, что измерены в фундаменте древних щитов близ поверхности. Однако оказалось, что геотермические параметры глубинного Кольского фундамента аналогичны тем, что зафиксированы под мощной 2000-метровой толщей осад-

ков. Высокий градиент T , порядка 2, имеют также изверженные породы Саатлинской скважины (Алиев и др., 1977).

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ АНОМАЛИИ В ГРАНИТО-ГНЕЙСОВОМ СЛОЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ. Аномалии геотермических параметров в кристаллическом фундаменте являются предметом особых исследований, которые подробно изучены и изложены нами в работах (Христофорова и др., 1997, 1999). В рамках данной статьи мы остановимся лишь на двух аспектах данной проблемы.

Первое, - гетерогенность среды. Кристаллический фундамент не является монолитом и содержит множество проницаемых зон, причем количество, разнообразие и степень дробления разуплотненных зон растут с глубиной.

Второе, - динамика глубинной гетерогенной среды. Кристаллический фундамент, или гранито-гнейсовый слой земной коры не только не является монолитом в определенных интервалах глубин (это показано и в ранних исследованиях (Муслимов, 1976; Муслимов и др., 1980; Козловский, 1984; Муслимов и Лапинская, 1996), и подтверждается нашими измерениями (Христофорова и др., 1997, 1999)), но представляет собой толщу, в которой постоянно происходят явления переноса.

Одна из температурных аномалий, приведенная в данной статье, наглядно демонстрирует, что в разуплотненной зоне, вскрытой скважиной, простоявшей 3 года после бурения, “живые” процессы конвективного теплопереноса, рис. 4.

Аномально высокие градиенты температуры, также характерные для конвективного движения, фиксируются в течение нескольких лет в фундаменте другой длительно простаивающей скважины, рис. 5.

В целом, в фундаменте существует множество температурных аномалий различной формы и величины и, соответственно, различного происхождения. Например, на термограмме скважины 20009 в кристаллическом фундаменте в интервале глубин 1807-5812 м мы выявили 56 температурных аномалий и 42 зоны, где градиент температуры резко изменяется. Большая часть из них свидетельствует о наличии разуплотненных зон. Существование сильно раздробленных пород в фундаменте и повышенная концентрация газов в пробах на данных глубинах подтверждают этот вывод (Искандеров и Муслимов, 1992; Муслимов и Лапинская, 1996; промышленный материал).

Как правило, на термограммах фундамента фиксируются: а) мощные толщи однородного распределения температуры, где T -аномалии редки и б) участки, где количество температурных аномалий резко возрастает. Соответ-

ственно, можно говорить и о таком же распределении разуплотненных зон.

В верхней части фундамента аномалии редки. Как правило, здесь встречаются единичные аномалии на фоне плавного изменения температуры. Таким образом, верхняя часть фундамента является по своим свойствам близкой к монолитному кристаллу и могут быть названа истинно кристаллической зоной.

Выявлены как отдельные Т, Г-аномалии, так и зоны скопления аномалий, приуроченные обычно к большим глубинам. Количество, амплитуда и разнообразие аномалий растут с глубиной. На больших глубинах выделяются не просто зоны «пласты», а зоны «толщи», в которых аномалии концентрируются. Отсюда мы делаем вывод о существовании не просто разуплотненных слоев, а разуплотненных толщ в кристаллическом фундаменте. В изученной до глубины 5800 м скважине 20009, в принципе, вся нижняя зона кристаллического фундамента, начиная с глубины примерно 4300 м, может быть названа аномальной.

Проведенная классификация всех температурно-градиентных аномалий, обнаруженных в кристалли-

ческом фундаменте позволила выделить 9 типов различной формы и величины аномальных зон. Природа некоторых температурных аномалий в кристаллическом фундаменте может быть названа: аномалии поглощения, притока, газовые, следствие резкой теплофизической неоднородности горных пород и т.п.

Повторные температурные измерения, проведенные в кристаллическом фундаменте скважин в условиях восстановленного теплового режима, спустя 2 и 3 года после бурения полностью подтвердили существование выделенных ранее температурных аномалий, идентифицируемых как разуплотненные зоны.

4. ТЕПЛОВОЙ ПОТОК

Методика определения теплового потока из недр базируется на известном законе Фурье, связывающем градиент температуры и теплопроводность λ (Hurtig et al., 1991). Для определения теплопроводности горных пород в условиях, близких к условиям их естественного залегания был использован метод расчета λ по скорости распространения сейсмических волн (V) (Непримеров и др.,

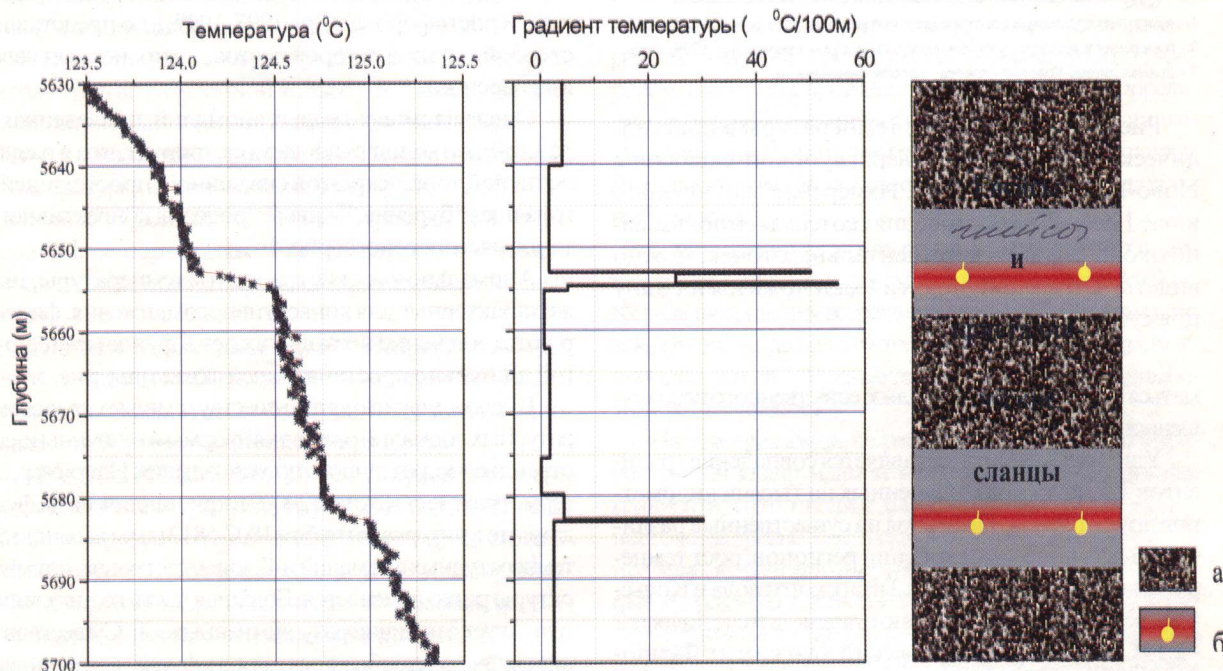


Рис. 4. Температурные аномалии 3-го типа; измерения в условиях восстановленного режима (1999, июль) в сверхглубокой скважине Ново-Елховская N 20009. Аномалии такой формы соответствуют крупной разуплотненной зоне (а) и характерны для газовых залежей. Бурение в скважине выявило сильно раздробленные породы и каверны в данном интервале глубин, а также повышенные газопоказания (Муслимов и Лапинская, 1996; промысловые данные). Измерения температуры во времени свидетельствуют о наличии постоянной вертикальной миграции газа (б) с больших глубин.

1983; Христофорова и Непримеров, 1985; Khristoforova et al., 1996):

$$\lambda = c \rho \tau V^2 / 3$$

где c - теплоемкость; ρ - плотность; τ - время релаксации фононов.

Так, для кристаллического фундамента скважины Ново-Елховская №20009 расчет по формуле дает значение $\lambda = 3$ Вт/м К в интервале глубин 1805 – 5805 м. Наблюдается хорошее соответствие полученных данных с лабораторными измерениями на керновых образцах гнейсов архейской системы: $\lambda_{cp} = 3.25$ Вт/м К (Липаев, 1993).

В среднем, толщи гнейсов архейского фундамента имеют примерно одинаковую теплопроводность в изученных скважинах Татарского свода.

Для сравнения приведем также рассчитанную аналогичным способом теплопроводность архейских пород Кольской сверхглубокой скважины: $\lambda_{cp} = 3.12$ Вт/м К.

Результаты определения теплового потока (q) в фундаменте приведены на рис. 1. Их значения практически совпадают с потоками, рассчитанными в нижних слоях осадочной толщи (тогда как для верхних слоев осадочной толщи q занижены в 1.5-2.5 раза и составляют 30-40

мВт м⁻²). Наблюдаются определенные закономерности в пространственном распределении глубинного теплового потока - его повышенные значения в полосе, захватывающей центр и запад территории и протягивающейся далеко на юг, и пониженные на севере и северо-востоке региона. Связи теплового потока со структурно-тектонической схемой, т.е. с расположением скважины на куполе или в депрессии не выявлено. Причиной же наблюдаемых пространственных вариаций теплового потока являются, как было показано в работах (Непримеров et al., 1989; Khristoforova et al., 1996), глубинные геодинамические процессы.

Расчет теплового потока по вышеприведенной формуле дает следующие значения для Кольской сверхглубокой - в протерозое: $q = 36$ мВт м⁻² (150-1000м), 52 (1000-6842) и в архее: $q = 51$ (6842-7000); 61 (7000-8460) и 76 (8460 – 10000), где значения Γ и V взяты из работ (Резанов, 1981; Козловский, 1984). Как видно из приведенных данных, глубинный тепловой режим (теплопроводность архейского комплекса, градиент температуры, тепловой поток) для кристаллических пород Татарского свода и Балтийского щита очень схож, если судить по этим немно-

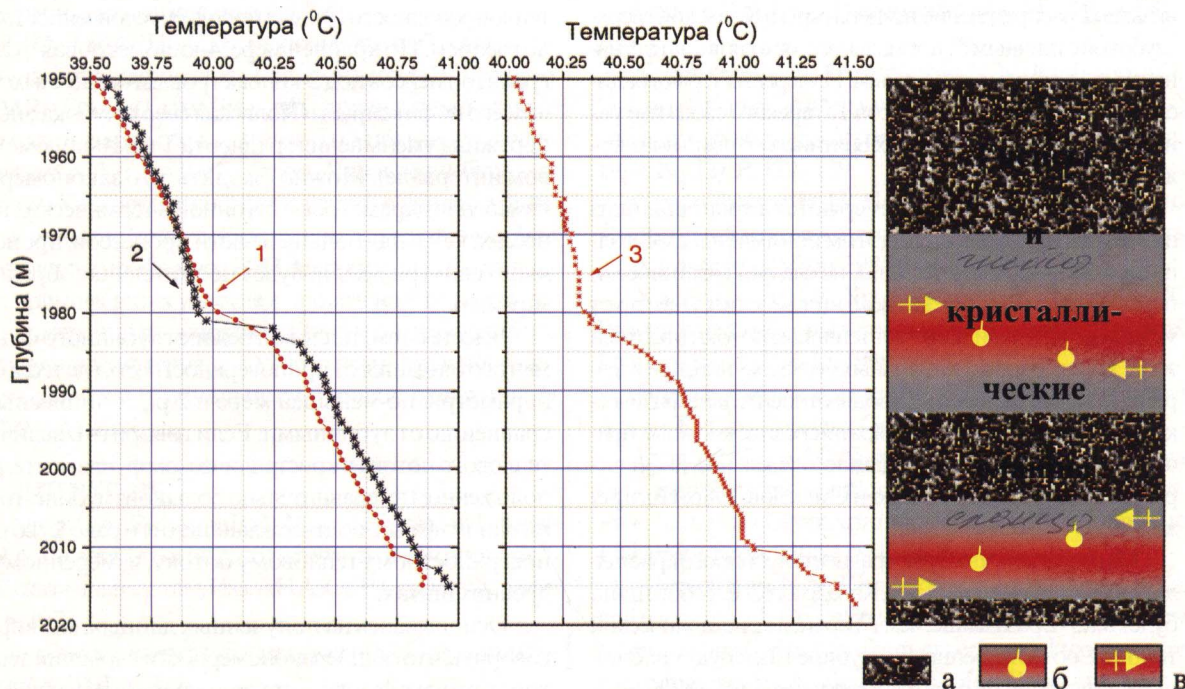


Рис. 5. Распределение температуры в кристаллическом фундаменте длительно простаивающей скважины Уратьминская №966. 1 – измерения в 1993 г., 2 – измерения в 1996 г., 3 – измерения в 1999 г. Выделенные температурные аномалии соответствуют разуплотненным зонам и свидетельствуют о постоянно действующих процессах конвективного теплопереноса в изученной части гранито-гнейсового слоя земной коры (а). Бурение в скважине выявило наличие небольшого притока жидкости (в) и повышенные газопоказания (б) в данном интервале глубин (Муслимов и Лапинская, 1996; промысловые данные).

численным измерением. Вопрос относительно природы глубинных вариаций потока в фундаменте находится в настоящее время в стадии обсуждения.

5. ПРОГНОЗ

Неточный прогноз геотермистов в отношении уникальной Кольской сверхглубокой скважины, допустивших ошибку в определении температуры на глубине 12000 м в 110 °С, очень заманчиво было бы объяснить наличием «зоны аномального геотермического градиента» (Моисеенко и Смыслов, 1986). Однако, анализ всех известных термограмм глубинного кристаллического фундамента (имеются в виду условно принятые глубины более 1.5 км) показывает, что рост температуры повсеместно составляет 1.8-2.1 °С/100м, а тепловой поток варьирует от 55 до 65 мВт м⁻² тогда как для верхних толщ фундамента характерны значения Γ и q 1-1.2 °С/100м и 30-40 мВт м⁻², соответственно (Козловский, 1984; Моисеенко и Смыслов, 1986; Hurtig et al., 1991).

Можно предположить, что аналогичное поведение градиентов T и тепловых потоков по разрезу фундамента должно наблюдаться во всех скважинах, расположенных в пределах кристаллических массивов. Нет оснований называть распределение температуры в Кольской сверхглубокой отличным от нормального, исходя лишь из сравнения его с приповерхностным. Измерения термоградиента в толщах гранито-гнейсов Татарского свода и в гранито-метаморфических слоях Балтийского щита подтверждают этот факт.

Те значения Γ и q , что измеряются в кристалле близ поверхности, даже если под этим понимается слой толщиной 500 - 1000 м, очевидно, не следует механически переносить в глубину. По всей видимости, существует механизм, который занижает тепловые потоки в верхней зоне. За неимением специальных исследований, преждевременно было бы делать выводы относительно физической природы данного явления, хотя среди возможных причин обычно называют денудацию, оледенение, инфильтрацию воды и т.п. (Моисеенко и Смыслов, 1986; Hurtig et al., 1991).

Мы полагаем, что термоградиент глубинного кристалла Балтийского, Украинского, Канадского, т.е. любого щита будет в 1.5-2 раза выше, чем Γ верхней кристаллической толщи. Соответственно, на глубине 10 км будут наблюдаться значения температуры не менее 150 - 180 °С.

Существуют ли весомые доказательства в пользу общепринятого мнения относительно низкого теплового потока (30 - 40 мВт м⁻²) на архейских щитах? И здесь, основываясь на глубинном, а не на поверхностном эксперименте, мы должны заключить, что потоки из недр вероятнее всего будут близки к 60 мВт м⁻².

Неисключено, что в некоторых случаях мы столкнемся с фактом пониженного теплового потока в фундаменте. По всей видимости, это будут зоны, где уменьшение потока связано с глубинными процессами; например, расположенные в районах нисходящих ветвей конвекционных ячеек (Neprimerov et al., 1989; Khristoforova et al., 1996). Поэтому, при изучении конкретного региона прогноз должен проводиться с учетом современных геодинамических моделей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования показывают наличие в кристаллическом фундаменте неоднородностей мелкого масштаба и вместе с тем поразительную крупномасштабную однородность термических свойств. Пренебрегая небольшими вариациями, мы имеем во всех изученных скважинах удивительно постоянное значение термоградиента с глубиной, усредненного в толщах мощностью более 250-300 м; в среднем, около 2 °С/100м.

Не наблюдается сколько-нибудь четко выраженного уменьшения геотермического градиента с глубиной, хотя оно и предполагалось, как следствие возрастания теплопроводности горных пород, обусловленное их уплотнением. По крайней мере, 4-километровая толща гранито-гнейсов под 2-километровым осадочным чехлом его не фиксирует. (Кольская сверхглубокая не обнаружила уменьшения градиента T и в 10-километровом интервале). Можно ожидать, что закономерное изменение параметров с глубиной в термических процессах, как и для большей части процессов, происходящих внутри Земли, будет носить скачкообразный характер.

Вместе с тем, тепловой режим глубинного фундамента отличается от приповерхностного, где тепловые параметры по меньшей мере в 2 раза занижены по сравнению с глубинными. Если говорить о величине теплового потока в кристаллическом фундаменте, расположенном на сравнительно большой глубине, то нет ни одного факта, подтверждающего его равенство приповерхностному тепловому потоку, измеренному на древних щитах.

Основываясь на полученных данных, мы вправе говорить, что общие закономерности вариаций теплового потока в фундаменте под осадочным чехлом так или иначе проявляют себя и в глубинных зонах архейских щитов. Наблюдается явная тождественность термоградиентов гранито-гнейсового слоя, погребенного под мощной толщей осадков и глубинного слоя гранито-гнейсов в районах, где он выходит на земную поверхность. Значения тепловых потоков порядка 55 -

65 мВт м⁻² следует признать наиболее предпочтительными, когда речь идет о потоках из недр Земли.

Этот факт прекрасно иллюстрирует Кольская сверхглубокая, и по мере накопления экспериментального материала становится все яснее, что на тезис «выявить природу Кольской температурной аномалии» можно возразить, что мы имеем дело не с аномалией, а с закономерным распределением температур по глубине.

Благодаря обнаруженным на больших глубинах многочисленным зонам разуплотнения представления о глубинном кристалле как о монолите оказались несостоятельными, а увеличение с глубиной количества, величины и разнообразия температурных аномалий, связанных с пронизаемыми зонами подтверждает перспективность глубинных слоев кристаллического фундамента.

Многолетние геотермические измерения показали, что часть температурных аномалий уменьшилась по амплитуде, часть сохранила свою форму и величину, доказывая наличие в определенных пластах постоянно действующих процессов конвективного тепло-массопереноса, а именно, - движение флюида в разуплотненных зонах и существование постоянного подтока (миграции) газа с больших глубин.

БЛАГОДАРНОСТЬ. Выполнение этой работы частично финансировалось Госкомитетом РТ, Фондом ВЗМР и ОАО «Татнефть». Мы признательны также всем сотрудникам Альметьевского Управления геофизических работ, Альметьевского Управления буровых работ и Казанского государственного университета, оказавшим помощь в проведении исследований. Мы благодарим профессора Н. Н. Непримерова и всех коллег, принимавших участие в проведении температурных измерений в глубоких скважинах и в обсуждении полученного материала. Особую признательность авторы выражают начальнику буровой скважины N 20009 С.М. Гвоздю.

ЛИТЕРАТУРА

Алиев С.А., Рустамов Р.И., Мирзабабаева И.И., Алиева З.А. Геотермический разрез сверхглубокой опережающей скважины Саатлы. Изв. АН АЗССР. Сер. Науки о Земле. 6, 1977.

Глубокие и сверхглубокие скважины. Советская геология. 8, 1991. 112с.

Искандеров Д. Б., Муслимов Р. Х. Корреляционный анализ данных бурения и характеристики разреза кристаллического фундамента Ново-Елховской скважины 20009. Геология нефти и газа, 5, 40-42, 1992.

Козловский Е.А. (Ред.) Кольская сверхглубокая. М.: Недра, 1984. 490 с.

Липаев А. А. Теплофизические исследования в петрофизике. Казань: Издательство Казанского университета, 1993. 146 с.

Моисеенко У.И., Смыслов А.А. Температура земных недр. Л.: Недра, 1986. 180с.

Муслимов Р.Х. (Ред.) Глубинные исследования архейского фундамента востока Русской платформы в Миннибаевской скважине 20000. Казань: Татарское книжное изд-во, 1976. 187 с.

Муслимов Р.Х., Лапинская Т.А. (Ред.) Кристаллический фундамент Татарстана и проблемы его нефтегазоносности. Казань: «Дента», 1996. 487 с.

Муслимов Р.Х., Лапинская Т.А., Кавеев И.Х. (Ред.) Глубинные исследования докембрия востока Русской платформы. Казань: Татарское книжное издательство, 1980. 176 с.

Непримеров Н. Н., Ходырева Э. Я. и Елисеева (Христофорова) Н. Н. Геотермия областей нефтегазоаккумуляции. Казань: Издательство Казанского университета, 1983. 138 с.

Пеньков И.Н. (Ред.) Докембрийские образования Татарского свода (по материалам глубокого бурения). Казань: Издательство Казанского университета, 1986. 149 с.

Резанов И.А. Сверхглубокое бурение. М.: Наука, 1981. 160с..

Neprimerov N. N., Christoforova N. N., Kushtanova G. G. Correlation of heat flow with tectonics (convective cells) and hydrogeological fields. Revista Brasileira de Geofisica. 1989. N 7 (2). P. 129 - 139.

Христофорова Н. Н., Непримеров Н. Н. К вопросу о точности карт теплового потока Урало-Поволжья. Нефть и газ. Известия ВУЗов. 1985. N 2. С. 9-16.

Христофорова Н.Н., Христофоров А.В., Муслимов Р.Х. Разуплотненные зоны в кристаллическом фундаменте. Георесурсы, 1 (1), 4-15, 1999.

Hurtig E., Cernak V., Haenel R., Zui V.I. (Eds.). Geothermal Atlas of Europe. Potsdam: Goth. Publ. House, 1991.

Khristoforova N.N., Neprimerov N.N., and Kushtanova G.G. Heat flow and mantle convection: geometry of flows. Proc. Int. Conf. «Geometrization of Physics II», Kazan State University, Kazan, 104-118, 1996.

Khristoforova, N.N., Khristoforov, A.V., Muslimov, R.K., and Panarina G.I., Crystalline basement pattern and geometry of unconsolidated zones (from experimental temperature measurements in ultradeep borehole), Proc. Int. Conf. «Geometrization of Physics III», Kazan State University, Kazan, 55-71, 1997.

Neprimerov N. N., Christoforova N. N., Kushtanova G. G. Correlation of heat flow with tectonics (convective cells) and hydrogeological fields. Revista Brasileira de Geofisica. 1989. N 7 (2). P. 129 - 139.