

Н. Н. ХРИСТОФОРОВА, А. В. ХРИСТОФОРОВ, Р. Х. МУСЛИМОВ  
Казанский государственный университет

## РАЗУПЛОТНЕННЫЕ ЗОНЫ В КРИСТАЛЛИЧЕСКОМ ФУНДАМЕНТЕ

(по результатам экспериментальных измерений температуры в сверхглубокой скважине Ново-Елховская 20009)

В основе данной статьи лежат геотермические исследования, выполненные в архейском кристаллическом фундаменте сверхглубокой скважины Ново-Елховская 20009, расположенной в пределах Татарского свода (Восточно - Европейская платформа). На термограммах фундамента мы выявили множество аномалий, большая часть которых является зонами конвективного тепло-массопереноса и связана с наличием разуплотненных зон. Их классификация позволила выделить 9 типов аномальных зон, имеющих различную форму и величину и идентифицируемых как зоны поглощения, притока, газовые и т.п. Изучение пространственной структуры температурных аномалий позволяет не только существенно дополнить представление о количестве проницаемых зон и характере их распределения с глубиной, но и сделать обоснованный прогноз наличия залежей углеводородов в глубинном кристаллическом фундаменте.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Один из актуальных вопросов современной разведочной геофизики - действительно ли существуют разуплотненные зоны в глубинном кристаллическом фундаменте и приуроченные к ним залежи полезных флюидов?

Хотя скважин, вскрывших глубинную кристаллическую структуру на десятки метров, пробурено уже достаточно много /1/, тем не менее геотермические замеры в них естественного невозмущенного температурного поля все еще остаются редкими. Тем более они редки в зонах сверхглубокого бурения, т.к. большинство сверхглубоких скважин пройдено преимущественно в осадочных отложениях депрессионных регионов земной коры. Из известных скважин в Восточной Европе, где температурные измерения проводились в достаточно мощной толще фундамента, могут быть названы Кольская сверхглубокая /2/, Миннибаевская 20000 /3/ и Ново-Елховская 20009 /4, промысловый материал/.

Вместе с тем, уже сейчас имеющиеся данные позволяют предположить, что расшифровка глубинных термограмм фундамента возможно даст ответ на ряд вопросов, принципиально важных для понимания теплового состояния земной коры. И один из них - каков механизм физических процессов, происходящих в разуплотненных зонах фундамента?

Возможность развития на больших глубинах разуплотненных проницаемых зон была подтверждена

итогами бурения в 1973-77 г.г. Миннибаевской сверхглубокой скважины 20000 (Восточно - Европейская платформа) /5/. Там впервые на значительных глубинах были обнаружены интенсивная трещиноватость и раздробленность пород фундамента. При этом было установлено, что количество и продуктивность проницаемых трещиноватых зон возрастают с глубиной /6/. Во вскрытом разрезе архея скважины 20000 обнаружены коллекторские толщи, битумо- и газопроявления, а также «проблематичные» образования, представляющие собой продукты перетирания и раздавливания обычных метаморфических пород вдоль крупных тектонических нарушений. Прямых признаков нефтеносности не зафиксировано /7/.

Исследования в Кольской сверхглубокой скважине, расположенной на Балтийском щите /2/ и в сверхглубокой скважине Ново-Елховская 20009 /1, промысловый материал/, подтвердили наличие в кристаллическом фундаменте разуплотненных слоев, зачастую насыщенных высокоминерализованной водой с газом. Однако, даже в таких хорошо изученных скважинах проведенные комплексы геофизических исследований /5, 6, 7/ явно недостаточны для точного выделения и характеристики проницаемых зон.

Мы установили, что тщательный анализ температурного режима скважины дает возможность в определенной степени понять процессы тепло-массопереноса в архейском кристаллическом фундамен-

те. Геотермические измерения позволяют, например, ответить на ряд вопросов относительно толщины и протяженности разуплотненных зон в фундаменте, характере их распределения с глубиной, выделить отдельные типы и охарактеризовать их сходство или различие между собой, оценить качественно их коллекторские свойства, а главное, понять природу явлений, происходящих в проницаемых зонах фундамента.

## 2. ПРОМЫСЛОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В СКВАЖИНЕ НОВО-ЕЛХОВСКАЯ 20009

Скважина Ново-Елховская 20009 расположена в пределах Южного купола Татарского свода на востоке Русской (Восточно-Европейской) платформы. Бурение в скважине вскрывает, как и везде на Южном куполе, два комплекса отложений: фундамент, сложенный мощной толщей гранито-гнейсовых кристаллических пород архейского возраста и осадочный чехол, сложенный терригенно-карбонатными отложениями палеозоя /1/. Породы фундамента метаморфизованы, прорваны по разломам интрузиями.

Замеры температур в скв. 20009 выполнялись в течение нескольких лет, начиная с 1996г., как в условиях неустановившегося теплового режима в скважине, так и при восстановленном температурном режиме. Экспериментальные измерения проводились через 20 см до глубины 5812 м. Таким образом, исследованиями охвачено 4005 м кристаллического фундамента. В этом интервале измерения температуры в фундаменте проведены в более чем 19 тысячах точек.

Для измерения температуры использовался скважинный термометр ТР7 -621, фиксирующий температуру в диапазоне 10-250 °С при давлении до 150 МПа. Разрешающая способность прибора оценивается в 0.05 °С. Тепловая инерция датчика температуры составляет 2 сек.

В мае-июне 1996г. скважина простаивала 1.5 месяца, затем бурилась с перерывами. В периоды простоя тепловой режим частично восстанавливался. Поэтому замер 1996 г.(13-14 июля) выполнен в скважине с неполностью установившимся температурным режимом. Известно, что для полного восстановления теплового режима в скважине требуется время простоя не менее времени бурения скважины. Однако такой замер, в условиях неустановившегося режима, не только вполне пригоден, но даже предпочтителен для выявления температурных аномалий, и, соответственно, проницаемых зон в фундаменте. Это связано с тем, что на невозстановленной термограмме перепады температуры в слоях с разной теплопроводностью выражены резче. Участки, в которых происходит поглощение флюидов или участки конвективного переноса тепла, т.е. связанные с движением жидкости, проявляются на возмущенных термограммах гораздо отчетливее, чем на восстановленных. Такой замер не годится, или требует корректировки в том случае, когда используется для фундаментальных целей - вычисления глубинного теплового потока из недр Земли или определения абсолютного (истинного) значения температуры в фундаменте.

В последующие годы температурные измерения в скважине Ново-Елховская 20009 проводились фактически в условиях установившегося режима температур, т.к. скважина с 1997 г. не бурилась.

Мы выполняли температурные замеры в скважине Ново-Елховская 20009 совместно с Альметьевским УГР (Управление геофизических работ) «Татнефтегеофизика». Замеры проводились по специально разработанной методике, которая позволяла достичь высокой точности измерений и тем самым выделить мелкомасштабные температурные аномалии и точно оконтурить 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 температуры 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. Непосредственное визуальное наблюдение за термограммой в процессе измерения и повторные исследования позволяет полностью исключить так называемый техногенный фактор, включающий приборные эффекты, погрешности измерения, наличие пробок в скважине и т.п. Такая методика температурных измерений обеспечивает получение наиболее точных данных для обнаружения разуплотненных зон в кристаллическом фундаменте и изучения теплового режима земной коры.

### 3. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МАТЕРИАЛА

#### 3.1. Общая характеристика термограммы

Распределение температур по разрезу скважины 20009 представлено на рис. 1. Температура в изученной части фундамента в условиях установившегося температурного режима меняется от 45.6 °С до 127.9 °С. На термограммах, рисунки 2-7, хорошо виден тот перепад в температурах, который связан с погрешностью аппаратуры.

Кровля кристаллического фундамента определена на глубине 1807.5 м, где на термограмме фиксируется излом, рис. 1. Именно здесь наблюдается скачок градиента от значения, характерного для осадочной толщи, порядка 3 °С/100м до значения, характерного для фундамента, примерно 2.1 °С/100м.

Наиболее важной особенностью в распределении температуры с глубиной в фундаменте яв-

ляется крупномасштабная неоднородность и неоднородности более мелкого масштаба. По всему разрезу скважины рост температуры с глубиной в фундаменте остается примерно постоянным при усреднении в толщах мощностью примерно от 250 м. Таким образом, вся 4-х километровая толща гранито-гнейсовых пород архейского фундамента характеризуется постоянным значением усредненного градиента температуры.

Для характеристики теплового режима обычно применяется такой термин, как «изрезанность» термограммы. Температурная кривая как бы состоит из набора отрезков, более-менее прямолинейных, с приблизительно постоянным термоградиентом, который изменяется примерно от 0 до 5-8 °С/100м. На их фоне резко выделяются температурные аномалии.

В фундаменте существует множество температурных аномалий различной формы и величины. На

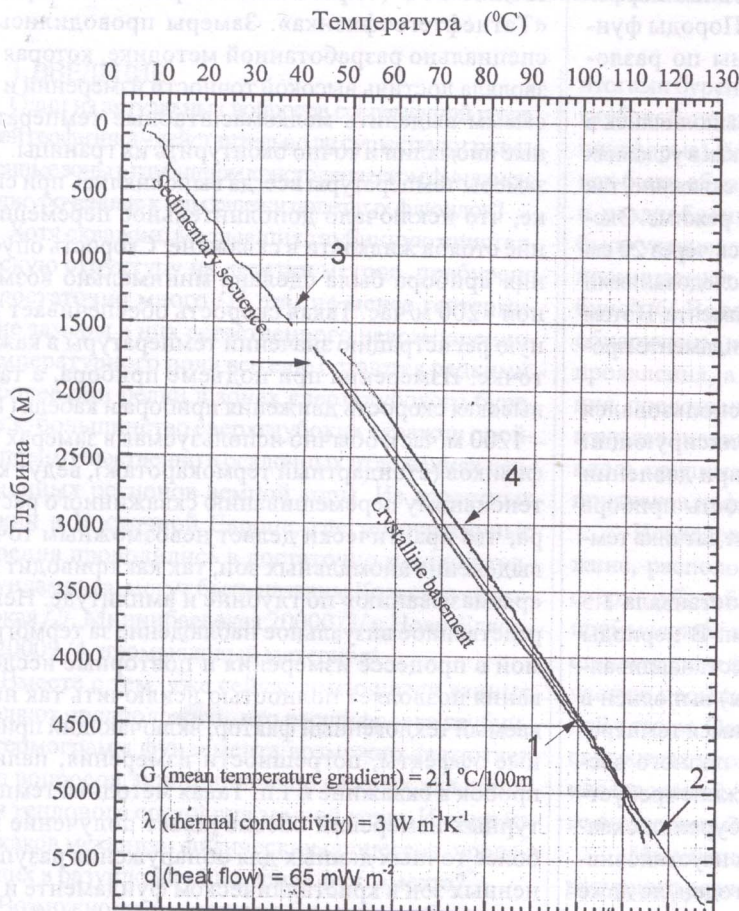


Рис. 1. Распределение температуры в сверхглубокой скважине Ново-Елховская 20009.

- 1 - установившийся температурный режим (1999, январь);
- 2 - установившийся температурный режим (1999, июль);
- 3 - измерения в 1997;
- 4 - неустановившийся температурный режим (1996, июль)

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 /8, промысловый материал/.

Температурные аномалии, выделенные несколькими точками (примерно до трех - пяти точек), не обсуждаются, т.к. их появление может быть обус-

ловлено погрешностью измерения. Пример такой аномалии можно видеть на глубине 5254.6 м, которая при повторных измерениях не была выявлена.

### 3.2. Выявление разуплотненных зон в фундаменте на основе геотермических измерений

Отождествление температурных аномалий с проницаемой зоной основано главным образом на том, как эта аномалия проявляется на температурной кривой. Хорошо известно, что наличие чрезвычайно больших градиентов температуры на термограмме скважины, т.е. темпера-

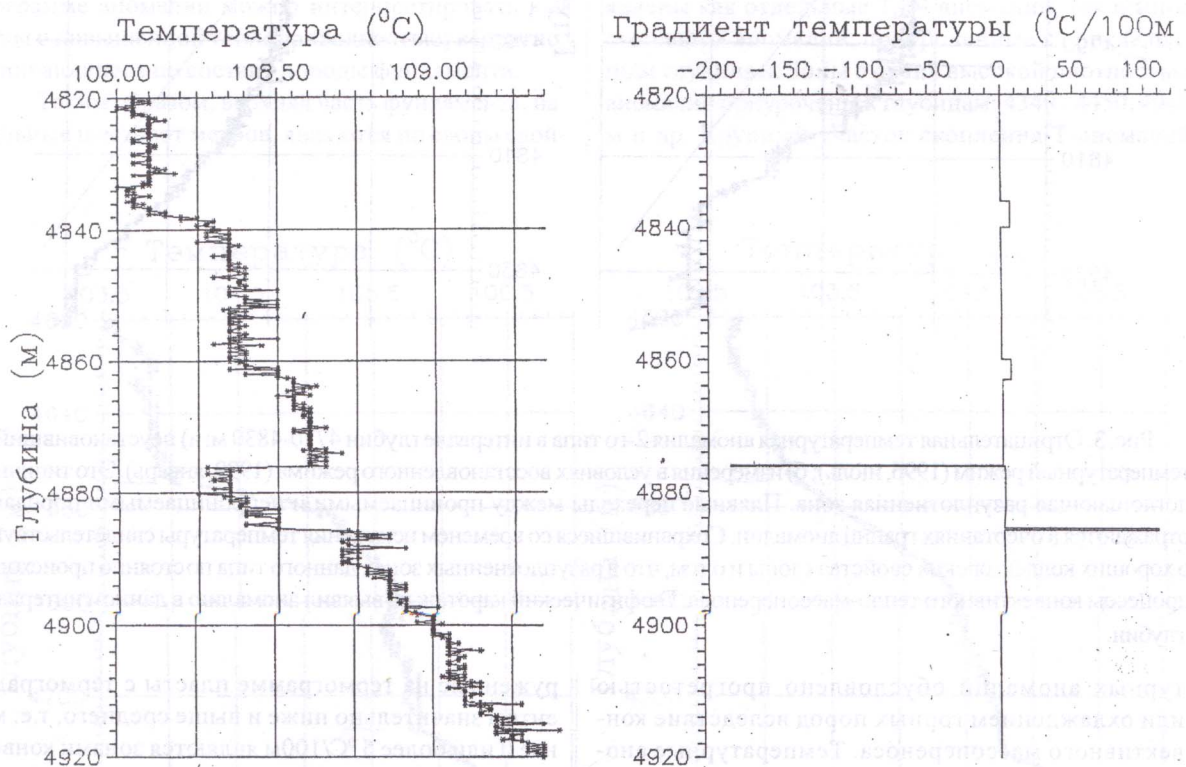


Рис. 2. Распределение температуры и градиента температуры в кристаллическом фундаменте сверхглубокой скважины Ново-Елховская 20009. В интервале глубин 4876-4885.4 м выделяется отрицательная температурная аномалия, которая связана с разуплотненной зоной. Изменение температуры обусловлено перераспределением тепла из-за сильного поглощения скважинного флюида в проницаемый горизонт. Резкие изменения градиента определяют кровлю и подошву разуплотненной зоны и свидетельствуют о наличии резких границ между проницаемыми и непроницаемыми породами фундамента. Бурение в скважине выявило сильно раздробленные породы (шлам) на этих глубинах /1, 8/. В процессе бурения произошло обрушение пород и прихват бурового инструмента на глубине 4832 м, была произведена закачка цементного раствора. В интервале глубин 4857-4896 м наблюдалась повышенная концентрация газа и небольшой приток пластового флюида /промысловые данные/.

Как видно из графика, температурные измерения позволяют более точно определить основной поглощающий горизонт. Однако на последующих замерах температур, выполненных в условиях установившегося режима, данные аномалии проявляются лишь как слабопроницаемые пласты (см. рис. 7), что свидетельствует о прекращении процессов конвективного тепло-массопереноса в разуплотненных зонах данного типа.

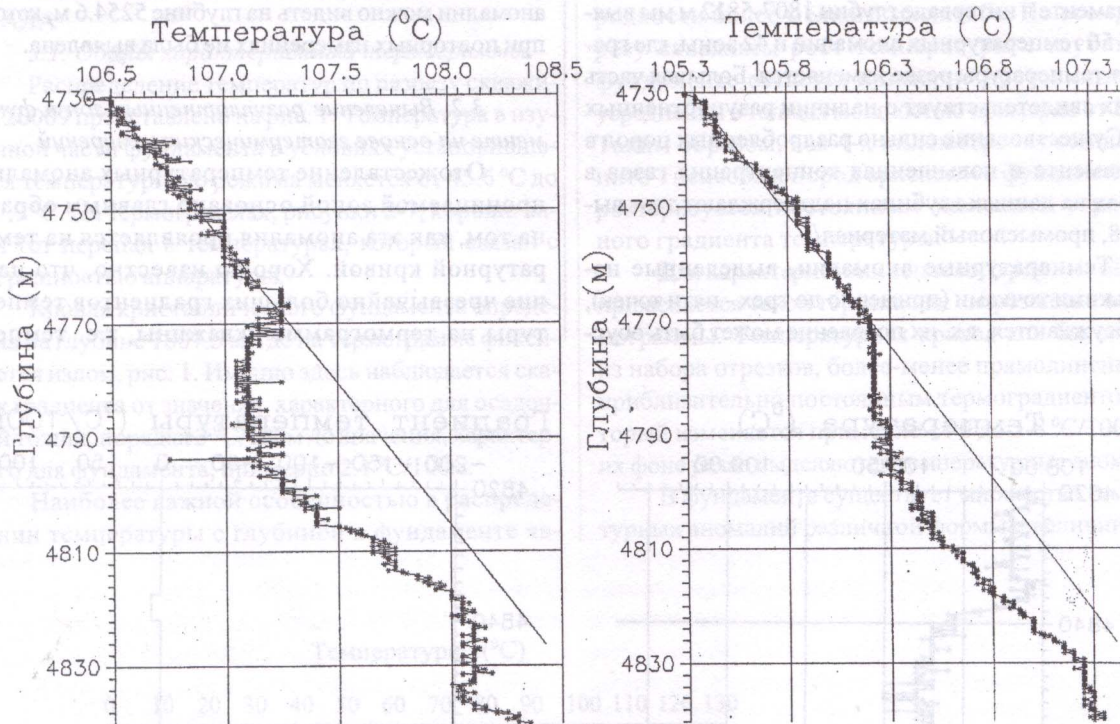


Рис. 3. Отрицательная температурная аномалия 2-го типа в интервале глубин 4770–4830 м: а) неустановившийся температурный режим (1996, июль); б) измерения в условиях восстановленного режима (1999, январь). Это типичная поглощающая разуплотненная зона. Плавные переходы между проницаемыми и непроницаемыми породами отражаются в очертаниях границ аномалии. Сохранившиеся со временем искажения температуры свидетельствуют о хороших коллекторских свойствах зоны и о том, что в разуплотненных зонах данного типа постоянно происходят процессы конвективного тепло-массопереноса. Геофизический каротаж не выявил аномалию в данном интервале глубин.

турных аномалий обусловлено прогремостью или охлаждением горных пород вследствие конвективного массопереноса. Температурные аномалии могут являться также следствием теплофизической (литологической) неоднородности горных пород, т.е. образовываться на границах пород с разной теплопроводностью после прекращения работы скважины [9]. Эти два типа аномалий хорошо различаются по форме и величине, но большей частью они сопровождают друг друга и хорошо идентифицируют проницаемый горизонт.

Искажение температуры на уровне пласта зависит главным образом от проницаемости пласта. Иначе говоря, самые крупные Т-аномалии приурочены к наиболее разуплотненным породам. Обна-

руженные на термограмме пласты с термоградиентом значительно ниже и выше среднего, т.е. менее 0 или более 5 °C/100м являются зонами конвективного тепло-массопереноса и могут быть идентифицированы как проницаемые зоны с высокими коллекторскими свойствами.

### 3.3. Аномальные зоны в кристаллическом фундаменте

В разрезе скважины Ново-Елховская 20009 на термограммах кристаллического фундамента фиксируются: а) мощные толщи однородного распределения температуры, где Т-аномалии редки и б) участки, где количество температурных аномалий резко возрастает. Соответственно, можно говорить и о таком же распределении в фундаменте разуплотненных зон.

Несколько крупных положительных Т-аномалий, величиной до  $1^{\circ}\text{C}$  наблюдается также в живецском ярусе осадочной толщи, что свидетельствует о наличии там проницаемых зон поглощения.

В верхней части кристаллического фундамента аномалии редки. Как правило, здесь встречаются единичные аномалии на фоне плавного изменения температуры. Первая Т-аномалия встречена на глубинах 1930-1954 м. Это участок с пониженным градиентом температуры, по приведенной ниже классификации - аномальная зона 9-го типа. Также два низкоградиентных участка выделяются на глубинах 2070-2100 и 2104-2115 м. Такие слабовыраженные на термограмме аномалии можно интерпретировать как зоны с повышенной теплопроводностью; вероятно, отличающиеся по составу породы фундамента.

Таким образом, верхняя часть фундамента, начальные шестьсот метров, являются по своим свой-

ствам близкими к монолитному кристаллу и могут быть названы истинно кристаллической зоной.

Первая зона частых Т-аномалий начинается только с глубины 2420 м. С этой же глубины можно говорить о наличии в фундаменте проницаемых зон. Серия Т-аномалий, встреченных на так называемых средних глубинах: 2550-2660 м, 2800-2850, 2950-3300 м, имеет своеобразный характер. Это отрицательные аномалии, которые проявляются на фоне положительных при постоянном среднем значении термоградиента. По приведенной ниже классификации это, в основном, поглощающие аномалии 1,2- типов.

В кристаллическом фундаменте скв. 20009 выявлены как отдельные Т,Г - аномалии, так и зоны скопления аномалий, приуроченные к определенным глубинам. Зоны с очень высокой плотностью аномалий приурочены к глубинам: 4340 - 4450, 4940 м и др. Крупный участок скопления Т-аномалий

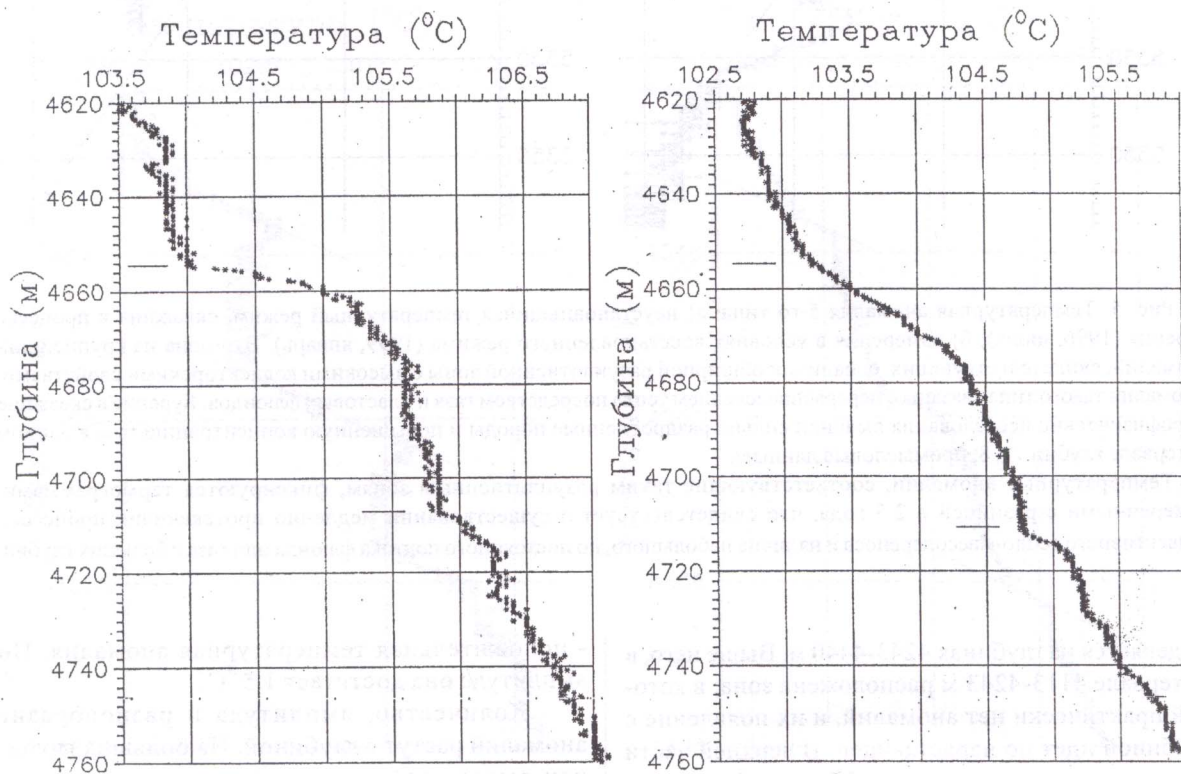


Рис. 4. Температурная аномалия 4-го типа: а) неустановившийся температурный режим (1996); б) измерения в условиях восстановленного режима (1999). Аномалии такой формы соответствуют крупной разуплотненной зоне и характерны для газовых залежей. Бурение в скважине выявило сильно раздробленные породы и каверны в данном интервале глубин, а также повышенные газопоказания /1, 8, промысловые данные/. Измерения температуры во времени свидетельствуют о наличии постоянной вертикальной миграции газа с больших глубин.

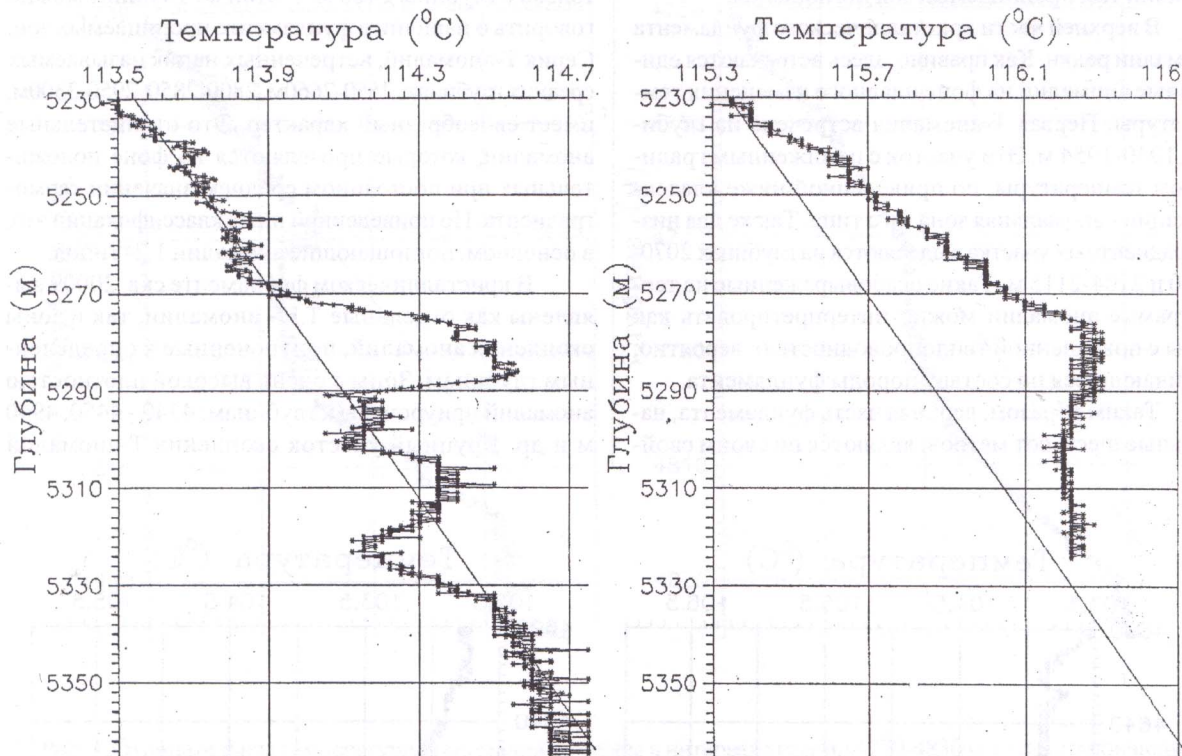


Рис. 5. Температурная аномалия 5-го типа: а) неустановившийся температурный режим, скважина в процессе бурения (1996, июль); б) измерения в условиях восстановленного режима (1999, январь). Это одна из крупнейших аномалий, свидетельствующих о наличии обширной разуплотненной зоны с высокими коллекторскими свойствами. Аномалии такого типа связаны с перераспределением тепла посредством газа и пластовых флюидов. Бурение в скважине и геофизические исследования выявили сильно раздробленные породы и повышенную концентрацию газа в данном интервале глубин /1, 8, промысловые данные/.

Температурные аномалии, соответствующие таким разуплотненным зонам, фиксируются термограммами, измеренными с разницей в 2.5 года, что свидетельствует о существовании медленно протекающих процессов конвективного тепло-массопереноса и наличие небольшого, но постоянного подтока флюида или газа с больших глубин.

выделяется на глубинах 4243-4440 м. Выше него, в интервале 4113-4243 м расположена зона, в которой практически нет аномалий, и их появление с глубиной идет по нарастающей. В верхней части фундамента, примерно до глубины 3400 м аномалии с большой амплитудой - исключительно отрицательные, более похожи на аномалии поглощения; ниже - количество тех и других, т.е. (+) и (-) - аномалий примерно одинаковое.

Крупный скачок температуры наблюдается в нижней части фундамента на гл. 4654-4662м

- положительная температурная аномалия. По амплитуде она достигает 1.5 °С.

Количество, амплитуда и разнообразие аномалий растут с глубиной. На больших глубинах выделяются не просто зоны-«пласты», а зоны-«толщи», в которых аномалии концентрируются, рис. 5. Их мощность достигает 100 м и более. Отсюда мы делаем вывод о существовании не просто разуплотненных слоев, а разуплотненных толщ в кристаллическом фундаменте. Увеличение амплитуды, например, положи-

тельных аномалий с глубиной может свидетельствовать о подтоке газа с больших глубин. Зачастую основная зона разуплотнения сопровождается сверху и снизу небольшими участками проницаемых пород, и помимо крупных Т-аномалий существует множество мелких.

В принципе, вся нижняя зона кристаллического фундамента, начиная с глубины 4243 м, может быть названа аномальной.

На графиках видно также, что несмотря на то, что аномальных участков в фундаменте очень много, существуют зоны, где количество аномалий невелико. С глубиной толщина «спокойных» участков становится все меньше и меньше. В нижней части фундамента однородные участки с примерно постоянным ростом температуры имеют мощность всего около 20 метров, тогда как в верхней - сотни метров.

#### 4. КЛАССИФИКАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ АНОМАЛИЙ В КРИСТАЛЛИЧЕСКОМ ФУНДАМЕНТЕ

Неожиданностью для нас явилось то, что на термограммах кристаллического фундамента встречено не просто множество аномалий, а множество различного вида температурно-градиентных аномальных зон. Классификация их позволила выделить 9 типов.

Выявленные в фундаменте 9 типов температурных аномалий имеют разную форму и размеры. При этом каждый тип характеризуется своим особым распределением термоградиента. Анализируя совместно графики температур и термоградиентов можно точно классифицировать тип аномалии в фундаменте. Природа некоторых из них может быть предположительно названа, происхождение другого типа аномалий на данном этапе исследований остается неяс-

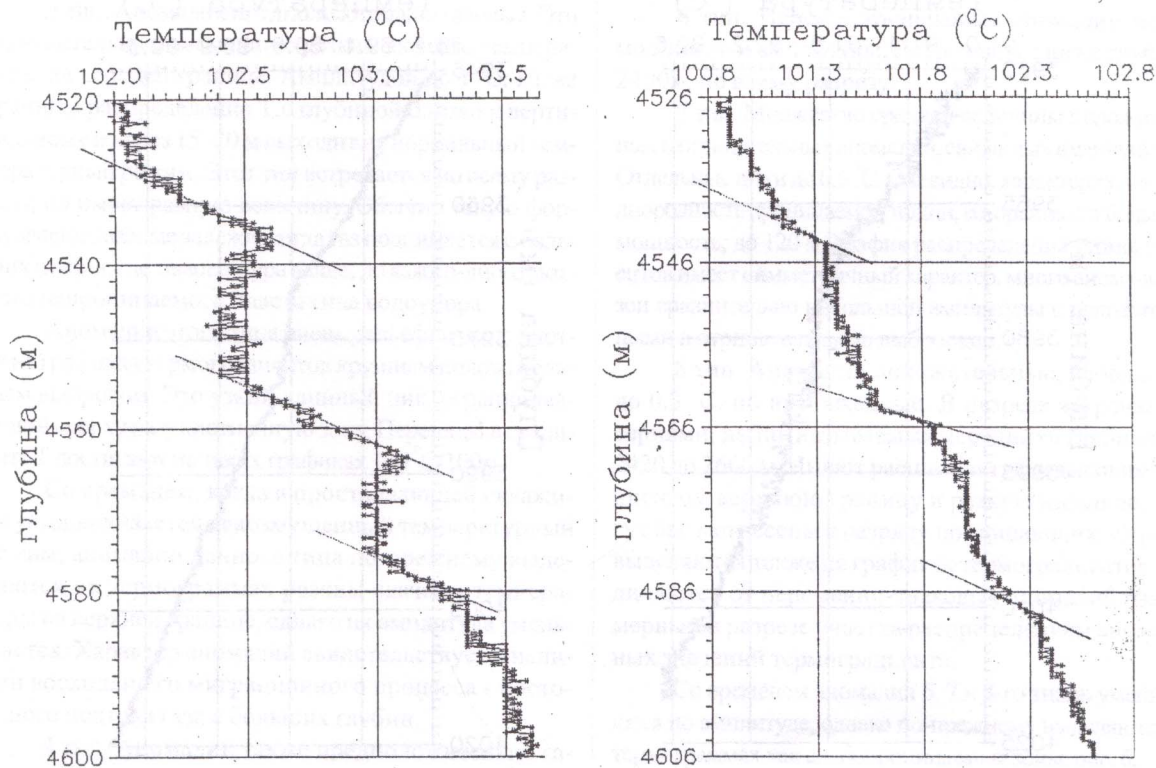


Рис. 6. Серия мелких температурных аномалий 7-го типа: а) неустановившийся температурный режим (1996); б) измерения в условиях восстановленного режима (1999). График демонстрирует хорошую коррелируемость двух термограмм, выполненных с разницей в 2.5 года. Небольшое несоответствие по глубине связано с техническим фактором - замедлением кабеля при спуске в скважине с более вязким буровым раствором.



ным. Однако большая часть участков с аномальными тепловыми свойствами явно является зонами конвективного теплопереноса, которые могут быть идентифицированы как проницаемые зоны.

Основные типы температурных аномалий, встречающихся в фундаменте скважины Ново-Елховская 20009, приведены на рисунках 2-7.

1 тип. Аномалии поглощения. Это отрицательные аномалии с резкими границами, рис. 2. Встречаются часто и представляют наибольший интерес, так как это зоны явно повышенной проницаемости, в которых происходит поглощение охлаждающего флюида, или движение флюида по пласту. Иногда значительной мощности, до 10-15 м и амплитудой по Т до  $0.5^{\circ}\text{C}$ , иногда совсем узкие пики, мощностью 2-4 м, но такой же амплитуды. Резкость верхней и нижней границ позволяет такой тип пла-

стов выделять с высокой точностью. Вероятно, они характеризуют зоны очень четкой смены проницаемых и непроницаемых пород. Аномалии 1-го типа наиболее ярко выделяются на графиках термоградиентов, рис. 2. Это узкие длинные пики, ограничивающие разуплотненную зону. Перепады в градиентах Т достигают на таких графиках огромных значений, до  $200^{\circ}\text{C}/100\text{м}$  (!).

Однако, аномалии 1-го типа очень слабо проявляются на температурных кривых, полученных в скважине с установившимся тепловым режимом. На таких термограммах они выделяются как обычные слабопроницаемые пласты. Тот факт, что со временем искажения температуры исчезают, свидетельствует о том, что поглощение жидкости в данные пласты происходит только в процессе бурения. Соответственно, после бурения, в режиме простоя скважи-

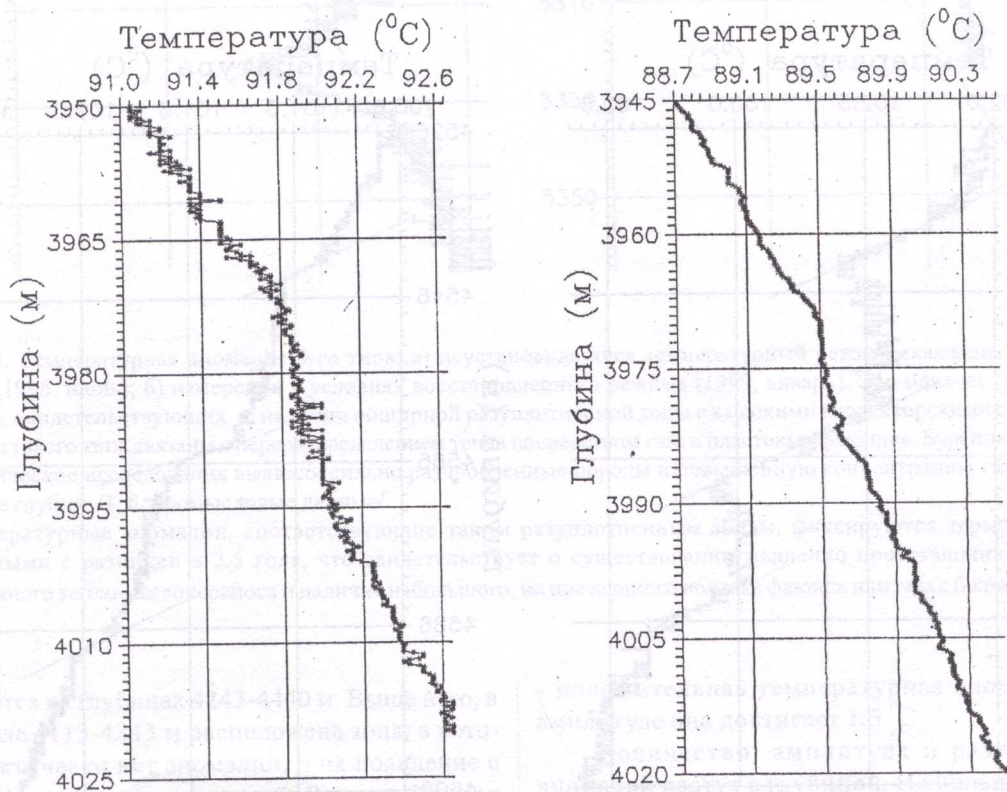


Рис. 7. Температурная аномалия 9-го типа: а) неустановившийся температурный режим (1996, июль); б) измерения в условиях восстановленного режима (1999, январь). Мы интерпретировали аномалию как слабо-проницаемую зону в кристаллическом фундаменте. По данным бурения и геофизическому каротажу на этих глубинах фиксируются трещиноватые породы, небольшой приток пластовой жидкости и повышение газопоказаний /1, 8, промысловые данные/. Геотермический мониторинг в течение нескольких лет показывает устойчивое существование аномалий, выделяемых как разуплотненные зоны с низкими коллекторскими свойствами.

ны процессы конвективного теплопереноса в разуплотненных зонах данного типа прекращаются.

2 тип. Аномалии поглощения отрицательные, с расплывчатыми границами, рис. 3. Встречаются по всему разрезу ниже глубины 2600 м. Мощность их увеличивается с глубиной до 40 м. Внутри зоны могут наблюдаться мелкие переменнo-знаковые аномалии, свидетельствующие о неоднородности проницаемого пласта. На графике термоградиентов очертания такого типа аномалий проявляются слабо.

Иногда встречаются аномалии смешанного типа 1-2, с одной резкой и другой расплывчатой границами. На графиках термоградиентов одна из границ аномалии выражена слабо, или неявно, другая - резким длинным выбросом.

Измерения температуры, выполненные в течение нескольких лет, показывают, что аномалии данного типа хорошо сохраняются со временем и по-прежнему выделяются на термограммах поглощающими зонами, рис. 3.

3 тип. Аномалии предположительно газовые. Это положительные аномалии с резким скачком температуры на верхней границе. Амплитудой до  $1^{\circ}\text{C}$ . Ниже границы распределение  $T$  с глубиной близко к вертикальному и через 15-20 м выходит на нормальный температурный режим. Этот тип встречается по всему разрезу, но имеет разную величину. Обычно такую форму имеют газовые залежи, когда газ поднимается с больших глубин, где температура выше, до какого-либо плотного непроницаемого пласта типа водоупора.

Аномалии этого типа очень рельефно выделяются на графиках термоградиентов крупным положительным выбросом. Это узкий длинный пик, ограничивающий сверху разуплотненную зону. Перепады в градиенте  $T$  достигают на таких графиках  $100^{\circ}\text{C}/100\text{м}$ .

Со временем, когда в простаивающей скважине устанавливается невозмущенный температурный режим, аномалии данного типа по-прежнему выделяются на термограммах резким скачком температуры на верхней границе, однако их амплитуда уменьшается. Характер аномалий свидетельствует о наличии восходящего миграционного процесса - постоянного подтока газа с больших глубин.

4 тип. Аномалии также предположительно газовые, самые крупные по амплитуде, до  $+1.5^{\circ}\text{C}$ , но имеют плавную верхнюю границу и пологий выход на невозмущенную геотерму, рис. 4. Свидетельствуют о наличии разуплотненной зоны и достаточно сильной ее прогремости. Встречаются по всему разрезу, а также в фундаменте других скважин. На графиках термоградиентов выделяются четко, положи-

тельным выбросом, но, в отличие от аномалий 3-го типа, имеют протяженный участок аномального градиента, небольшого по величине, до  $25^{\circ}\text{C}/100\text{м}$ .

Данный тип аномалий хорошо выделяется на термограммах, как в условиях неустановившегося теплового режима скважины, так и в условиях восстановленного режима, спустя 2-3 года, рис. 4.

5 тип. Переменно-знаковые аномалии. Сочетание положительных (+) и отрицательных (-) аномалий, как бы связанных в единую зону, рис. 5. Мощностью до 100 метров, по амплитуде - до  $1^{\circ}\text{C}$ . Встречаются только в нижней части разреза, на больших глубинах. Предположительно имеют комплексную природу - трещиновато-проницаемая порода, газ, поднимающийся с больших глубин, поглощающие процессы, движение флюида по пласту. На графиках термоградиентов выделяются широкой зоной с несколькими выбросами в обе стороны. По величине в основном небольшие, до  $20^{\circ}\text{C}/100\text{м}$ , но на некоторых участках могут иметь значения до  $100^{\circ}\text{C}/100\text{м}$ .

6 тип. Переменно-знаковые аномалии малой мощности и амплитуды. Встречаются ниже глубины 2400 м, по всему разрезу.

7 тип. Множество средней величины положительных и отрицательных аномалий, связанных в единую зону. Отдельные пики до  $0.5^{\circ}\text{C}$ . Очевидно, характеризуют неоднородность проницаемой толщи, которая имеет большую мощность, до 120 м. График распределения термоградиентов имеет симметричный характер, много аномальных зон сравнительно небольшой амплитуды с положительными и отрицательными выбросами.

8 тип. Аномалии положительные, небольшие, до  $0.3^{\circ}\text{C}$ , но протяженные. В разрезе встречаются сериями, на так называемых «средних» глубинах от 2420 до 2660 м. Имеют расплывчатую с высоким градиентом верхнюю границу и резкую нижнюю. Могут быть отнесены к разряду поглощающих. Хорошо выделяются также на графиках термоградиентов. Отличаются от переменнo-знаковых аномалий равномерным в разрезе участка распределением аномальных значений термоградиента.

Со временем аномалии 6, 7 и 8-го типов уменьшаются по амплитуде, однако по-прежнему выделяются на термограммах как слабопроницаемые зоны, рис. 6.

9 тип. Зоны с термоградиентом, близким к нулевому (вертикальные участки), рис. 7. Встречаются на всех глубинах, но в нижней толще на них накладываются аномалии более сложной формы. По градиенту выделяются слабо. Вероятнее всего, это участки резкой смены пород фундамента с разными теплофизическими свойствами. В ряде

случаев могут быть выделены как слабопроницаемые. В условиях восстановленного температурного режима большая часть аномалий этого типа сохраняет свою форму и величину, рис. 7.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Простота и сложность, обнаруженные в структуре температурного поля кристаллического фундамента, послужили источником новых идей в понимании его теплового режима. Выполненные исследования показывают наличие в фундаменте неоднородностей мелкого масштаба и вместе с тем поразительную крупномасштабную однородность термических свойств. Пренебрегая небольшими вариациями, мы имеем удивительно постоянное значение усредненного термоградиента в фундаменте, около  $2.1^\circ\text{C}/100\text{м}$ .

Не наблюдается и 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. Можно ожидать, что закономерное изменение параметров с глубиной в термических явлениях, как и для большей части процессов, происходящих внутри Земли, будет носить скачкообразный характер.

В кристаллическом фундаменте выявлено множество температурных аномалий различного происхождения. 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 это.

Проведенная классификация всех температурно-градиентных аномалий, обнаруженных в кристаллическом фундаменте сверхглубокой скважины Ново-Елховская 20009 позволила выделить 9 типов различной формы и величины аномальных зон. Большая часть температурных аномалий, обнаруженных в фундаменте отличается по форме от аномалий, существующих в осадочной толще. Помимо отдельных температурно-градиентных аномалий, в фундаменте выявлены зоны скопления аномалий, приуроченные к определенным глубинам. На больших глубинах выделяются не просто зоны-«пласты», а зоны-«толщи», в которых аномалии

концентрируются. Их мощность достигает 100 м и более.

Аномальные зоны разделяют толщи однородного распределения температуры, где Т-аномалии редки. Так, не выявлено ярко выраженных температурных аномалий в верхней части фундамента скважины 20009. На термограмме скважины выделяются положительные и отрицательные аномалии с различными типами границ, которые свидетельствуют о наличии как резких, так и постепенных переходов между плотными и проницаемыми породами фундамента.

Таким образом, благодаря открытым 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 проницаемыми зонами, подтверждает перспективность глубинных слоев кристаллического фундамента.

Повторные температурные измерения, проведенные в кристаллическом фундаменте скважины 20009 в условиях восстановленного теплового режима, спустя 2 и 3 года после бурения, полностью подтвердили существование выделенных ранее температурных аномалий, идентифицируемых как разуплотненные зоны. Часть 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.

Природа некоторых температурных аномалий в кристаллическом фундаменте может быть названа: аномалии поглощения, притока, газовые, следствие резкой теплофизической неоднородности горных пород и т.п. Однако сколько-нибудь полное понимание природы таких зон, вероятно, дело будущего, когда сверхглубокие структуры попадут в зону интенсивного разбуривания и станут предметом пристального внимания исследователей разного профиля.

**БЛАГОДАРНОСТЬ.** Выполнение этой работы частично финансировалось ОАО «Татнефть» и Фондом ВЗМР. Мы признательны всем сотрудникам ОАО «Татнефть», Госкомитета РТ по геологии

и использованию недр, 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.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кристаллический фундамент Татарстана и проблемы его нефтегазоносности /Под ред. Муслимова Р. Х., Лапинской Т. А. Казань: «Дента», 1996. 487 с.

2. Кольская сверхглубокая / Под ред. Козловского Е.А. М.: Недра, 1984. 490 с.

3. Глубинные исследования докембрия востока Русской платформы / Под ред. Муслимова Р.Х., Лапинской Т.А., Кавеева И.Х. Казань: Татарское книжное издательство, 1980. 176 с.

4. 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.

5. Глубинные исследования архейского фундамента востока Русской платформы в Миннибаевской скважине 20000 / Под ред. Муслимова Р.Х. Казань: Татарское книжное изд - во, 1976. 187 с.

6. Докембрийские образования Татарского свода (по материалам глубокого бурения) Под ред. Пенькова И.Н. Казань: Издательство Казанского университета, 1986. 149 с.

7. Муслимов Р.Х., А.М. Шавалиев, Р.Б. Хисамов, И.Г. Юсупов. Геология, разведка и эксплуатация Ромашкинского нефтяного месторождения. Издание в 2 т. М.: ВНИИОЭНГ, 1995. Т. 1, 492 с. Т. 2, 286 с.

8. 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.

9. Череменин Г.П. Геотермия. Ленинград: Недра, 1972. 272с.



**Наталья Николаевна Христофорова**

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры радиоэлектроники Казанского государственного университета. Главный геолог научно-производственного объединения «Гео-Ресурс».

Специалист по тепловому режиму Земли; более 20 лет является научным руководителем геотермических экспедиций. Область научных интересов – тепловой поток и конвекция в мантии, поиск месторождений нефти и газа на больших глубинах.



**Анатолий Владиславович Христофоров**

Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры радиоэлектроники Казанского государственного университета. Область научных интересов - молекулярная физика растворов.

Имеет большой опыт экспериментальных промысловых исследований пластов и скважин на месторождениях нефти, газа и термальных вод.