

Н.Н. Христофорова, А.В. Христофоров, Р.Х. Муслимов

Казанский государственный университет
Natalya.Khristoforova@ksu.ru, Anatoly.Khristoforov@ksu.ru

К ВОПРОСУ О ПРОТЯЖЕННОСТИ РАЗУПЛОТНЕННЫХ ЗОН В КРИСТАЛЛИЧЕСКОМ ФУНДАМЕНТЕ

На основе экспериментальных высокоточных измерений температуры в глубоких и сверхглубоких скважинах изучен тепловой режим гранито-гнейсового слоя земной коры. Сделана оценка вертикальной и горизонтальной протяженности проницаемых зон в кристаллическом фундаменте Татарского свода и Мелекесской впадины. Интервалы глубин с крупными температурными аномалиями были рекомендованы нами для опробования как наиболее перспективные; из некоторых интервалов получен приток жидкости.

1. Экспериментальные измерения температуры в глубоких скважинах

Высокая чувствительность датчика температуры особенно важна при изучении гранито-гнейсового слоя Земли, где малейшие вариации температуры с изменением глубины (порядка сотых долей градуса) могут свидетельствовать о его неоднородности и наличии разуплотненных зон.

Комплекс аппаратуры для электронного дистанционного исследования скважин (ЭДИС), разработанный на кафедре радиоэлектроники Казанского университета в 60-х годах XX века и впоследствии многократно усовершенствованный, обеспечивает необходимую чувствительность. Эта аппаратура и соответствующие методики измерений дают возможность выделять температурные аномалии и связанные с ними неоднородности кристаллического фундамента толщиной в десятки сантиметров.

Большая часть экспериментального материала получена нами при помощи аппаратуры ЭДИС. Измерения проводились при опускании глубинного измерительного прибора в скважину с кратковременными остановками, необходимыми для приведения датчика прибора в тепловое равновесие с окружающей средой в каждой точке. При этом измеряется температура (T) невозмущенного столба жидкости и обеспечивается необходимое разрешение по глубине (Рис. 1–5).

Температурные измерения в скважинах 20010, 33, 34, 1001 и 20009 мы выполняли совместно с Альметьевским управлением геофизических работ. Использовалась стандартная геофизическая аппаратура для термокаротажа. Измерения проводились в процессе безостановочного опускания глубинного прибора в скважину с минимально возможной скоростью 100–200 м/час. Такая методика измерений, хотя и требует в несколько раз больших затрат времени на эксперимент по сравнению со стандартной, дает значительно более качественные экспериментальные данные. Она позволила нам выделить мелкомасштабные T -аномалии и точно оконтурить их границы вплоть до глубины 5800 м (скв. 20009).

Во многих скважинах мы проводили повторные измерения. Как правило, наблюдалась устойчивая повторяемость формы термограмм, абсолютных значений температуры на отметках глубины, а также отдельных особенностей в распределении T и термоградиента (Γ), рис. 1. Это указывает на долговременную стабильность процессов, протекающих в земной коре, и на отсутствие заметного влияния каких-либо аппаратурных эффектов на результаты измерений (Христофорова и др., 1999; 2000).

2. Разуплотненные зоны в фундаменте

По результатам многолетних исследований нами проведена классификация различных типов температурных аномалий в кристаллическом фундаменте и сделан вывод о связи большинства из них с наличием разуплотненных (проницаемых) зон. Сравнение результатов, полученных с помощью высокоточной термометрии, данных геофизического каротажа и отбора керна при бурении показало хорошую корреляцию в расположении геотермических аномалий и зон раздробленных пород (Христофорова и др., 1999).

На термограммах кристаллического фундамента выделены мощные толщи однородного распределения температуры, где T -аномалии редки, и участки, где количество аномалий резко возрастает. Следовательно, можно говорить и о таком же распределении проницаемых зон (Рис. 1–5), представляющих собой потенциальные коллектора для скопления углеводородов.

Новые измерения в скважинах подтвердили ранее сделанный вывод, что количество разуплотненных зон и соответствующая им величина T -аномалий возрастают с увеличением глубины (Христофорова и др., 2000). На термограммах (Рис. 3, 5) выделены отрицательные и положительные аномалии с различными типами границ, которые свидетельствуют о наличии как резких, так и постепенных переходов между плотными и проницаемыми породами фундамента. На больших глубинах выделены разуплотненные «толщи», в которых аномалии концентрируются.

Наличие на термограммах резких положительных и отрицательных «срывов» температуры, достигающих по амплитуде 0.5 °С (Рис. 3а), противоречит достаточно очевидным соображениям, согласно которым переходы должны быть плавными. Однако, как правило, форма аномалий хорошо воспроизводилась на термограммах при повторных измерениях, проведенных через длительный промежуток времени. Объяснение этому факту пока не найдено.

Аномальные значения термоградиентов можно рассматривать как следствие протекания в проницаемых зонах процессов конвективного теплопереноса. Они свидетельствуют не только о хороших коллекторских свойствах, но и о постоянном движении флюидов в этих зонах. Эти интервалы глубин были рекомендованы нами для опробования. Например, в скв. Кукморская 20010 в качестве наиболее перспективного рекомендован интервал глубин в элювии (Рис. 1а). В результате опробования из этого интервала получен приток жидкости. В скважинах Северо-Татарского свода и Мелекесской впадины обнаружены

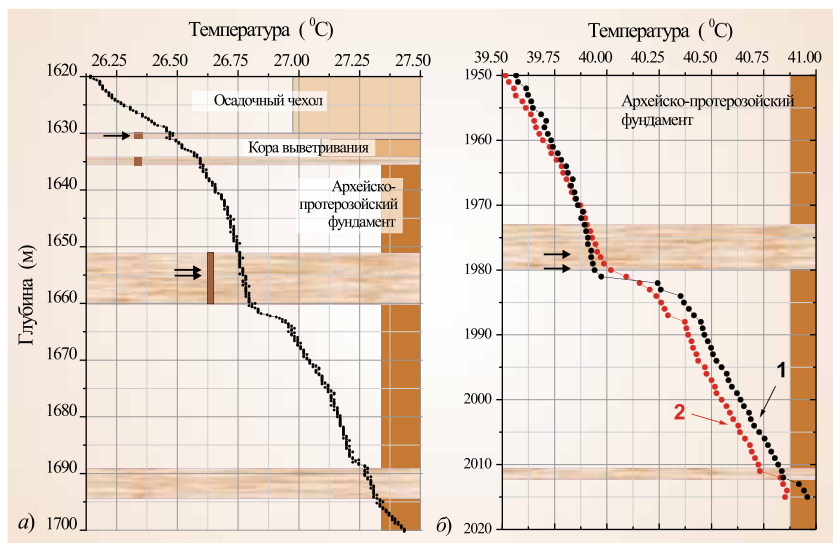


Рис. 1. Термограммы скважин: а) № 20010 Кукморская (Северо-Татарский свод, измерения в 2003 г.); б) № 966 Уратьминская (Южно-Татарский свод, измерения при восстановленном тепловом режиме: 1 – 1993 г., 2 – 1996 г.). Выделены температурные аномалии притока – проницаемые зоны, рекомендованные нами для опробования. Стрелками показаны интервалы притока жидкости.

T-аномалии в коре выветривания. Они свидетельствуют о значительной раздробленности верхней части фундамента (Рис. 2 а, б). Интересно, что в большей части изученных скважин Южно-Татарского свода: Ново-Елховской 20009, Ямашинской 2092, Миннибаевской 20000 и др., этого не наблюдалось. Там верхняя часть фундамента, судя по геотермическим данным, является монолитной (Рис. 2 в).

Очень похожие по форме и амплитуде температурные аномалии, выявленные на термограммах разных скважин, позволяют сделать вывод об одинаковом типе проницаемых зон и характере процессов, протекающих в них. Всего выделено 9 типов аномальных зон различной формы и величины. В соответствии с проведенной нами классификацией (Христофорова et al., 2000) это зоны поглощения, притока, обусловленные миграцией прогретого флюида (жидкости, насыщенной газом) с больших глубин и т.д. На рисунках приведены примеры аномалий притока в скважинах 20010 и 966 (Рис. 1); поглощения – в скв. 20010 и 20009 (Рис. 3); «газовых» – в скв. 1001 и 20009 (Рис. 5).

3. Вертикальная и горизонтальная протяженность разуплотненных зон в фундаменте

Вертикальная протяженность температурных аномалий (проницаемых зон) варьирует от десятков сантиметров до десятков метров.

Большая часть температурных аномалий представляет собой сочетание высоко- и низкоградиентных участков (Рис. 1 – 5). Разуплотненные зоны и коллектора в кристаллическом фундаменте, по нашим данным, выделяются по аномальным значениям термоградиента в интервалах: менее 0.2 – 0 °С/100м и более 4 – 5 °С/100м. Например, на рисунке 3 а показано, что в интервале глубин 2343.4 – 2357.5 м (скв. № 20010) расположена температурная аномалия, связанная с поглощающей разуплотненной зоной; в пределах этой крупной аномалии выделены зоны – коллектора: 2343.4 – 2345 м, 2346 – 2347.2 м, 2348 – 2349.2 м и др.

Самые крупные по вертикали *T*-аномалии, толщиной порядка 80 – 100 метров, соответствующие разуплотненным зонам, зафиксированы в скв. 20009. Собственно проницаемые участки в этих зонах редко превышают по толщине единицы метров, но могут достигать 20 – 30 м. Температурные аномалии, соответствующие зонам притока, имеют, как правило, небольшую толщину – десятки сантиметров. Наша аппаратура и методика измерений позволяют выделить их на фоне более крупных *T*-аномалий (Рис. 1, 2, 3). Не исключено, что притоки могут быть получены и из более узких, сантиметровых интервалов глубин, для выделения которых по термограмме чувствительности измерительной аппаратуры пока недостаточно.

В кристаллическом фундаменте, вскрытом в пределах различных структурно-тектонических элементов – Мелекесской впадины, Северо-Татарского и Южно-Татарского сводов (как на склонах, так и в сводовой части) – зафиксированы одинаковые типы аномальных зон. Выявленные температурные аномалии, интерпретируемые как разуплотненные зоны, оказались примерно одинаковыми не

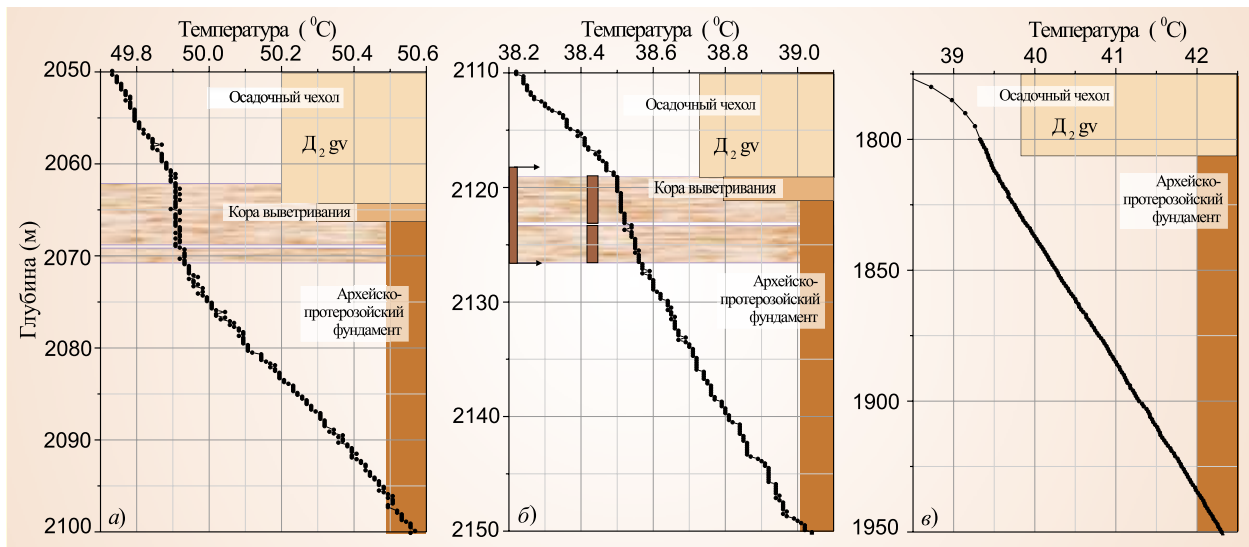


Рис. 2. Термограммы верхней части кристаллического фундамента в скважинах а) № 33 Алькеевской (Западный борт Усть-Черемшанского прогиба, Мелекесская впадина), б) № 1001 Трудюлюбовской (Вост. борт Мелекесской впадины); в) № 2092 Ямашинской (Южно-Татарский свод). Выделены температурные аномалии – проницаемые зоны, рекомендованные для опробования. После опробования интервала глубин 2118 – 2127 в скв. 1001 получен приток жидкости. В скв. 33 опробование выделенного интервала не проводилось.

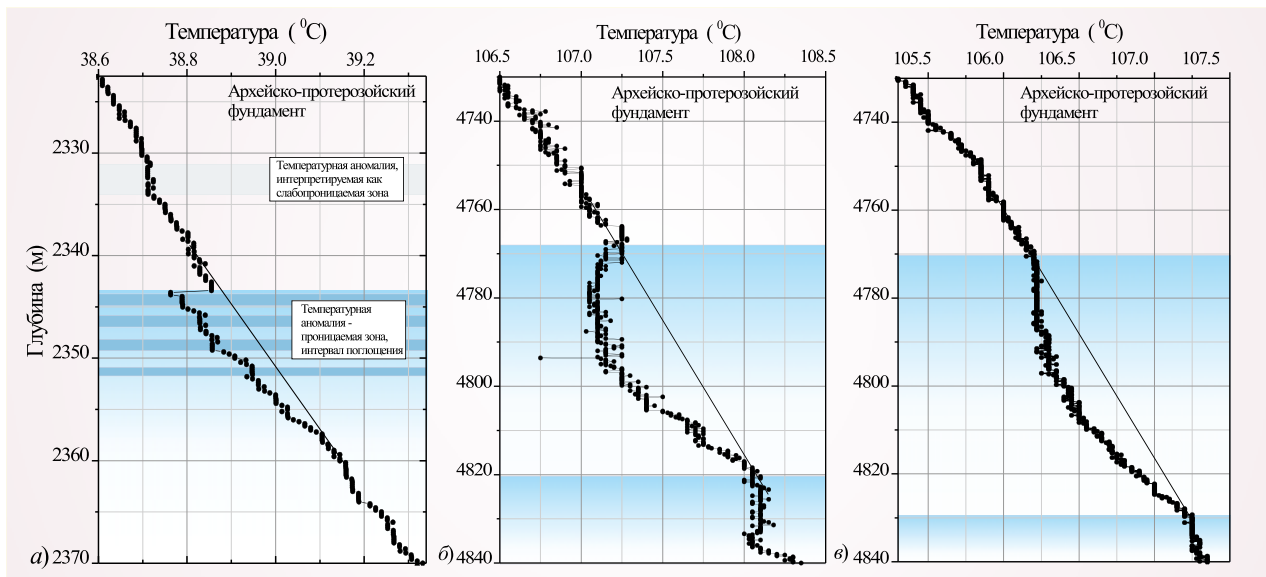


Рис. 3. Температурные аномалии, связанные с поглощающими разуплотненными зонами. Термограммы скважин а) № 20010 Кукморская (Северо-Татарский свод); б, в) № 20009 Ново-Елховская (Южно-Татарский свод, измерения в 1996 г., невосстановленный тепловой режим (б); измерения в 1999 г., восстановленный тепловой режим (в)).

только по форме, но и по толщине. Например, аномалии притока в скв. 20010 и 966 имеют примерно 10-метровый низкоградиентный и 2-х метровый высокоградиентный участки (Рис. 1). Такую же форму и протяженность по вертикали имеют некоторые аномалии в скв. 34 Алькеевской (интервал глубин 2472,5 – 2479 м), 20009 (5640 – 5654 м) и др. Все это свидетельствует о схожести процессов теплопереноса в разуплотненных зонах кристаллического основания в различных тектонических структурах.

До настоящего времени, из-за значительной удаленности исследованных скважин друг от друга, на основе анализа температурных аномалий в фундаменте можно было делать предположения лишь о вертикальной протяженности разуплотненных зон в окрестности каждой скважины. Возможность оценки горизонтальной протяженности разуплотненных зон появилась после того, как были пробурены две скважины № 33 и № 34 Алькеевской площади, расположенные на расстоянии около 24 км друг от друга. Путем сравнения аномальных участков на термограммах удалось установить, что в гранито-гнейсовом слое земной коры имеются схожие серии температурных аномалий на одинаковых глубинах.

В скважинах 33 и 34 (Рис. 4), при незначительном сдвиге по глубине (2 – 5 м) выявлены очень схожие как по температуре, так и по термоградиенту (Γ) серии аномалий. Сопоставляя эти участки термограмм, можно сделать предположение, что их происхождение связано с едиными протяженными структурными объектами. Иначе говоря, разуплотненные зоны в фундаменте могут иметь значительную горизонтальную протяженность. Корреляция аномальных зон хорошо прослеживается и по распределению термоградиентов. Толщина высоко- и низкоградиентных участков несколько варьирует от скважины к скважине. В скв. 34 высокоградиентные слои имеют толщину около 2 м, а в скв. 33 – 1,5 и 2,5 м. Эти слои можно охарактеризовать как своеобразные покрывки. Толщина низкоградиентных (проницаемых) участков варьирует от 5 – 8 м в скв. 34 до 3,5 – 5 м в скв. 33. Они разделяются на зоны с разными термоградиентами. Например, в скв. 33 нижние 2,5 м имеют очень низкий $\Gamma = 0.1^\circ\text{C}/100\text{ м}$ (Рис. 4 б).

О чем это может свидетельствовать? По-видимому, проницаемые зоны в кристаллическом фундаменте можно представить как слои раздробленных пород, которые, протягиваясь от скважины к скважине, варьируют по толщине. В данном случае толщина низкоградиентных проницаемых интервалов меняется от 2.5 до 8 м. Толщина высокоградиентных слоев, которые можно охарактеризовать как своеобразные покрывки, изменяется от 1.5 до 2.5 м.

Если обнаруженные проницаемые слои в скважинах, расположенных друг от друга на расстоянии около 24 км (Рис. 4) действительно представляют собой единые структурные объекты, то это в значительной степени подтверждает высокие перспективы нефтегазоносности кристаллического фундамента.

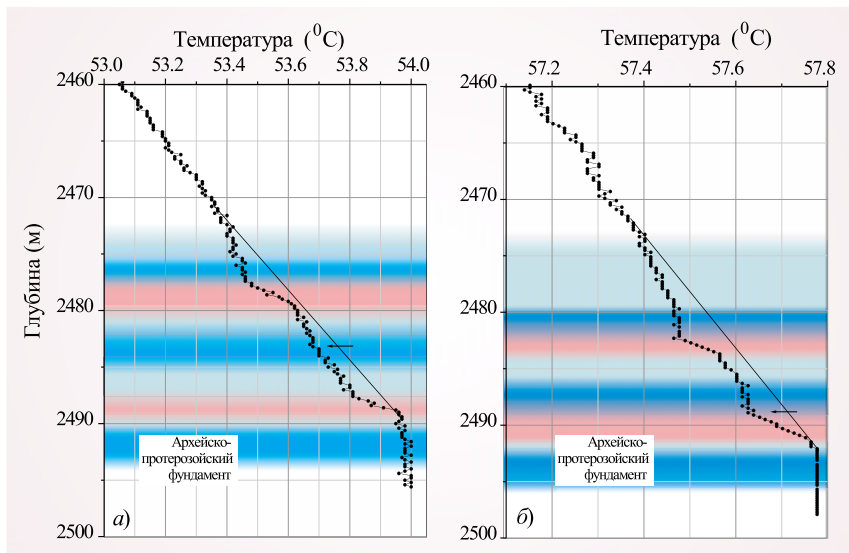


Рис. 4. Термограммы скв. № 34 и № 33 Алькеевской площади (Мелекесская впадина, Усть-Черемшанский прогиб). Схожие серии температурных аномалий в кристаллическом фундаменте могут быть интерпретированы как разуплотненные зоны значительной горизонтальной протяженности.

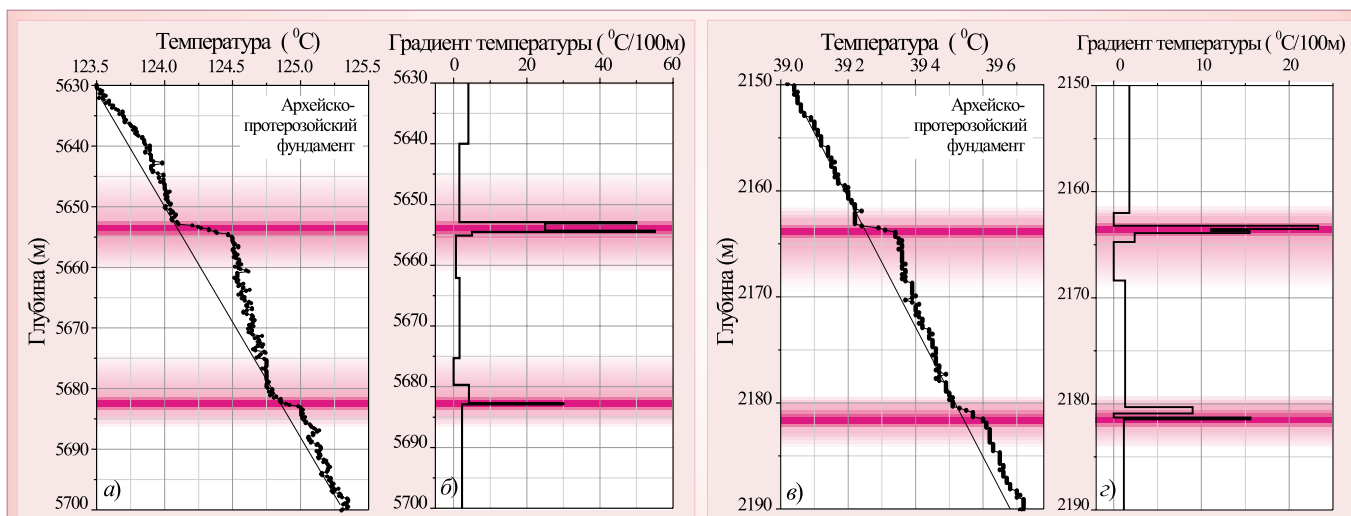


Рис. 5. Температурные аномалии, свидетельствующие о вертикальной миграции прогретого флюида (жидкости, насыщенной газом) с больших глубин и накопления его в разуплотненных зонах. Термограммы скважин: а, б) № 20009 Ново-Елховская (Южно-Татарский свод, измерения в 1999 г., восстановленный тепловой режим, спустя 3 года после бурения); в, г) № 1001 Трудюлюбовская (Мелекесская впадина, измерения в 2003 г., невосстановленный тепловой режим). Бурение в скв. № 20009 выявило сильно раздробленные породы и повышенные газопоказания в выделенных интервалах глубин (промысловые данные).

Заключение

Анализ новых экспериментальных измерений температуры в кристаллическом фундаменте опорно-параметрических скважин, пробуренных в 2002 – 2003 годах на территории Западного Татарстана, подтвердил представления о том, что гранито-гнейсовый слой земной коры не является монолитом. На термограммах архейско-протерозойского фундамента, как при невосстановленном тепловом режиме, так и при установившемся состоянии наблюдаются аномалии температур и термоградиентов. Большая часть аномалий связана с существованием проницаемых зон и может служить надежным ориентиром при поиске коллекторов в фундаменте.

Происхождение температурных аномалий в фундаменте может быть вызвано следующими причинами:

- поглощением бурового раствора из скважины в проницаемый пласт (Рис. 3);
- притоком пластовой жидкости из коллектора (Рис. 1, 2);
- миграцией газонасыщенного флюида с больших глубин и накопления его в разуплотненных зонах (Рис. 5);
- небольшими перетоками между слоями трещиноватых пород фундамента.

Интервалы глубин, в которых наблюдались крупные T, G -аномалии – разуплотненные зоны, были рекомендованы нами для опробования. Некоторые из них, выделенные как коллектора, дали небольшие притоки жидкости (Рис. 1, 2).

В кристаллическом фундаменте скважин, расположенных в пределах различных структурно-тектонических элементов, как сводов, так и впадин выделены зоны (интервалы глубин) с очень похожей формой и величиной температурных аномалий. Вероятно, происхождение этих аномалий обусловлено одинаковыми процессами, происходящими в проницаемых зонах (см. Рис. 1, 3, 5).

Впервые в кристаллическом фундаменте, вскрытом скважинами, находящимися на значительном удалении друг от друга, обнаружены очень схожие серии геотермических аномалий (Рис. 4). Эти серии аномалий интерпретированы как слои, связанные с разуплотненными зонами значительной горизонтальной протяженности. Это

означает, что в гранито-гнейсовом слое земной коры возможно обнаружение протяженных коллекторов, которые тянутся на десятки километров, и в которых могут быть найдены нефть или газ.

Литература

- Христофорова Н.Н., Христофоров А.В., Муслимов Р.Х. Разуплотненные зоны в кристаллическом фундаменте. *Георесурсы. Научно-техн. журнал.* N 1(1). Казань: Изд-во Хэтер. 1999. 4-15.
- Христофорова Н.Н., Христофоров А.В., Муслимов Р.Х. Температура и тепловой поток в гранито-гнейсовом слое земной коры. *Георесурсы. Научно-техн. журнал.* N 1(2). Казань. 2000. 2-11.
- Khristoforova N.N., Khristoforov A.V. and Muslimov R.Kh. Temperature distribution and anomalies in the crystalline basement. *Phys. Chem. Earth (A).* Vol. 25, No. 6-7. 2000. 597-604.

ТЕПЛОВЫЙ РЕЖИМ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ФУНДАМЕНТА

(на основе экспериментальных измерений температуры в глубоких и сверхглубоких скважинах)

Н.Н. Христофорова, А.В. Христофоров

В монографии излагаются результаты многолетних экспериментальных измерений температуры в глубоких и сверхглубоких скважинах. На их основе определены значения температуры, термоградиентов и тепловых потоков из недр Земли. Выявлены и классифицированы основные типы температурных аномалий и установлена их связь с наличием разуплотненных зон в фундаменте, которые представляют собой потенциальные коллектора для скопления углеводородов. Доказано существование в разуплотненных зонах процессов конвективного теплопереноса.

Казанский государственный университет, Казань, 2004, 110 с. (в печати)