

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ВОЛНЫ В ПРИРОДНЫХ СРЕДАХ: ФУРЬЕ И ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗ ТЕРМОГРАММ СКВАЖИН

В статье анализируются пространственные периодические колебания температуры, выявленные при обработке термограмм скважин методами Фурье и вейвлет-анализа. Дается общая характеристика волн. Установлено, что температурные волны присутствуют в разрезе пород вскрытых скважиной вне зависимости от сложности его строения и несут в себе информацию о разрезе.

Введение

Термометрия скважин – один из наиболее информативных методов исследования верхних слоев земной коры. На термограмме любой скважины присутствуют локальные особенности на фоне более или менее равномерного возрастания температуры с глубиной. Эти особенности несут информацию о строении разреза и процессах, происходящих в горных породах (The Earth's..., 2002).

До настоящего времени для интерпретации термограмм использовались простейшие методы обработки (сглаживание, аппроксимация и т.д.). В большинстве случаев этого оказывается достаточно для получения необходимой информации. При этом некоторые особенности термограмм остаются за пределами внимания исследователей. К таковым можно отнести пространственные колебания температуры малой амплитуды, наложенные на термограмму. Факт их существования не находит отражения в системе сложившихся научных представлений о тепловом режиме земной коры. Далее эти колебания будут обозначаться термином – *температурные волны*.

Отметим, что под температурными волнами здесь подразумеваются пространственные колебания температуры в среде. Закономерное изменение характеристик температурных волн от времени авторам пока обнаружить не удалось. Волны как бы «вморожены» в горные породы. Анализ большого массива термограмм различных скважин позволил установить некоторые закономерности, подтверждающие реальность существования волн.

1. Эксперимент и методы обработки результатов

Авторами статьи проводились геотермические исследования в скважинах, расположенных на территории Восточно-Европейской платформы и в других регионах. Более чем 300 полученных термограмм обработаны методами Фурье и вейвлет-анализа.

Исследования проводились в скважинах с установившимся тепловым режимом на нефтяных, газовых, нефтегазовых и др. месторождениях в течение 40 лет. Измерения температуры выполнены в интервале глубин от поверхности Земли до 6000 м, шаг измерений составлял от 5 м до 10 см. Техника и методика измерений изложены в работе (Христофоров и др., 2001).

Для выполнения Фурье и вейвлет-анализа, а также предварительной подготовки термограмм использовались стандартные инструменты, интегрированные в программном пакете MATLAB. В качестве базисного вейвлета при раз-

ложении использовался вейвлет Морлея.

Вейвлет-анализ – это представление сигнала в виде обобщенного ряда или интеграла Фурье по системе базисных функций, сконструированных из исходного вейвлета за счет операций сдвига и изменения масштаба по оси независимой переменной (Дьяконов, 2004).

Вейвлеты представляют собой функции в виде коротких волн (всплесков) с нулевым интегральным значением и с локализацией по оси независимой переменной. Изменение масштаба обеспечивает способность вейвлета выявить различие в характеристиках процесса на различных шкалах.

Посредством сдвига вейвлета анализируют локальные особенности процесса в различных точках на всем интервале изменения независимой переменной. В нашем случае анализируемый процесс – это изменение температуры в скважине с изменением глубины, независимая переменная – глубина.

Характер наших экспериментальных данных обуславливает необходимость предварительной подготовки термограмм для спектрального анализа. Подготовка термограмм включала следующие процедуры: интерполяция термограммы сплайном; выборка значений температуры с определенным шагом по глубине; сглаживание; устранение разрывов на концах термограммы. Этот набор процедур оптимален в смысле обеспечения надежности и воспроизводимости получаемых результатов.

2. Общая характеристика температурных волн

Фурье-анализ термограммы выявляет присутствие периодических колебаний температуры и позволяет определить амплитуды и длины волн.

На рисунке 1 показаны термограммы нескольких скважин из разных регионов России: Урало-Поволжья, Предкавказья, Прикаспийской впадины. Хорошо заметен волнообразный характер некоторых термограмм, например, скв. № 1 Западно-Языковской. На рис. 2 представлены соответствующие Фурье-спектры термограмм. Для удобства сопоставления спектров анализируются участки термограмм одинаковой длины – 1400 м. Из рис. 2 видно, что в спектре каждой скважины присутствует ряд составляющих с разными амплитудами. Модовая структура термограммы, т.е. длины волн и их амплитуды, для каждой скважины индивидуальна. Модовая структура термограммы хорошо воспроизводится только в случае анализа термограмм, измеренных повторно в одной и той же скважине.

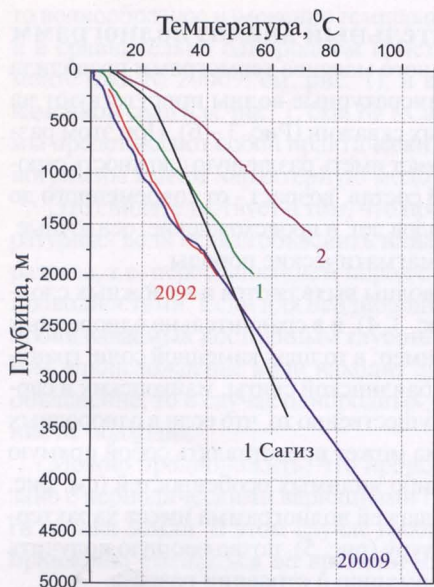


Рис. 1. Термограммы скважин: Ямаинская № 2092, Ново-Елховская 20009 (Татарстан), Западно-Языковская № 1 (Саратовская обл.), Сагиз № 1 (Прикаспийская впадина), Нагутская № 2 (Предкавказье).

В подавляющем большинстве случаев исследованные скважины вскрывают неоднородные толщи, состоящие из последовательности слоев пород разной толщины с различными теплофизическими свойствами. Такой разрез обычно характерен для осадочного чехла, и в этом случае термограммы, получаемые при измерениях температуры в скважинах, состоят из набора участков различного наклона и кривизны, характерных и уникальных только для этой скважины (Рис. 1). Однако, неоднородность разреза не является необходимым условием для выявления температурных волн. Например, термограмма скважины № 1 Сагиз (Прикаспийская впадина) представляет собой прямую линию (Рис. 1). Разрез скважины представлен однородной 3-х километровой толщиной каменной соли. Тем не менее, на волнограммах скважины № 1 Сагиз также присутствует определенный набор мод со своей структурой.

Как выяснилось в результате вейвлет-анализа термограмм, отдельные спектральные составляющие, как правило, не имеют постоянной амплитуды на протяжении вскрытого разреза. В небольших пределах может варьировать также длина волны моды. Иначе говоря, анализируемый сигнал не является стационарным, поэтому применимость Фурье-анализа термограмм весьма ограничена.

Более надежную и детальную информацию о температурных волнах можно получить на основе вейвлет-анализа термограмм. Этот метод обработки позволяет анализировать волны в трёх измерениях: температура – длина волны – глубина, и выявлять локальные особенности волн, недоступные при использовании Фурье-анализа.

На рисунке 3а представлена трёхмерная картина вейвлет-преобразования термограммы скважины № 2092 в координатах: модуль температуры ($^{\circ}\text{C}$) – длина волны (м) – глубина (м). Из рис. 3а видно, что здесь, как и в Фурье-спектре (Рис. 2), присутствуют составляющие с разными длинами волн. Срез рис. 3а по оси длин волн, например, на отметке 500 м показывает, как выглядят колебания температуры в зависимости от глубины (Рис. 3б). Далее эти зависимости будем называть волнограммами.

Так же как и сами термограммы, волнограммы хорошо воспроизводятся при повторных измерениях в одной и той же скважине. На рис. 3б показаны температурные волны, полученные из термограмм скважины № 2092, измеренных в 1990, 1996 и 2005 годах.

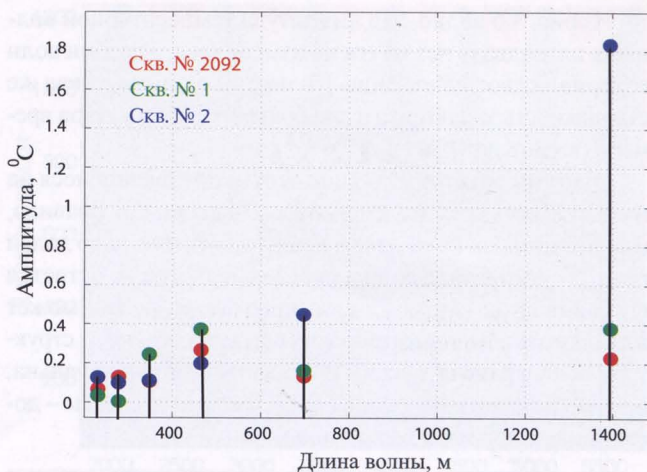


Рис. 2. Фурье-спектры термограмм скважин Ямаинская № 2092, Западно-Языковская № 1, Нагутская № 2.

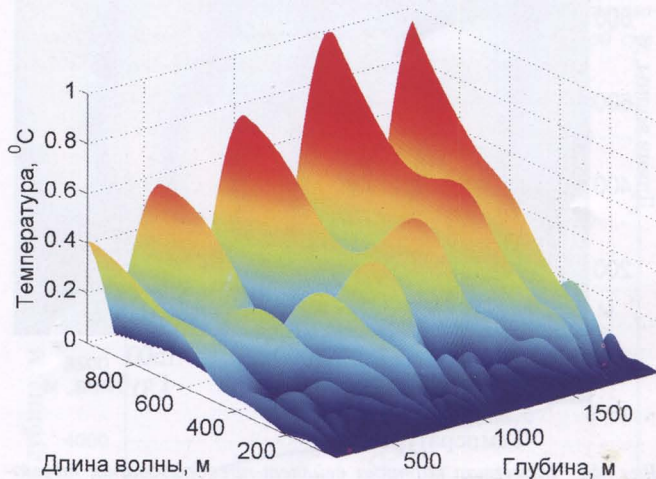


Рис. 3 а. Трёхмерная картина вейвлет-преобразования термограммы скв. № 2092 Ямаинская.

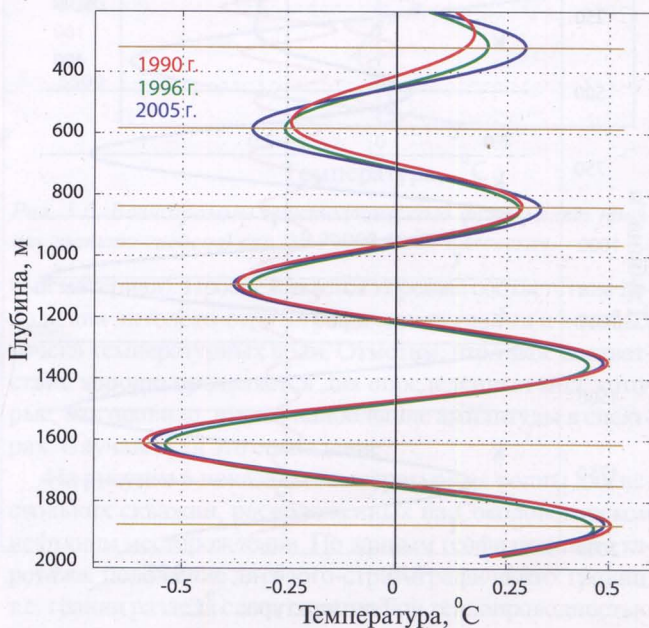


Рис. 3 б. Волнограммы скв. № 2092. Длина волн 500 м. Горизонтальные линии указывают положение основных литолого-стратиграфических границ (сверху - вниз): $P - C_3$; $C_3 - C_2$; $C_2 - C_1$; $C_1 sp - C_1 ok$; $C_1 tl - bb - C_1 t$; $C_1 t - D_3$; $D_3 fr_3 - D_3 md$; $D_3 srg - D_3 psh$; $D_3 - Ar$.

Из рис. 3 б видно, что амплитуда температурной волны за пятнадцать лет почти не изменилась, а гребни волн сохранили свое положение. По нашим данным, такая же стабильность характерна и для больших промежутков времени (вплоть до 40 лет).

Отметим некоторые общие черты, проявляющиеся на волнограммах всех исследованных скважин. Как правило, амплитуды волн находятся в пределах от единиц до долей градуса. Амплитуда волн для отдельных мод не остается постоянной на протяжении вскрытого разреза и может варьировать в довольно широких пределах. Модовая структура волнограммы для каждой скважины индивидуальна, и ее характеристики – длины волн, амплитуды, фазы – достаточно стабильны во времени.

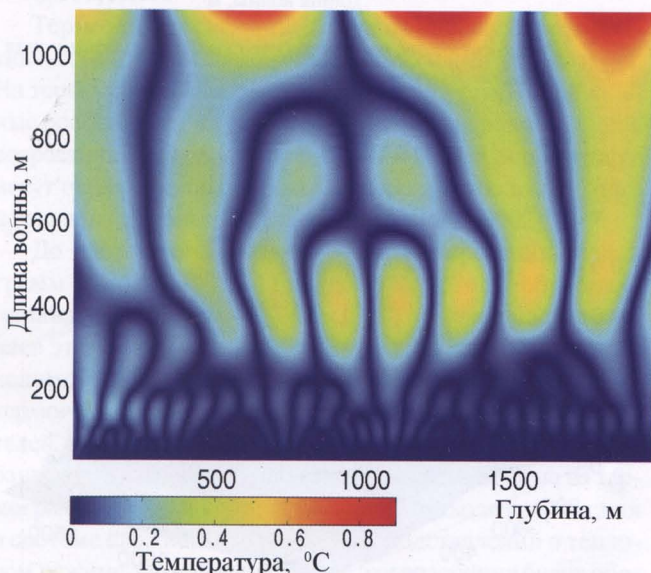


Рис. 4а. Двумерная картина вейвлет-преобразования термограммы скв. № 1 Западно-Языковская (Саратовская обл.).

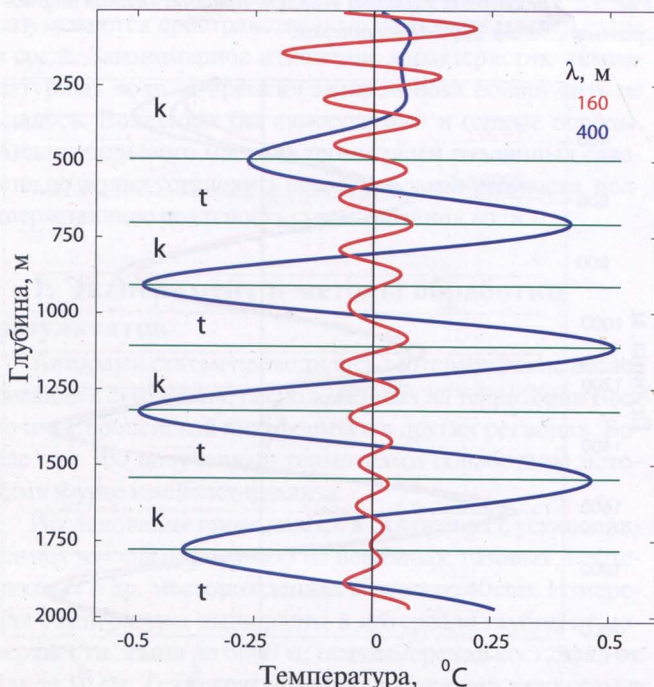


Рис. 4 б. Волнограммы скв. № 1 Зап.-Языковская. Буквами t и k показаны, соответственно, слои терригенных и карбонатных пород. Горизонтальные линии указывают положение основных литолого-стратиграфических границ (сверху - вниз): K - J; J - C₂; C₂ks - C₂vr; C₂ - C₁; C₁sp-ok - C₁tl-bb; C₁t - D₃; D₃md - D₃srg.

3. Сопоставительный анализ волнограмм

Обработка большого массива термограмм позволила установить, что температурные волны присутствуют на термограммах любых скважин (Рис. 3 – 6). При этом разрез горных пород может иметь различную сложность строения, вещественный состав, возраст - от современного до нескольких миллиардов лет, и происхождение: осадочные, метаморфические, магматические породы.

Температурные волны выявляются и в сложных слоистых структурах (Рис. 3, 4), и в сравнительно однородных толщах пород, например: в толщах каменной соли, гранито-гнейсов (Рис. 5), бавлинской свиты, майкопских и сарматских глин и т.д. Существенно то, что если в однородных толщах термограмма может представлять собой прямую линию, без каких-либо видимых особенностей (см. рис. 1), то соответствующая ей волнограмма имеет характерную модовую структуру (рис. 5), позволяющую получить более полную информацию о строении разреза.

На рис. 4 а представлена двумерная картина вейвлет-преобразования термограммы скв. № 1, т.е. проекция трехмерной вейвлет картины на плоскость глубина - длина волны. Цветовая шкала отражает модуль отклонения температуры в °С. Разрез скважины неоднородный и представляет собой последовательность слоев терригенных и карбонатных пород различной теплопроводности. На рис. 4 а отчетливо видна периодичность в изменении температуры с глубиной.

На рисунке 4 б представлены волнограммы, соответствующие срезам рис. 4 а на отметках 160 м и 400 м по оси длин волн (λ). Горизонтальными линиями на рис. 4 б обозначено положение основных литолого-стратиграфических границ в разрезе.

На рис. 4 б можно проследить некоторые закономерности, связывающие характер волнограмм и разрез горных пород. Границы, разделяющие слои терригенных (t) и карбонатных (k) пород, проходят через экстремумы моды с длиной волны 400 м, т.е. разделяют нарастающие и спадающие участки волны. Этот факт достаточно очевиден и объясняется чередованием слоев с большей (карбонатные породы) и меньшей (терригенные породы) теплопроводностью. То же самое характерно для других скважин, вскрывших такой же геологический разрез.

Нами установлено, что на волнограммах между литолого-стратиграфическими границами, как правило, укладывается целое число полуволн. Такая особенность характерна для большей части исследованных скважин. В разрезе скв. № 1 (Рис. 4 б) наблюдается довольно редкий случай, когда толщина чередующихся терригенных и карбонатных пород приблизительно одинакова. Соответственно, между обозначенными на рис. 4 б стратиграфическими границами укладывается ровно одна полуволна, а длина волны (λ = 400 м) на протяжении разреза постоянна.

На рис. 5 а показана двумерная картина вейвлет-преобразования термограммы для скв. № 20009 Ново-Елховская (см. рис. 1) в кристаллическом фундаменте, представляющем собой сравнительно однородную толщу гранито-гнейсов толщиной около 4000 м. На волнограммах скважины (рис. 5 б), также как и на рис. 3 а и 4 а, хорошо видна периодичность в изменении температуры с глубиной.

Сопоставляя рис. 4 б и 5 б можно видеть, что как в неоднородном осадочном чехле (скв. № 1), где имеет мес-

то волнообразное изменение температуры с глубиной, так и в сравнительно однородном кристаллическом фундаменте (скв. № 20009, см. рис. 1), и в однородной толще каменной соли (см. рис. 1, скв. № 1 Сагиз), где термограммы представляют собой практически прямые линии, волнограммы имеют характерную модовую структуру.

Это свидетельствует о том, что происхождение температурных волн нельзя объяснить только неоднородностью разреза, т.е. переслаиванием пород с различными теплопроводностями. Если для неоднородных слоистых толщ, пронизываемых постоянным глубинным тепловым потоком, происхождение волн находит достаточно разумное объяснение, то в случае однородных толщ такое объяснение не подходит.

Можно предположить, что происхождение волн связано с периодическими вариациями глубинного теплового потока Земли. В этом случае гребни волн должны направленно смещаться во времени. Величина смещения определяется скоростью распространения температурных волн в среде.

Проведём оценку скорости распространения волн при допущении, что разрез пород однородный. Для этого используем известное выражение для скорости распространения температурной волны в однородном стержне (Лыков, Михайлов, 1963):

$$v = 4\pi\chi/\lambda.$$

Здесь χ – температуропроводность среды, λ – длина волны. Согласно (Липаев и др., 2003) значения температуропроводности горных пород лежат в диапазоне от $5 \cdot 10^{-7}$ до $25 \cdot 10^{-7}$ м²/с. Отсюда получаем, что за 15 лет можно ожидать смещения волны длиной 400 м на расстояние от 5 до 35 м. Эти оценки находятся в согласии с тем, что мы получили экспериментально при повторных измерениях в одних и тех же скважинах. Смещение волнограмм в течении 15 лет (см. рис. 3 б) не превышает 5 - 10 м.

Из приведенной оценки следует, что в вопросе о происхождении температурных волн нельзя исключить возможное влияние временных вариаций глубинного теплового потока Земли.

Стабильность пространственного положения температурных волн позволяет предположить, что их характеристики несут в себе информацию о строении разреза. Проследим, какую информацию о разрезе может содержать, например, фаза волн.

4. Связь фазы температурных волн со строением разреза

Анализ большого массива термограмм разных скважин позволил установить, что почти повсеместно положение экстремумов и точек перегиба на температурных волнах («особые точки») связано с положением границ между слоями в разрезе. Это могут быть границы пород с различной теплопроводностью, литолого-фациальные или стратиграфические границы. Иначе говоря, определенное значение фазы колебаний «привязано» к определенной глубине или границе, разделяющей слои горных пород.

На волнограммах рисунков 3 б и 4 б горизонтальными линиями отмечено положение литолого-стратиграфических границ, определенных путем анализа кернового материала и другими геофизическими методами (промысло-

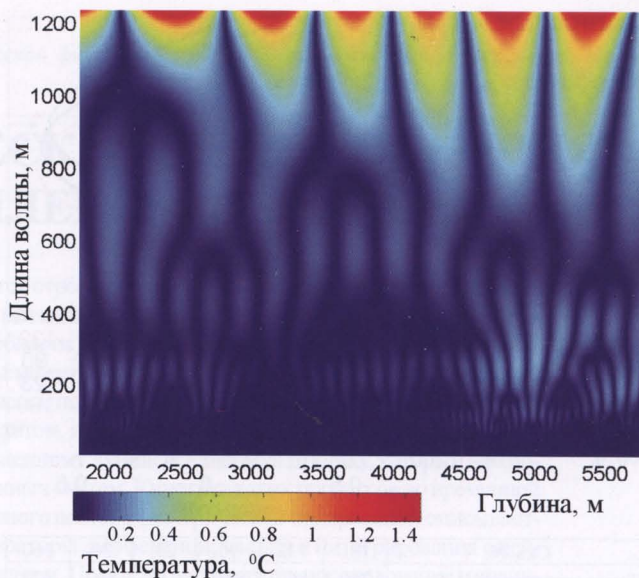


Рис. 5а. Двумерная картина вейвлет-преобразования термограммы кристаллического фундамента в сверхглубокой скв. № 20009 Ново-Елховская.

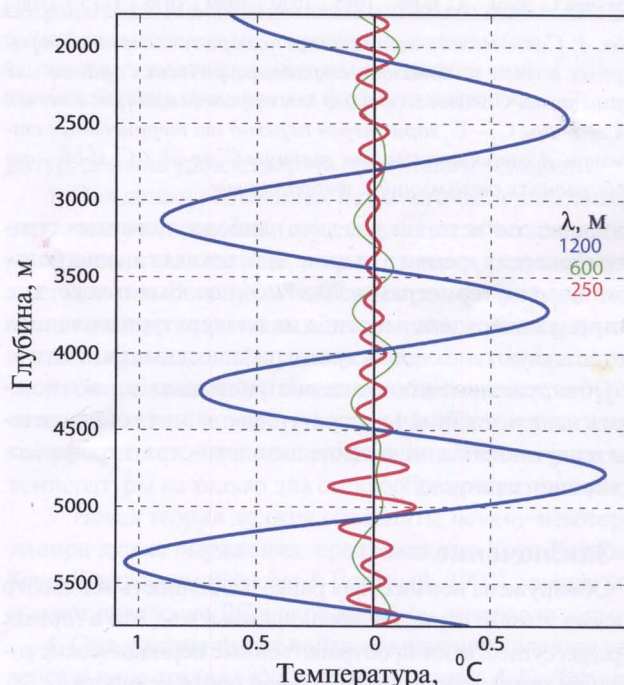
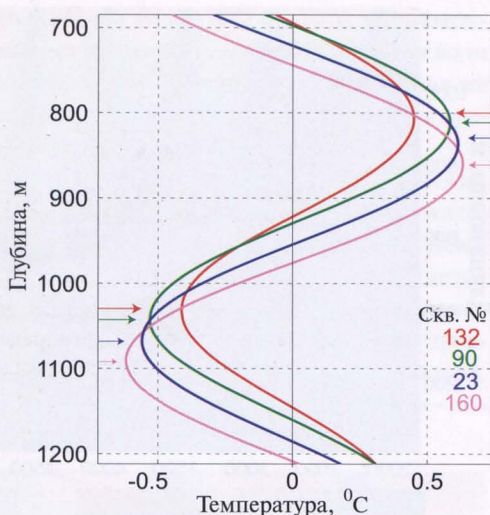


Рис. 5 б. Волнограммы кристаллического фундамента (толща гранито-гнейсов) скв. № 20009 Ново-Елховская.

вый материал). Прослеживается хорошее соответствие положения литолого-стратиграфических границ и «особых точек» температурных волн. Отметим, что такое соответствие хорошо проявляется для определенных мод, которые, как правило, имеют наибольшие амплитуды в спектрах. Случайно ли это совпадение?

На рисунке 6 показаны температурные волны для нескольких скважин, расположенных на Соколовгорском нефтяном месторождении. По данным геофизического каротажа, положение литолого-стратиграфических границ, т.е. границ раздела слоев с различной теплопроводностью для этих скважин несколько смещается по глубине и обозначено на рис. 6 стрелками. Как видно из рисунка 6, соответственно смещается по глубине положение точек перегиба на температурных волнах. Для наглядности, в таблице 1 приведены числовые данные, иллюстрирующие

Рис. 6.
Волнограммы скважин Соколовогорского месторождения (Урало-Поволжье). Длина волны 500 м.



Скв. №	181	132	90	23	30	160
Точка экстремума	750	800	810	835	840	870
Граница C ₂ – C ₁	745	800	810	840	840	870
Точка экстремума	1045	1030	1045	1070	1115	1090
Граница C ₁ sp-ok – C ₁ tl-bb	1045	1030	1050	1075	1115	1100

Табл. 1. Связь между положением экстремумов на температурных волнах и литолого-стратиграфическими границами в термограммах Соколовогорского месторождения (см. Рис. 6). Для границы C₂ – C₁ характерен переход от терригенных отложений к карбонатным, для границы C₁ sp-ok – C₁ tl-bb – от карбонатных отложений к терригенным.

указанное соответствие для двух наиболее значимых стратиграфических границ в разрезе. Как показал анализ большого массива термограмм, 70 – 80 % «особых точек», т.е., экстремумов и точек перегиба на температурных волнах соответствуют литолого-стратиграфическим границам.

Обнаруженное соответствие указывает на возможность использования температурных волн для определения или уточнения положения литолого-стратиграфических границ в разрезе.

Заключение

Обнаружена неизвестная ранее особенность теплового режима земной коры, заключающаяся в том, что в горных породах существуют пространственные периодические колебания температуры вертикальной протяженности.

Измерения распределения температуры в скважинах и обработка термограмм методами Фурье и вейвлет-анализа позволили выявить следующие основные закономерности в поведении температурных волн в природных средах:

1. Температурные волны присутствуют на термограммах любых скважин, независимо от сложности вскрытого разреза (однородный, слоистый и т.д.);
2. Амплитуда волны, как правило, не остается постоянной с глубиной.
3. Модовая структура термограммы (длины волн, их амплитуды и фазы) для каждой скважины является индивидуальной и несет в себе информацию о разрезе;
4. Определенная фаза температурной волны, как правило, «привязана» к определенной границе между слоями в многослойных разрезах;

Обнаруженные закономерности позволяют сделать вывод, что пространственные температурные волны могут быть использованы для изучения природных сред. Например, для выявления источников и стоков тепла в горных

породах, определения границ раздела сред с различной теплопроводностью, выявления геологических структур и определения их границ, уточнения литолого – стратиграфического разреза горных пород, а также при поисках, разведке и разработке полезных ископаемых.

Вопрос о происхождении пространственных температурных волн пока остается открытым, также как и вопрос о том, можно ли моделировать волны такого рода в лабораторных условиях. Тем не менее, факт их существования в естественных, природных средах можно считать установленным. Температурные волны являются новым «инструментом» исследования строения и свойств природных сред и, в частности, земной коры. В свою очередь, разрез горных пород, вскрытый скважиной, представляет весьма подходящий объект для исследований свойств температурных волн.

Литература

Дьяконов В.П. Вейвлеты, от теории к практике. М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2004.
 Липаев А.А., Хисамов Р.С., Чугунов В.А. Теплофизика горных пород нефтяных месторождений. Москва. Недра. 2003.
 Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория тепло- и массопереноса. Москва. Госэнергоиздат. 1963.
 Khristoforov A.V., Khristoforova N.N., Burganov B.T. Temperature waves in the rocks: Wavelet analysis of the boreholes' temperature distributions. Geophysical Research Abstracts. General Assembly. European Geosciences Union. Vienna, 24-29 April, 2005.
 Khristoforov A.V., Kuvshinov Yu.A. Equipment and Experimental Technique for Temperature Measurements in Boreholes. Georesources (Int. Journal of Science). Kazan, N 1(4). 2001. 10-11.
 The Earth's Thermal Field and Related Research Methods. Proceed. of Int. Conf. Moscow, 2002.

Анатолий Владиславович Христофоров

Доцент кафедры радиоэлектроники Казанского государственного университета, кандидат физико-математических наук. Область научных интересов – радиофизика и электроника, радиофизические методы исследования природных сред.



Наталья Николаевна Христофорова

Вед. научный сотрудник кафедры радиоэлектроники КГУ, доктор г.-м. н., главный редактор журнала «Георесурсы». Область научных интересов – тепловое поле Земли, физика природных катастроф, поиски и разведка залежей углеводородов.



Булат Талгатович Бурганов

Студент Московского Физико-Технического Института. Область научных интересов – математические методы в физике, радиофизика.

