НАУКИ О ЗЕМЛЕ: Сырьевая база и геологоразведка

Е.Ю. Попов Сколтех<sup>1</sup> старший инженер е.popov@skoltech.ru E.M. Чехонин Сколтех<sup>1</sup> старший научный сотрудник e.chekhonin@skoltech.ru Ю.А. Попов д-р физ.-мат. наук Сколтех<sup>1</sup> профессор у.popov@skoltech.ru

553.982.2

P.A. Ромушкевич Сколтех<sup>1</sup> научный сотрудник r.romushkevich@skoltech.ru A.B. Габова Сколтех<sup>1</sup> аспирант anastasia.gabova@skolkovotech.ru В.В. Жуков ООО Газпромнефть НТЦ<sup>2</sup> начальник управления проектов нетрадиционных запасов Zhukov.VV@gazpromneft-ntc.ru

# Новый подход к изучению баженовской свиты на основе теплофизического профилирования керна

В работе также принимали участие **М.Ю. Спасенных**, **Н.Н. Богданович**, **Е.В. Козлова** (Сколковский институт науки и технологий<sup>1</sup>), **И.А. Карпов**, **Д.Е. Заграновская**, **А.Д. Алексеев**, **И.Ю. Беленькая**, **Ю.В. Овчаренко** (ООО Газпромнефть HTЦ<sup>2</sup>), **Г.А. Калмыков** (МГУ им. М.В. Ломоносова<sup>3</sup>).

<sup>1</sup>Сколковский институт науки и технологий. Россия, 143026, Москва, ул. Нобеля, 3 (территория Инновационного Центра «Сколково»).
<sup>2</sup>Россия, 190000, Санкт–Петербург, наб. реки Мойки, 75–79, литер Д.
<sup>3</sup>Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, Геологический факультет.

Описываются результаты применения нового метода – теплофизического каротажа на керне – для изучения 11 месторождений углеводородов, расположенных в отложениях баженовской свиты. Для более 13000 образцов полноразмерного керна из 17 скважин при помощи нового метода проведено непрерывное неразрушающее бесконтактное профилирование теплопроводности и объемной теплоемкости пород с пространственной разрешающей способностью 1–2 мм, оценкой коэффициента тепловой анизотропии и степени неоднородности пород, что позволило получить уникальную по представительности информацию для бассейнового и гидродинамического моделирования. Показано, что разработанные для исследований пород баженовской свиты специальные подходы позволяют преобразовывать результаты теплофизического каротажа на керне в непрерывные высокодетальные профили распределения общего содержания органического вещества, скоростей упругих волн, модуля Юнга, коэффициента Пуассона, коэффициента акустической анизотропии, плотности, естественной радиоактивности вдоль скважин

Ключевые слова: теплофизический каротаж на керне; баженовская свита; преобразование тепловых свойств в другие свойства

оделирование осадочных бассейнов и нефтегазоносных систем требует представительных данных о тепловых свойствах пород (теплопроводность, температуропроводность,

объемная или удельная теплоемкость) [1]. Информация о тепловых свойствах резервуаров необходима также при гидродинамическом моделировании процессов добычи с тепловым воздействием на пласт, интерпретации данных термометрии в скважинах, других случаях моделирования процессов тепломассопереноса в недрах [2].

Серьезные проблемы при получении представительных исходных данных о тепловых свойствах пород связаны с тем, что для измерений традиционно использовалась аппаратурно-методическая база, разработанная для изучения свойств промышленных материалов, в большинстве своем однородных и изотропных, и не адаптированная для исследований пород, характеризующихся, как правило, существенной неоднородностью, анизотропией, по-

Тепловые свойства относятся к числу базовых физических свойств пород, и расширение сферы их применения при исследованиях месторождений углеводородов имеет хороший потенциал для повышения эффективности петрофизических работ на стадиях поиска, разведки и разработки месторождений

> ристостью, трещиноватостью, необходимостью проведения массовых измерений на полноразмерном и стандартном керне [3]. Вместе с тем, тепловые свойства относятся к числу базовых физических свойств пород, и расширение сферы их применения при исследованиях месторождений углеводородов имеет хороший потенциал для повышения эффективности петрофизических работ на стадиях поиска, разведки и разработки месторождений [4–6].

> Создание существенно более совершенной аппаратурно-методической базы, основанной на методе оптического сканирования, впервые обеспечило неразрушающие, бесконтактные измерения комплекса тепловых свойств пород с учетом их анизотропии

и неоднородности и профилирование тепловых свойств на полноразмерном и стандартном керне [7]. Особенно широкие возможности применения метода оптического сканирования открываются для исследований пород баженовской свиты, поскольку, как показано ниже, теплофизическое профилирование на керне предоставляет возможности для непрерывного профилирования других свойств, включая общее содержание органического вещества, скорости упругих волн, естественную радиоактивность, плотность.

#### Методика теплофизических исследований

Нами применялось непрерывное бесконтактное неразрушающее профилирование теплопроводности и объемной теплоемкости с определением коэффициента тепловой анизотропии и коэффициента тепловой неоднородности пород [7] вдоль всего полноразмерного керна, отобранного при бурении скважин в баженовской свите. Всего в течение 2014–2016 гг. данным методом было изучено более 13 000 образцов полноразмерного керна из 17 скважин, пробуренных на 11 месторождениях Западной Сибири.

В результате теплофизического профилирования вдоль поверхности каждого распиленного образца полноразмерного керна получали следующие данные [7]:

 профили главных значений тензора теплопроводности вдоль слоистости λ<sub>||</sub> и поперек слоистости λ<sub>⊥</sub> с пространственной разрешающей способностью 1–2 мм;

– профиль объемной теплоемкости;

– коэффициенты тепловой неоднородности  $\beta_{\parallel}$  и  $\beta_{\perp}$ , характеризующие степень неоднородности образца, связанную со структурнотекстурными особенностями пород, и определяемые при профилировании вдоль и поперек слоистости по формуле  $\beta = (\lambda_{\text{макс}} - \lambda_{\text{мин}}) / \lambda_{\text{сред}}$ , где  $\lambda_{\text{мин}}$  и  $\lambda_{\text{макс}}$  – соответственно, минимальная и максимальная в пределах образца теплопроводность,  $\lambda_{\text{сред}}$  – средняя теплопроводность образца;

 – коэффициент тепловой анизотропии определяемой как соотношение λ<sub>µ</sub>/λ<sub>1</sub>.

Производительность измерений в кернохранилищах составляла до 40 погонных метров керна за рабочую смену.

При измерениях на распиленном керне после сканирования вдоль оси керна для учета анизотропии проводили дополнительное сканирование поперек оси керна. При профилировании на цилиндрическом полноразмерном керне непрерывное сканирование осу-



#### Рис. 1.

Результаты теплофизического профилирования на керне одной из скважин. Данные измерений для каждого образца керна усреднены в скользящем прямоугольном окне. Синим и красным цветом на крайней левой диаграмме показаны данные для теплопроводности, соответственно, вдоль и поперек слоистости. Для коэффициента тепловой неоднородности темно-синим и розовым цветом на крайней правой диаграмме показаны результаты профилирования, соответственно, поперек и вдоль слоистости (вдоль и поперек оси керна)

ществляли на цилиндрической поверхности образцов, для получения данных об анизотропии процедуру дополняли сканированием на торцах каждого образца керна.

Предпочтительным являлось проведение теплофизического профилирования на керне по возможности сразу после его распиловки, что обеспечивало максимальную приближенность керна к природному флюидонасыщению.

## Результаты теплофизического профилирования на керне

На *рис.* **1** в качестве примера приведены результаты теплофизического профилирования на керне для одной из скважин. Для интервала отбора керна (баженовская свита, перекрывающие и подстилающие породы) протяженностью 94,5 м изучены все 1067 образцов керна.

Данные на **рис. 1** показывают следующее: – оба главных значения тензора теплопроводности (вдоль и поперек слоистости), объемная теплоемкость, коэффициенты тепловой анизотропии и тепловой неоднородности отличаются ярко выраженной зональностью вдоль скважины, что свидетельствует о хороших перспективах использования комплекса тепловых свойств для расчленения разреза и анализа неоднородности толщи;

 изучавшиеся породы характеризуются существенным коэффициентом тепловой анизотропии – в большинстве в диапазоне значений 1,2–2,5;

– большинство образцов пород существенно неоднородны: коэффициент тепловой неоднородности при сканировании поперек слоистости (т.е. вдоль оси керна) составляет для большинства образцов 0,05–0,5, при этом степень неоднородности при сканировании поперек слоистости существенно выше, чем при сканировании вдоль слоистости.

Согласно **рис.** 1, неоднородность пород характеризуется существенными высокоча-



#### Рис. 2.

Результаты определения общего содержания органического вещества методами теплофизического профилирования на керне (голубые точки) и пиролиза (красные точки)

стотными вариациями даже в малых интервалах глубин, вплоть до масштаба в несколько сантиметров, о чем свидетельствуют как вариации средних значений теплопроводности и объемной теплоемкости на **puc. 1**, так и существенные значения коэффициента тепловой неоднородности, зарегистрированного при сканировании поперек слоистости (вдоль скважины). Это говорит о том, что непрерывная регистрация вариаций теплопроводности на всем полноразмерном керне при обеспечиваемой пространственной разрешающей способности 1–2 мм (в зависимости от величины теплопроводности) является перспективной для характеристики и расчленения маломощных перспективных геологических объектов, какими являются отложения баженовской свиты.

#### Взаимосвязь между теплопроводностью и другими свойствами пород баженовской свиты

По данным измерений диапазон теплопроводности минеральной матрицы пород баженовской свиты можно оценить в 2,2...2,8 Вт/(м×К). По результатам наших



#### Рис. 3.

Поле корреляции между теплопроводностью λ<sub>µ</sub>, измерявшейся при теплофизическом профилировании на керне, и естественной радиоактивностью, определявшейся путем гамма-каротажа

оценок теплопроводность органического вещества в данных породах находится в пределах значений 0,1...0,2 Вт/(м×К), т.е. контраст теплопроводности минеральной матрицы и органического вещества составляет не менее, чем 10-15 раз. Это создало предпосылки для разработки методики оценки общего содержания органического вещества по результатам теплофизического профилирования на керне [8]. На рис. 2 для одной из изученных скважин приведено распределение общего содержания органического вещества Сорг, полученное как по результатам регистрации непрерывного распределения теплопроводности  $\lambda_{\parallel}$  в процессе теплофизического профилирования, так и по результатам пиролиза при помощи прибора *HAWK*. Данные на *рис. 2* показывают достаточно хорошее совпадение вертикальных вариаций и средних интервальных значений Сол вдоль скважины по результатам измерений обоими методами.

Следует учитывать, что отношение объема образца керна, который определяет результат измерений теплопроводности методом оптического сканирования, а следовательно, и результат определения  $C_{opc}$  (~ 35–40 см<sup>3</sup> при длине образца керна 10 см), к объему образца породы, используемого для измерений  $C_{opc}$ , при помощи пиролиза (около 0,25 см<sup>3</sup>), составляет

примерно 150:1. Это означает, что коэффициент тепловой неоднородности пород баженовской свиты, составляющий в среднем около 0,2, но достигающий часто и 0,3-0,4 (что следует из рис. 1), обусловливает существенное влияние неоднородности пород на результаты оценок Сорг методом пиролиза, что неизбежно должно приводить к существенным различиям результатов определения С<sub>ора</sub> методами пиролиза и теплофизического профилирования на керне. С учетом того, что при теплофизическом профилировании исследуются все образцы керна, численно, как правило, в несколько раз превосходящие пробы для пиролиза, все это свидетельствует о значительно более высокой представительности оценок Сорг по результатам теплофизического профилирования на керне.

Для пород баженовской свиты установлена тесная связь между теплопроводностью и результатами определения естественной радиоактивности, получаемыми при гаммакаротаже и гамма-спектрометрии на керне. Связь между теплопроводностью и естественной радиоактивностью пород является опосредованной, т.к. известна связь между естественной радиоактивностью и общим содержанием органического вещества [9], которое в свою очередь, как показано выше, серьезно влияет на теплопроводность пород



#### Рис. 4.

Примеры возможностей использования результатов теплофизического профилирования на керне для прогноза плотности пород (a) и акустической анизотропии (б). Плотность пород определялась путем гамма-гамма плотностного каротажа. Результаты теплофизического профилирования на керне по определениям коэффициента тепловой анизотропии и теплопроводности усреднены при помощи скользящего прямоугольного фильтра

баженовской свиты. Поле корреляции на **рис. 3** между теплопроводностью  $\lambda_{\parallel}$  и естественной радиоактивностью, определенной при гамма-каротаже, объединяет экспериментальные данные для трех скважин одного месторождения и свидетельствует как об однородности выборки, так и о том, что приведенное уравнение регрессии является универсальным для всех изучавшихся скважин. Установлено, что данное уравнение регрессии является общим для нескольких месторождения для нескольких месторождений баженовской свиты. В отдельных интервалах глубин взаимосвязь между теплопроводностью и естественной радиоактивностью может нарушаться, при этом в таких интервалах свять.

лах сохраняется тесная устойчивая связь теплопроводности с  $C_{opp}$ . Показано, что в таких интервалах гамма-каротаж не может удовлетворительно обеспечивать оценку  $C_{opp}$ . Таким образом, анализ степени взаимосвязи между теплопроводностью и результатами гамма-каротажа дает возможность контролировать надежность применимости гамма-каротажа для определения  $C_{opp}$  и выделять интервалы глубин, для которых применение гамма-каротажа для этой цели нецелесообразно.

Данные на **рис.** 4*а* показывают хорошее совпадение характера вертикальных вариаций теплопроводности  $\lambda_{\parallel}$  и плотности пород, зарегистрированной при плотностном гамма-



## Рис. 5.

параметрах пород. Линиями черного цвета показаны данные, полученные путем акустического каротажа, цветными линиями – прогноз геомеханических параметров Примеры возможностей использования результатов теплофизического профилирования на керне (**рис. 1**) для повышения качества данных о геомеханических по измеренным на керне главным значениям тензора теплопроводности на интервале глубин залегания баженовской свиты гамма каротаже. Причина тесного соответствия заключается в определяющем влиянии содержания органического вещества на плотность пород, т.к. плотность органического вещества более чем вдвое меньше плотности минеральной матрицы.

Установлено, что результаты теплофизического профилирования на керне позволяют охарактеризовать анизотропию пород (рис. 46) в тех интервалах глубин бурения, где провести оценку акустической анизотропии не представляется возможным из-за технологических ограничений (сильные размывы ствола скважины, интервалы с меняющимися свойствами бурового раствора и др., например, интервал глубин ниже ху02 м на рис. 4). При отсутствии полноразмерного керна оценку степени тепловой анизотропии и ее вертикальных вариаций вдоль скважины можно осуществлять при помощи измерений теплопроводности методом оптического сканирования на обломках керна в зонах дробления и крупных частицах шлама [7].

Известно, что данные об анизотропии, скоростях продольных и поперечных волн позволяют получать количественную характеристику упругих модулей, коллекторских свойств и насыщения продуктивных пластов путем сейсмической инверсии. Однако проведение геомеханических измерений на керне приводит к разрушению образцов керна и затратно по времени, т.к. из-за анизотропии пород обычно необходимо выпиливать из керна образцы в нескольких направлениях. Анализ результатов измерений при этом существенно осложняется серьезными трудностями при разделении эффектов неоднородности и анизотропии. Оценку анизотропии и скоростей поперечных волн с помощью акустического каротажа делают нечасто, при этом вертикальное пространственное разрешение каротажа ограничено длиной цепочки ресиверов, а интерпретация данных акустического каротажа не всегда и не везде возможна. Обработка и анализ результатов акустического каротажа совместно с данными теплофизического профилирования открывают реальные перспективы для повышения качества данных об анизотропии и о геомеханических параметрах пород баженовской свиты. Нами установлены согласованные вариации компонент тензора теплопроводности пород и скоростей упругих волн. Выявленные корреляционные зависимости для скорости продольной  $V_p = f(\lambda_1, \lambda_1)$ и поперечной  $V_s = g(\lambda_1, \lambda_1)$  волн позволяют прогнозировать вариации по разрезу скоростей упругих волн, рассчитать динамический коэффициент v Пуассона и, используя дополнительно корреляцию с плотностью р, рассчитать динамический модуль *E* Юнга:

$$v^{dyw} = \frac{\left(V_P^2 - 2V_S^2\right)}{2\left(V_P^2 - V_S^2\right)} \quad E^{dyw} = \rho V_S^2 \frac{\left(3V_P^2 - 4V_S^2\right)}{\left(V_P^2 - V_S^2\right)} \quad (1)$$

Более того, установлены согласованные вариации тепловой анизотропии и анизотропии модуля Юнга, а также согласованные вариации тепловой анизотропии и параметра  $\gamma$  Томсена, характеризующего относительную разницу скоростей поперечной волны в вертикальном ( $V_{44}$ ) и горизонтальном ( $V_{66}$ ) направлении и широко распространенного в индустрии [10]:

$$\gamma = \frac{C_{66} - C_{44}}{2C_{44}}, \qquad C_{ij} = \rho \cdot V_{ij}^2 \ ^{(2)}$$

где  $C_{66}$  и  $C_{44}$  – модули жесткости.

На рис. 5 показаны как данные акустического и плотностного гамма-гамма каротажа (упругие скорости, плотность, модуль Юнга, коэффициент Пуассона, коэффициент анизотропии модуля Юнга и параметр у Томсена), так и результаты сделанного нами прогноза этих параметров по измеренным на керне главным значениям тензора теплопроводности с использованием выявленных корреляционных зависимостей между скоростями упругих волн и главными значениями тензора теплопроводности. Успешное сопоставление прогнозных величин и результатов анализа данных каротажа, выполненное на нескольких скважинах разных месторождений, говорит об универсальности выявленных зависимостей для разреза баженовской свиты. Необходимо отметить, что на *рис. 5* результаты прогноза приведены на масштабе керна (~10 см), в то время как элемент пространственного разрешения для прибора акустического каротажа приблизительно на порядок больше, чем для прибора оптического сканирования.

Таким образом, данные на рис. 5 показывают, что проведение непрерывного теплофизического профилирования на керне способно повысить качество данных о геомеханических параметрах пород баженовской свиты путем улучшения вертикального пространственного разрешения, прогноза в скважинах, где акустический каротаж не проводился (но имеется керн), и прогноза в тех интервалах глубин, где не представляется возможным (отсутствуют данные каротажа или их невозможно однозначно интерпретировать) провести оценку геомеханических параметров по данным акустического каротажа.

#### Выводы

1. Регистрируемые при непрерывном теплофизическом профилировании на керне главные значения тензора теплопроводности (вдоль и поперек слоистости), объемная теплоемкость, коэффициент тепловой анизотропии, коэффициент тепловой неоднородности характеризуются ярко выраженной зональностью вдоль скважин, пробуренных в баженовской свите, что свидетельствует о целесообразности их использования для расчленения разреза и анализа неоднородности толщи.

2. Вариации содержания органического вещества в породах баженовской свиты определяют взаимосвязь целого комплекса физических свойств этих пород, включая теплопроводность, скорости упругих волн, плотность, естественную радиоактивность.

3. Установленные взаимосвязи открывает достаточно богатые возможности для повышения качества исследований перечисленных свойств баженовской свиты, включая общее содержание органического вещества, путем широкого применения новой технологии теплофизического профилирования на керне.

4. Важные преимущества применения технологии теплофизического профилирования для получения данных об анизотропии, геохимических, геомеханических и других свойствах пород, рассмотренных в данной работе, заключаются в следующем:

 обеспечивается неразрушающий бесконтактный характер измерений на полноразмерном керне;

 достигается получение непрерывных профилей геохимических, геомеханических и других свойств пород с высоким пространственным разрешением по установленным их связям с теплопроводностью;

 технология характеризуется простотой и высокой производительностью теплофизического профилирования на керне.

5. Высокая пространственная разрешающая способность теплофизического профилирования обусловливает особенно благоприятные перспективы применения данной технологии для характеристики и расчленения маломощных перспективных геологических объектов, какими являются отложения баженовской свиты.

#### Литература

1. Hantschel Th., Kauerauf A. 2009. Fundamentals of Basin and Petroleum Systems Modeling. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 476 p.

2. Beardsmore G., Cull J. 2001. Crustal Heat Flow: A guide to measurement and modelling. Cambridge University Press. Cambridge, 324 p.

3. Методы определения теплопроводности и температуропроводности / Под ред. А.В. Лыкова. 1973. М.: Энергия. 336 с.

4. Соколова Л.С., Дучков А.Д., Юрченко Н.В. Теплопроводность битуминозных аргиллитов баженовской свиты // Геология и геофизика. 1986. № 10. С. 42–46.

5. Дучков А.Д., Соколова Л.С., Аюнов Д.Е., Ян П.А. Теплопроводность пород баженовской свиты Салымского района (Западно-Сибирская плита) //Геология и геофизика. 2016. № 57 (7). 1367–1380.

6. Аюнов Д.Е., Дучков А.Д., Соколова Л.С. Теплопроводность пород баженовской свиты // Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология: сб. материалов Междунар. науч. конф. XI Междунар. науч. конгр. «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015», 13–25 апреля 2015 г. В 3 т. Новосибирск: СГУГиТ. 2015. Т. 2. С. 14–19.

7. Попов Ю.А., Чехонин Е.М., Паршин А.В., Попов Е.Ю., Миклашевский Д.Е. Новая аппаратурно-методическая база тепловой петрофизики как средство повышения эффективности добычи тяжелых нефтей // Нефть. Газ. Новации. 2013.№ 4. С. 52–58.

8. Попов Е.Ю., Калмыков Г.А., Стенин В.П., Попов Ю.А., Спасенных М.Ю. Тепловые свойства пород баженовской свиты // Нефтяное хозяйство. 2015. № 10. С. 32–37.

9. Гурари Ф.Г., Мотвиенко Н.И. Палеогеография баженовской свиты по распределению в ней урана. Перспективы нефтегазоносности юго-востока Западной Сибири. Новосибирск: СНИИГГиМС. 1980. С. 81–90.

10. Еремеев А.А., Михальцева И.В. Выявление и оценка упругих свойств горных пород с вертикальной осью анизотропии (TIV-анизотропии) по данным широкополосного акустического каротажа //Каротажник. 2013. № 12 (234). С. 20–32.

#### UDC 553.982.2

E.Yu. Popov, Senior Engineer, Skolkovo Institute of Science and Technology<sup>1</sup>, e.popov@skoltech.ru
E.M. Chekhonin, Senior Researcher, Skolkovo Institute of Science and Technology<sup>1</sup>, e.chekhonin@skoltech.ru
Yu.A. Popov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Skolkovo Institute of Science and Technology<sup>1</sup>, y.popov@skoltech.ru
R.A. Romushkevich, Researcher, Skolkovo Institute of Science and Technology<sup>1</sup>, r.romuchkevich@skoltech.ru

**A.V. Gabova**, Graduate Student, Skolkovo Institute of Science and Technology<sup>1</sup>, anastasia.gabova@skolkovotech.ru **V.V. Zhukov**, Project Head Unconventional Resources, Ltd. "Gazpromneft NTC"<sup>2</sup>, Zhukov.VV@gazpromneft-ntc.ru

<sup>1</sup>Building 3, Nobel street, Moscow, 143026, Russia. <sup>2</sup>75–79, letter D, Moika Embankment, St. Petersburg, 190000, Russia. <sup>3</sup>Faculty of Geology ,1 Leninskiye Gory, Moscow, GSP–1, 119991, Russia.

### Novel approach to Bazhenov fm. investigations through thermal core profiling

**Abstract.** A paper describes results of application of a new thermal core logging technique for investigations of 11 hydrocarbon fields located in the Bazhenov formation. Continuous non-destructive non-contact profiling rock thermal conductivity and volumetric heat capacity was performed with the new technique and with 1–2 mm spatial resolution for more than 13 000 full-size core samples from 17 wells with characterization of rock thermal anisotropy and heterogeneity. The measurement results provided a unique databases of rock thermal properties for basin and petroleum system modeling and thermohydrodynamic modeling. It is shown that approaches developed for the Bazhenov formation allow to transform thermal core logging results into continuous high-resolution profiles of total organic carbon, sonic velocities, Young's modulus, Poisson's ratio, sonic anisotropy coefficient, density, and natural radioactivity of rocks along wells.

Keywords: thermal core logging; Bazhenov formation; transformation of thermal properties in other properties

#### References

1. Hantschel Th., Kauerauf A. 2009. Fundamentals of Basin and Petroleum Systems Modeling. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 476 p.

2. Beardsmore G., Cull J. 2001. Crustal Heat Flow: A guide to measurement and modelling. Cambridge University Press. Cambridge, 324 p.

3. *Metody opredeleniia teploprovodnosti i temperaturoprovodnosti* [Methods for determination of thermal conductivity and thermal diffusivity]. Pod red. A.V. Lykova. 1973, Moscow, Energiia Publ., 336 p.

4. Sokolova L.S., Duchkov A.D., lurchenko N.V. *Teploprovodnost' bituminoznykh argillitov bazhenovskoi svity* [The thermal conductivity of bituminous mudstones Bazhenov Formation]. *Geologiia i geofizika* [Geology and geophysics], 1986, no. 10, pp. 42–46.

5. Duchkov A.D., Sokolova L.S., Aiunov D.E., Ian P.A. *Teploprovodnosť porod bazhenovskoi svity Salymskogo raiona (Zapadno-Sibirskaia plita)* [The thermal conductivity of the rocks of the Bazhenov Formation Salym region (West-Siberian plate)]. *Geologiia i geofizika* [Geology and geophysics], 2016, no. 57 (7), pp. 1367–1380.

6. Aiunov D.E., Duchkov A.D., Sokolova L.S. *Teploprovodnost' porod bazhenovskoi svity* [The thermal conductivity of the rocks of the Bazhenov Formation]. *Nedropol'zovanie. Gornoe delo. Napravleniia i tekhnologii poiska, razvedki i razrabotki mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh. Geoekologiia: sb. materialov Mezhdunar. nauch. konf. XI Mezhdunar. nauch. kongr. «Interekspo GEO-Sibir'-2015», 13–25 aprelia 2015 g* [Proc. of Int. conf. "Subsoil Use. Mining. Directions and search technology, exploration and development of mineral deposits. Geoecology" of XI Intern. scientific. Congreve. "Interexpo GEO-Siberia 2015"]. 3 vols, Novosibirsk: SGUGiT Publ., 2015, vol. 2, pp. 14–19.

7. Popov Iu.A., Chekhonin E.M., Parshin A.V., Popov E.Iu., Miklashevskii D.E. *Novaia apparaturno-metodicheskaia baza teplovoi petrofiziki kak sredstvo povysheniia effektivnosti dobychi tiazhelykh neftei* [New hardware-methodical base heat petrophysics as a means of increasing the efficiency of heavy oil production]. *Neft'. Gaz. Novatsii* [Oil. Gas. Innovations], 2013, no. 4, pp. 52–58.

8. Popov E.lu., Kalmykov G.A., Stenin V.P., Popov Iu.A., Spasennykh M.lu. *Teplovye svoistva porod bazhenovskoi svity* [Thermal properties of the Bazhenov Formation rocks]. *Neftianoe khoziaistvo* [oil Industry], 2015, no. 10, pp. 32–37.

9. Gurari F.G., Motvienko N.I. *Paleogeografiia bazhenovskoi svity po raspredeleniiu v nei urana. Perspektivy neftegazonosnosti iugo-vostoka Zapadnoi Sibiri* [Paleogeography Bazhenov Formation on the distribution of uranium in it. Prospects for oil and gas potential of the southeast of Western Siberia]. Novosibirsk, SNIIGGiMS Publ., 1980, pp. 81–90. 10. Eremeev A.A., Mikhal'tseva I.V. *Vyiavlenie i otsenka uprugikh svoistv gornykh porod s vertikal'noi os'iu anizotropii (TIVanizotropii) po dannym shirokopolosnogo akusticheskogo karotazha* [Identification and evaluation of the elastic properties of rocks with a vertical axis anisotropy (TIV-anisotropy) according broadband acoustic logging]. *Karotazhnik* [Kapotaжник], 2013, no. 12 (234), pp. 20–32.