

Изучение взаимосвязей между теплопроводностью и пористостью, проницаемостью, влажностью осадочных пород Западно-Сибирской плиты

А.Д. Дучков*, Д.Е. Аюнов, С.В. Родякин, П.А. Ян

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия

Определение корреляционных зависимостей между теплопроводностью и структурными параметрами (пористостью, проницаемостью, влажностью) осадочных пород является весьма актуальной задачей. В данной статье анализируются и сопоставляются результаты измерений указанных параметров для ~300 образцов мезозойских песчаников и алевролитов из керна 18 скважин, пробуренных в северо-восточном и южном районах Западно-Сибирской плиты. Измерена теплопроводность всех образцов в сухом состоянии и часть (90 образцов) – после насыщения водой. Пористость и проницаемость определены для 280 и 230 образцов, соответственно. Полученные данные использованы для установления линейных корреляционных связей между теплопроводностью, пористостью и проницаемостью. Наибольший интерес представляют достаточно устойчивые зависимости теплопроводности сухих и водонасыщенных образцов между собой и с пористостью. Установленные корреляционные зависимости интересны в практическом отношении. Часть из них может быть использована для приближенной оценки теплопроводности водонасыщенных пород по измерениям сухих пород или даже только по значениям пористости. Связь между теплопроводностью осадочных пород и пористостью можно использовать для оперативной оценки пористости пород по опережающим измерениям теплопроводности полноразмерного керна. Очевидно, что выявленные корреляционные связи требуют дальнейшего уточнения.

Ключевые слова: Западно-Сибирская плита, мезозойские песчаники и алевролиты, теплопроводность, пористость, проницаемость, влажность, корреляционная зависимость

Для цитирования: Дучков А.Д., Аюнов Д.Е., Родякин С.В., Ян П.А. (2018). Изучение взаимосвязей между теплопроводностью и пористостью, проницаемостью, влажностью осадочных пород Западно-Сибирской плиты. *Георесурсы*, 20(4), Ч.2, с. 396-403. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2018.4.396-403>

Введение

Коэффициент теплопроводности (далее теплопроводность или λ) количественно характеризует процесс передачи тепла в материале (горной породе). Этот параметр (а также и другие тепловые свойства – температуропроводность, теплоемкость) необходим при оценке теплового потока и глубинных температур, при проведении термогидродинамического и бассейнового моделирования, расчете теплообменных процессов в горных породах. Следует отметить, что до настоящего времени вся информация о теплопроводности пород основывается на изучении образцов керна в лабораторных условиях, так как пока не удастся разработать надёжную аппаратуру для измерения тепловых свойств пород непосредственно в скважинах (Новиков и др., 2008).

Результаты измерений теплопроводности горных пород осадочного чехла Западно-Сибирской плиты, полученные при изучении теплового потока, обобщены и проанализированы в ряде монографий (Курчиков, Ставицкий, 1987; Тепловое поле..., 1987; Балобаев, 1991; Липаев и др., 2001). Анализ результатов показал, что теплопроводность осадочных пород определяется составом минерального скелета, пористостью (K_p) и проницаемостью ($K_{пр}$) породы, а также типом флюида, заполняющего поры (воздух,

вода, нефть). Так, теплопроводность водонасыщенных образцов (λ_v) обычно существенно превышает теплопроводность тех же, но сухих образцов (λ_c), что объясняется многократным различием теплопроводности воды и воздуха (0,6 и 0,025 Вт/м/К, соответственно). Для оценки λ_v приходится насыщать сухие образцы водой и повторять измерения, т.е. существенно усложнять эксперименты. В этой связи весьма актуальной задачей является определение корреляционных зависимостей между λ_c и λ_v , а также между λ_c , λ_v и структурными параметрами (пористостью и проницаемостью) пород, которые бы позволили оценивать, хотя бы и грубо, недостающие данные. Накопленная при изучении теплового потока информация о теплопроводности осадочных пород Западно-Сибирской плиты во многом не пригодна для установления корреляционных связей из-за проблем с подбором коллекций образцов и различий в аппаратуре и методиках измерений.

Ситуация заметно изменилась после того, как в РФ были созданы и получили распространение высокоэффективные приборы, позволяющие выполнять экспрессные измерения тепловых свойств пород: «Тепловой компаратор» (ТК) (Калинин и др., 1983) и особенно «Измеритель теплопроводности сканирующий» (ИТС) (Попов и др., 1983; Никитин и др., 2016). Эти приборы одинаково метрологически обеспечены (используют один набор эталонов). Примерно одинакова для данных приборов и глубина проникновения теплового сигнала в породу (порядка 10 мм). Все это позволяет обоснованно

* Ответственный автор: Альберт Дмитриевич Дучков
E-mail: duchkovad@ipgg.sbras.ru

сравнивать результаты, полученные этими приборами. Использование указанной аппаратуры привело, за сравнительно короткое время, к существенному увеличению объема экспериментальных данных (в том числе и по Западной Сибири).

Наиболее детальные исследования тепловых свойств осадочных пород Западно-Сибирской плиты выполнены в 1995-2008 гг. коллективом под руководством Ю.А. Попова. В первую очередь необходимо отметить изучение сотен образцов песчаников, алевролитов, базальтов из полноразмерного керна сверхглубоких Тюменской (СГ-6) и Ен-Яхинской скважин (СГ-7) (Попов и др., 1996, 2008). Эти работы позволили составить общее представление об изменении теплопроводности пород практически во всем разрезе (от отложений мела до триаса, 7-8 км) осадочного чехла Западно-Сибирской плиты.

В этот же период были выполнены исследования по изучению связи теплопроводности осадочных пород с другими физическими свойствами на специально отобранной коллекции образцов из керна скважин Широкого Приобья (Роров et al., 2003). Коллекцию составили 143 образца песчаников и алевролитов мелового и юрского возраста с глубины 1360-3000 м. Пористость образцов изменялась в пределах 9,6-30,4 %, а проницаемость – 0,01-200 мДарси. Все измерения теплопроводности выполнялись на приборе ИТС. Изучались сухие и насыщенные водой стандартные образцы диаметром 2,5 см и длиной 3 см, вырезанные из полноразмерного керна вдоль и поперёк слоистости. Соответственно, авторы получили значения теплопроводности вдоль (λ_{\parallel}) и поперёк (λ_{\perp}) слоистости и показали, что средние значения λ_{\parallel} оказались больше λ_{\perp} примерно на 20%. Авторы больше доверяют значениям λ_{\parallel} , так как на эту составляющую меньше влияет декомпрессионное разуплотнение керна.

Теплопроводность сухих образцов изменялась от 1 до 2,76 Вт/м/К, водонасыщенных от 1,3 до 3,4 Вт/м/К. Анализ результатов позволил выявить достаточно тесные линейные и экспоненциальные зависимости, связывающие теплопроводность образцов с их пористостью и проницаемостью. Для примера можно привести два уравнения регрессии:

$$\lambda_{\parallel}/\lambda_c = 0,87 + 0,04 \cdot K_{\parallel} \quad (R^2=0,75, N=143), \quad (1)$$

$$\lambda_{\parallel}/\lambda_c = 0,95 + 0,03 \cdot K_{\parallel} \quad (R^2 = 0,72), \quad (2)$$

которые получены в работах (Роров et al., 2003; Попов и др., 2008), соответственно. В этих формулах (и последующих) R^2 – параметр, характеризующий степень достоверности линейной аппроксимации; N – количество измеренных образцов; K_{\parallel} – в %.

Нами получены новые данные о теплопроводности двух коллекций образцов осадочных пород такого же состава и возраста из кернов скважин, пробуренных в северо-восточных и южных районах Западно-Сибирской плиты. Эти коллекции разделены не только по географическому признаку, но и по типу прибора, использованного для измерения теплопроводности. В обоих случаях теплопроводность измерялась на стандартных кернах, вырезанных из полноразмерного керна перпендикулярно его оси (параллельно слоистости) и имевших диаметр и высоту порядка 3,7-3,8 мм. В настоящем сообщении обсуждаются результаты этих исследований.

Коллекция 1 – образцы из керна скважин северо-восточной части Западно-Сибирской плиты

Общие сведения о коллекции 1

Коллекция 1 включает 129 образцов меловых и юрских песчаников и алевролитов из кернов семи скважин (Медвежья-31, Сузунская-4, Горчинская-1, Южно-Носковская-318, Дерябинская-9, Восток-1, 3), пробуренных в северо-восточной части Западно-Сибирской плиты. Расположение скважин и первичные результаты выполненных измерений указаны в работе (Дучков и др., 2013). Коллекция охватывает часть разреза от 1800 до 4200 м. Для измерений λ использовался «Тепловой компаратор» (Калинин и др., 1983), датчик которого размещался на торцах стандартных кернов независимо от расположения слоев в кернах. Сначала измерялась теплопроводность всех образцов в воздушно-сухом состоянии (λ_c). Затем часть коллекции (90 образцов) насыщалась водой по стандартной методике и измерялись значения λ_{\parallel} . Для 93 и 53 образцов измерены K_{\parallel} и $K_{\text{пр}}$, соответственно. Пористость пород в образцах изменяется в пределах 1-29 % (в основном от 4 до 15%), а проницаемость – от <0,001 до 440 мДарси (один образец – 1117 мДарси). В целом теплопроводность сухих образцов изменяется от 0,6 до 2,6 Вт/м/К. Судя по гистограмме (Рис. 1), среднее значение λ_c составляет 1,8-2 Вт/м/К. После насыщения водой теплопроводность образцов возрастает в среднем на 20-40% и изменяется от 1,6 до 3,2 Вт/м/К. Среднее значение λ_{\parallel} составляет 2,6-2,8 Вт/м/К (отношение $\lambda_{\parallel}/\lambda_c$ варьирует от 1,1 до 2,1). Насыщение пород водой ведет не только к увеличению их теплопроводности, но и к относительному выравниванию её значений по разрезу. Меловые и юрские свиты по теплопроводности практически не различаются.

Полученные результаты использованы для поисков корреляционных связей между измеренными параметрами λ_c , λ_{\parallel} , $\lambda_{\parallel}/\lambda_c$, K_{\parallel} и $K_{\text{пр}}$.

Прямое сопоставление λ_c и λ_{\parallel} показывает наличие достаточно тесной положительной корреляционной зависимости между ними (Рис. 2):

$$\lambda_{\parallel} = 1,52 + 0,56 \lambda_c \quad (R^2 = 0,51, N = 90). \quad (3)$$

Некоторые статистические данные, характеризующие зависимость (1), приведены в подписи к рис. 2.

Разброс точек корреляционного поля связан с

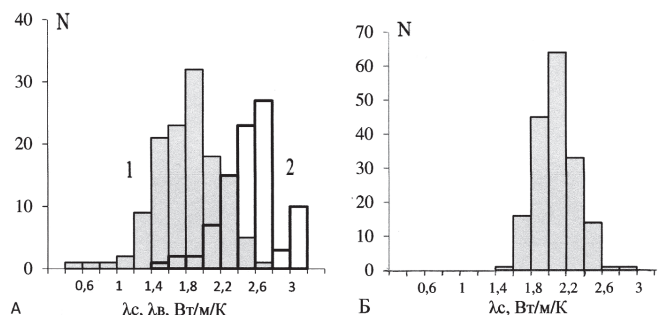


Рис. 1. Гистограммы значений теплопроводности мезозойских песчаников и алевролитов из керна скважин северо-восточной (Коллекция 1, А) и южной (Коллекция 2, Б) частей Западно-Сибирской плиты: А1 – сухие образцы ($N = 129$), А2 – водонасыщенные образцы ($N = 93$), Б – сухие образцы ($N = 175$). N – количество образцов

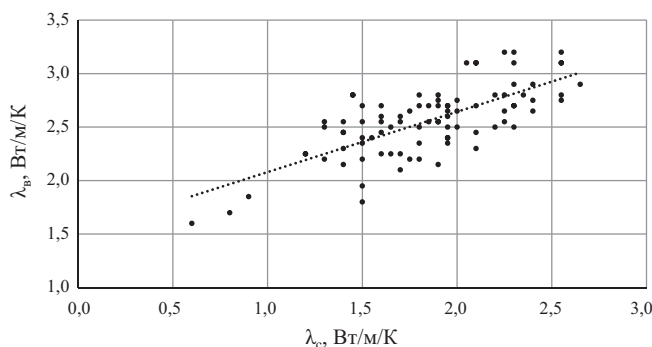


Рис. 2. Коллекция 1. Линейная корреляционная зависимость между измеренными значениями λ_c и λ_b . Уравнение линейной регрессии (линия): $\lambda_b = 1,52 + 0,56 \lambda_c$ ($R^2 = 0,51$, $N = 90$). Среднеквадратичное отклонение отдельных значений λ_b от линии регрессии 0.26 Вт/м/К. Здесь и далее R^2 – параметр, характеризующий степень достоверности линейной аппроксимации; N – число образцов

влиянием на теплопроводность, кроме пористости и типа флюида, неучтенных изменений минерального состава и структурно-текстурных особенностей породы.

Как уже отмечалось, теплопроводность осадочных пород в большой степени определяется их пористостью (K_p). Между этими параметрами наблюдается обратная линейная связь. Уравнение регрессии, полученное по результатам измерений λ_c и K_p образцов из Коллекции 1 имеет вид:

$$\lambda_c = 2,43 - 0,05 K_p \quad (R^2 = 0,54, N = 93). \quad (4)$$

Больше всего измерений K_p выполнено на образцах, имеющих пористость в диапазоне 5-15 %. Для этого интервала K_p характерен наибольший разброс измеренных значений λ_c (среднеквадратичное отклонение отдельных значений λ_c от линии регрессии составляет 0.35 Вт/м/К). При интерпретации связи теплопроводности с K_p следует иметь в виду, что λ реагирует на изменения общей пористости (суммарного объема всех пор). При измерении пористости на образцах обычно фиксируется открытая пористость, зависящая от объема сообщающихся пор.

Корреляция между значениями λ_b и K_p намного слабее, так как в данном случае контраст теплопроводности матрицы породы и заполняющего флюида много меньше, чем в сухих породах:

$$\lambda_b = 2,95 - 0,03 K_p \quad (R^2 = 0,34, N = 54). \quad (5)$$

Формулы (3-5) можно использовать для грубой оценки λ_c по K_p , а также теплопроводности насыщенных водой образцов по значениям λ_c или даже только K_p . Это бывает необходимо в случаях, если измерения теплопроводности выполнить невозможно из-за отсутствия аппаратуры или подходящих образцов ядра. По формуле (4) можно оценить среднюю теплопроводность минерального скелета (матрицы) образцов (λ_m), задавая $K_p = 0$. В породах нашей коллекции λ_m составляет 2,5 Вт/м/К.

В работах (Роров et al., 2003; Попов и др., 2008) предложено при изучении корреляционных связей использовать отношение λ_b/λ_c . На рис. 3 показана корреляционная связь между этим параметром и K_p по нашим данным. Уравнение регрессии имеет вид:

$$\lambda_b/\lambda_c = 1,04 + 0,03 \cdot K_p \quad (R^2 = 0,69, N = 54). \quad (6)$$

Очевидно, что эта корреляционная зависимость

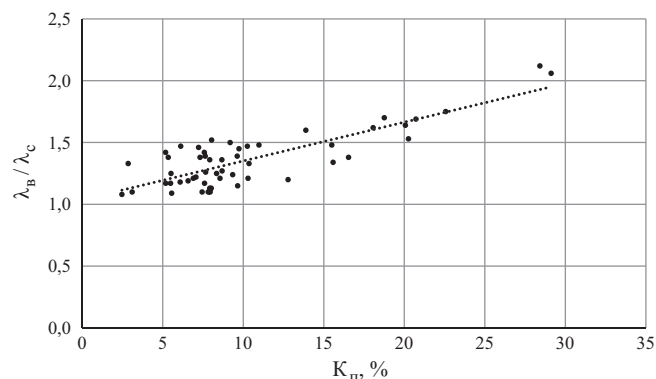


Рис. 3. Коллекция 1. Линейная корреляционная зависимость между значениями отношения теплопроводности водонасыщенных и сухих образцов (λ_b/λ_c) и их пористости. Уравнение линейной регрессии: $\lambda_b/\lambda_c = 1,04 + 0,03 K_p$ ($R^2 = 0,68$; $N = 53$)

является наиболее достоверной из приведённых ранее (параметр R^2 имеет максимальное значение), к тому же она хорошо соответствует уравнениям (1) и (2), полученным при изучении коллекций пород из других районов Западно-Сибирской плиты. Зависимость можно использовать для оценки теплопроводности водонасыщенных осадочных пород по значениям λ_c и K_p .

Известно, что между пористостью и проницаемостью осадочных пород существует корреляционная связь. Соответственно должна существовать корреляционная связь и между теплопроводностью и проницаемостью. Это подтверждено в работе (Роров et al., 2003), в которой сравнивались значения λ_b/λ_c и $K_{пр}$ для 60 образцов пород из ядра скважин Широкого Приобья, и было установлено экспоненциальное увеличение λ_b/λ_c от 1,3 до 2,3 при возрастании проницаемости от 0,03 до 100 мДарси (уравнение корреляции в работе не приведено). Мы проверили существование корреляционных связей между λ_c , λ_b , λ_b/λ_c и $K_{пр}$, используя имеющиеся у нас данные. Ранее указывалось, что проницаемость 93 образцов из Коллекции 1 в основном изменялась от <0,001 до 440 мДарси. Более половины образцов представляют плохо проницаемые породы ($K_{пр} < 0,001$), которые приходится исключать при проведении корреляции. В связи с существенным диапазоном изменения проницаемости для её представления обычно используется логарифм ($\lg K_{пр}$). В итоге уравнение обратной линейной корреляционной связи между λ_c и $K_{пр}$ для 53 образцов имеет вид, аналогичный (4):

$$\lambda_c = 1,8 - 0,21 \cdot \lg K_{пр} \quad (R^2 = 0,37, N = 53), \quad (7)$$

где размерность $K_{пр}$ – в мДарси. При увеличении проницаемости (и пористости) в породе увеличивается количество воздуха, плохо проводящего тепло, и соответственно уменьшается эффективная теплопроводность образца.

По меньшему количеству данных (всего 26 образцов) рассмотрена корреляционная связь между теплопроводностью водонасыщенных пород (λ_b , λ_b/λ_c) и их проницаемостью. Соответствующие уравнения регрессии имеют вид:

$$\lambda_b = 2,58 - 0,15 \cdot \lg K_{пр} \quad (R^2 = 0,29, N = 26) \text{ К}, \quad (8)$$

$$\lambda_b/\lambda_c = 1,44 + 0,13 \cdot \lg K_{пр} \quad (R^2 = 0,41, N = 25) \text{ К}. \quad (9)$$

Наиболее устойчивая последняя корреляционная связь показана на рис. 4. Из уравнения (9) следует, что по нашим данным λ_b/λ_c увеличивается от 1,2 до 1,9 при росте

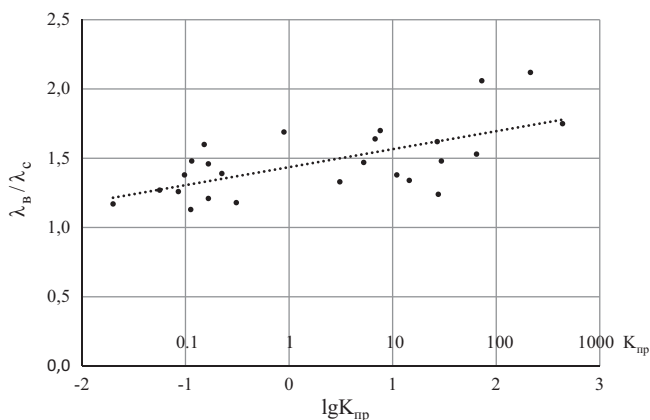


Рис. 4. Коллекция 1. Линейная обратная корреляционная зависимость между измеренными значениями теплопроводности образцов ($\lambda_{\text{в}}/\lambda_{\text{с}}$) и их проницаемостью ($K_{\text{пр}}$, мДарси; $\lg K_{\text{пр}}$). Уравнение регрессии: $\lambda_{\text{в}}/\lambda_{\text{с}} = 1,44 + 0,13 \cdot \lg K_{\text{пр}}$ ($R^2 = 0,41$; $N = 25$)

$K_{\text{пр}}$ от 0,03 до 100 мДарси, т.е. заметно медленнее, чем по данным работы (Porov et al., 2003).

Выше указывалось, что корреляционные уравнения (3, 5, 6) могут быть использованы для приближенной оценки теплопроводности водонасыщенных образцов осадочных пород по значениям $\lambda_{\text{с}}$ и $K_{\text{пр}}$. В качестве примера такие расчеты выполнены нами для образцов из скважин Восток (Дучков и др., 2014). Сначала рассчитаны значения $\lambda_{\text{в}}^*$ по $\lambda_{\text{с}}$ (уравнение (3)). Затем по $K_{\text{пр}}$ определены значения $\lambda_{\text{в}}^{**}$ (уравнение (5)). И, наконец, по $\lambda_{\text{с}}$ и $K_{\text{пр}}$ рассчитаны значения $\lambda_{\text{в}}^{***}$ (уравнение (6)). Сопоставление экспериментальных и расчетных значений $\lambda_{\text{в}}$ показывает, что разница между ними для отдельных образцов может быть значительной. И это не удивительно, так как уравнение регрессии позволяет оценить только среднее из нескольких $\lambda_{\text{в}}$, отвечающих одному определенному значению $\lambda_{\text{с}}$ или $K_{\text{пр}}$, или их совокупности. Однако средние расчетные значения $\lambda_{\text{в}}$ для всех образцов отличаются от экспериментального среднего не более чем на 3-5%. Понятно, что оценочные

№ п/п	Глубина отбора, м	$K_{\text{пр}}$, %	Теплопроводность, Вт/м/К				
			$\lambda_{\text{с}}$	$\lambda_{\text{в}}$	$\lambda_{\text{в}}^*$	$\lambda_{\text{в}}^{**}$	$\lambda_{\text{в}}^{***}$
1	2058	28,33	0,6	1,6	1,8	2	1,3
2	2067	29,12	0,9	1,85	2,0	2	1,9
3	2072	28,42	0,8	1,7	2,0	2	1,6
4	2127	12,79	1,5	1,8	2,4	2,5	2,2
5	2299	13,89	1,5	2,4	2,4	2,5	2,3
6	2317	18,76	1,5	2,55	2,4	2,3	2,5
7	2472	7,6	2,1	2,45	2,7	2,7	2,7
8	2520	20,73	1,3	2,2	2,2	2,3	2,3
9	2528	20,07	1,4	2,3	2,3	2,3	2,4
10	2617	20,26	1,6	2,45	2,4	2,3	2,8
11	2679	18,07	1,6	2,6	2,4	2,4	2,7
12	2744	22,57	1,4	2,45	2,3	2,2	2,6
13	2806	16,54	1,85	2,55	2,6	2,4	3,0
14	3067	15,58	1,9	2,55	2,6	2,4	3,0
15	3184	15,5	2,1	3,1	2,7	2,5	3,3
Среднее				2,33	2,35	2,32	2,44

Табл. 1. Измеренные и рассчитанные по формулам (3, 5, 6) значения теплопроводности образцов водонасыщенных пород из мезозойских отложений, вскрытых скважинами Восток-1 (образцы №№ 1-6, 10-12) и Восток-3 (образцы №№ 7-9, 3-15); $\lambda_{\text{с}}$, $\lambda_{\text{в}}$, $K_{\text{пр}}$ – измеренные значения теплопроводности и пористости; $\lambda_{\text{в}}^*$, $\lambda_{\text{в}}^{**}$ и $\lambda_{\text{в}}^{***}$ – значения теплопроводности, рассчитанные по формулам (3, 5, 6), соответственно

результаты для образцов пород, не вошедших в нашу коллекцию, могут быть несколько хуже. Но в любом случае при проведении геотермических исследований (например, изучении теплового потока, расчете глубинных температур) целесообразнее использовать расчетные значения $\lambda_{\text{в}}$ (они будут гораздо ближе к истине), чем теплопроводность сухих образцов. Особенно это справедливо для осадочных пород с высокой пористостью.

Коллекция 2 – образцы из керна скважин южной части Западно-Сибирской плиты

Общие сведения о коллекции 2

Коллекция 2 включает 175 образцов песчаников и алевролитов юрского возраста из кернов 10 скважин (Биазинская-1, Касманская-1,2; Надеждинская-1, Оптимистическая-1, Пограничная-2, Ракитинская-4,5,7; Узасская-1), пробуренных в южной части плиты (Новосибирская область). В коллекции представлены образцы из тюменской (J_{1-2}) и васюганской (J_3) свит, примерно в равной пропорции (96 и 79 образцов) с глубин 2430-2780 м. Таким образом изученные коллекции существенно различаются не только по количеству отобранных образцов, но и по размеру интервала отбора (Коллекция 1 – интервал 2400 м, отобрано 129 образцов; Коллекция 2 – интервал 350 м, отобрано 175 образцов). Как и ранее, изучались стандартные керны – цилиндры, вырезанные из полноразмерного керна перпендикулярно его оси (параллельно слоистости) и имевшие высоту и диаметр порядка 37-38 мм. В ходе исследований измерена теплопроводность только сухих кернов, а также определена их пористость и проницаемость. Установлено, что $K_{\text{пр}}$ изменяется от 0,54 до 19,3%, $K_{\text{пр}}$ – от <0,001 до 120 мДарси. Для измерений теплопроводности использовался прибор ИТС (Попов и др., 1983). Сканирование происходило вдоль оси стандартного керна. При этом специально не отслеживалось (как и при изучении Коллекции 1) положение линии сканирования относительно слоистости керна.

Теплопроводность сухих кернов изменяется от 1,4 до 2,9 Вт/м/К, среднее значение $\lambda_{\text{с}}$ составляет 2,1 Вт/м/К. Образцы, отобранные из тюменской (J_{1-2}) и васюганской (J_3) свит, по теплопроводности практически не различаются: 1,7-2,63 и 1,45-2,57 Вт/м/К, соответственно. Согласно гистограмме (Рис. 1), основной массив образцов Коллекции 2 имеет теплопроводность 2-2,2 Вт/м/К, т.е. примерно на 0,2 Вт/м/К выше, чем основная группа образцов Коллекции 1. Таким образом следует констатировать, что по средней теплопроводности сухие образцы однотипных и одновозрастных пород, собранные в двух коллекциях, представляющих различные, достаточно удаленные части Западно-Сибирской плиты, различаются примерно на 10%. Можно предположить, что это различие связано с использованием разных измерителей теплопроводности (ТК и ИТС) при изучении Коллекций 1 и 2. Однако данные, приведенные в работе (Porov et al., 2003), как будто не подтверждают это предположение. По этим данным сухие песчаники и алевролиты из верхней юры и нижнего мела Широкого Приобья характеризуются (измерения выполнены на ИТС) средней теплопроводностью порядка 1,7-1,8 Вт/м/К, отличной от обеих наших оценок. В этой связи возможно, что описанные вариации средних значений λ связаны с изменениями в минеральном составе

и структурных особенностях пород в разрезах разных регионов. Указанная проблема требует специального, более детального, рассмотрения. Из выявленных различий можно сделать вывод, что данные, полученные по нескольким коллекциям образцов, следует интерпретировать отдельно и уже потом решать вопрос об их объединении. Ниже мы покажем это на примере данных по Коллекции 2.

Корреляционные связи между λ_c и K_n , K_{np}

При изучении образцов Коллекции 2 измерялись только значения λ_c , K_n и K_{np} . При сопоставлении 170 пар значений λ_c , K_n получена корреляционная зависимость, уравнение регрессии которой имеет вид:

$$\lambda_c = 2,47 - 0,04 \cdot K_n \quad (R^2 = 0,43; N = 170). \quad (10)$$

Сопоставление уравнений (4) и (10) показывает, что они полностью идентичны. Это позволяет сложить результаты измерений λ_c , K_n по обеим коллекциям и получить корреляционную зависимость суммы данных (Рис. 5). Уравнение регрессии суммарной зависимости имеет вид:

$$\lambda_c = 2,49 - 0,05 \cdot K_n \quad (R^2 = 0,5; N = 263). \quad (11)$$

Таким образом, несмотря на различия в участках отбора образцов мезозойских песчаников и алевролитов Западно-Сибирской плиты и их количестве, получены идентичные корреляционные зависимости между измеренными значениями λ_c и K_n (уравнения (4), (10), (11)). Интересно было бы проверить устойчивость этой зависимости на коллекциях других образцов.

Из уравнения (11) и рис. 5 следует, что теплопроводность минерального скелета λ_m (значение λ_c при $K_n = 0$) образцов из Коллекций 1 и 2, одинакова и составляет 2,5 Вт/м/К. В то же время, судя по работе (Поров et al., 2003), такие же по типу и возрасту породы из Широкого Приобья, должны существенно отличаться по составу минерального скелета, так как их средняя λ_m составляет 3,2-3,6 Вт/м/К, т.е. намного выше определённых нами значений.

Как уже отмечалось, коэффициент проницаемости пород в Коллекции 2 (173 образца) изменяется от <0,001 до 120 мДарси. После исключения плохо проницаемых пород (<0,001 мДарси) в Коллекции 2 остается 109 образцов, по которым и определена корреляционная связь между λ_c и $\lg K_{np}$ и соответствующее уравнение регрессии:

$$\lambda_c = 2 - 0,13 \lg K_{np} \quad (R^2 = 0,17; N = 109). \quad (12)$$

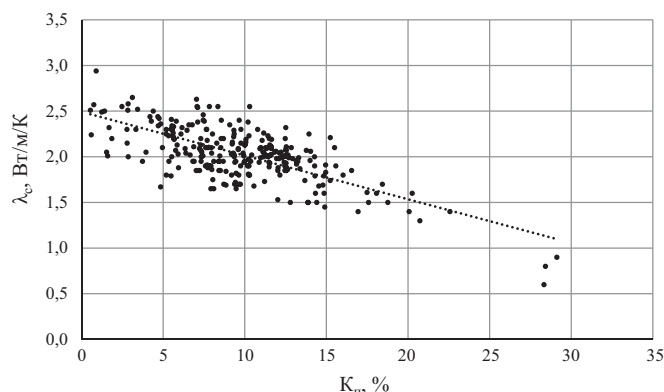


Рис. 5. Линейная обратная корреляционная зависимость между измеренными значениями теплопроводности (λ_c) и (K_n) всех образцов из Коллекций 1 и 2. Уравнение регрессии: $\lambda_c = 2,49 - 0,05 K_n$ ($R^2 = 0,5; N = 263$)

Несмотря на большее количество измеренных образцов, данная корреляционная зависимость в целом менее достоверна ($R^2 = 0,17$), чем полученная ранее при изучении Коллекции 1 (уравнение (7), $R^2 = 0,37$). Сравнение корреляционных уравнений (формулы (7) и (12)) показывает, что линии регрессии в обоих случаях имеют примерно одинаковый наклон, но сдвинуты относительно друг друга примерно на 0,2 Вт/м/К. В данной ситуации объединение данных двух коллекций не целесообразно.

Факторы, влияющие на вид корреляционной связи между λ_c и K_n

Для всех полученных корреляционных зависимостей характерен значительный разброс данных. Для выяснения причин разброса авторы проверили по данным Коллекции 2 влияние ряда факторов (проницаемость образцов, содержание в них цемента и кварца с $\lambda = 7,7$ Вт/м/К). Это стало возможным, так как все образцы Коллекции 2 были подвергнуты, кроме всего прочего, и петрографическому анализу.

Для проверки влияния фактора проницаемости образцы были разбиты на три выборки: «плохо проницаемые» (<0,001 мДарси), «среднепроницаемые» (0,2-3 мДарси) и «высокопроницаемые» (>3 мДарси). Для каждой из выборок проверено наличие корреляционных связей между λ_c и K_n (Рис. 6).

Установлено, что относительно небольшая выборка по «высокопроницаемым» образцам показывает максимальный разброс значений пористости для образцов с близкой теплопроводностью и не выявляет корреляционной связи между λ_c и K_n . Остальные выборки характеризуются достаточно устойчивыми, имеющими одинаковый наклон, корреляционными зависимостями между исследуемыми параметрами. Однако они сдвинуты относительно друг друга так, что пористость «плохо проницаемых» образцов оказывается ниже на 5%, чем K_n «среднепроницаемых» образцов с такой же теплопроводностью.

Исследование влияния содержания в образцах цемента (глинистого и карбонатного) проводилось отдельно для групп «плохо проницаемых» и «среднепроницаемых» образцов. В каждой группе рассматривались три выборки образцов по содержанию цемента в минеральном скелете: менее 10%, 10-30% и более 30%. По этим выборкам опять же строились корреляционные зависимости между λ_c и K_n . Во всех выборках обеих групп образцов зафиксированы

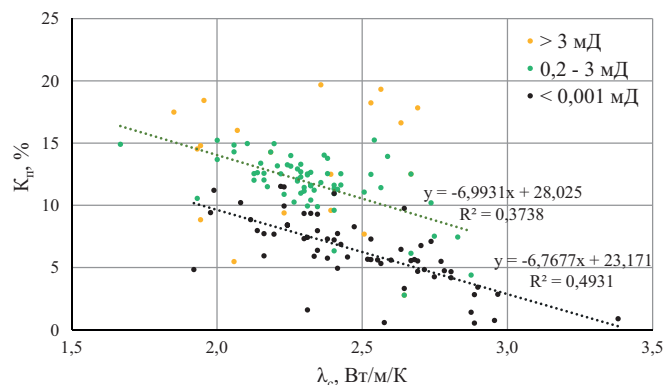


Рис. 6. Коллекция 2. Связи между пористостью и теплопроводностью и линейные тренды для групп «плохо проницаемых», «среднепроницаемых» и «высокопроницаемых» образцов

близкие корреляционные зависимости между изучаемыми параметрами.

Изучение влияния содержания кварца в образцах также проводилось отдельно для групп «среднепроницаемых» и «плохо проницаемых» образцов. По общему содержанию кварца в минеральном скелете взяты три выборки: менее 25%, 25-50% и более 50%. На корреляционной диаграмме λ_c и $K_{\text{п}}$ выборки не показали выраженных различий.

Таким образом, можно констатировать, что из трех различных рассмотренных факторов (проницаемость, содержание цемента и кварца) именно проницаемость оказывает основное влияние на характер корреляционной зависимости между λ_c и $K_{\text{п}}$. При построении такой зависимости желательнее удаление из выборок значений λ_c , полученных для образцов, проницаемость которых превышает 3 мДарси. Вполне вероятно, что эти выводы справедливы и для других рассмотренных в статье корреляционных зависимостей.

Заключение

В ходе исследований выполнено изучение двух коллекций образцов (всего ~300 образцов) осадочных пород из керна 17 скважин, пробуренных в северо-восточном и южном районах Западно-Сибирской плиты. Приборами «Тепловой компаратор» (Калинин и др., 1983) и «Измеритель теплопроводности сканирующий» (Попов и др., 1983) измерена теплопроводность всех образцов в сухом состоянии и часть (90 образцов) – после насыщения водой. Пористость и проницаемость определены для 280 и 230 образцов, соответственно. Исследования показали, как и следовало ожидать, что теплопроводность осадочных пород определяется, в первую очередь, пористостью и типом флюида (воздух, вода), насыщающего поры. В наших экспериментах после насыщения водой теплопроводность осадочных пород (средняя пористость 12-15%) возрастала в среднем на 20-40%. Это показывает, насколько важно использовать при различных геотермических расчетах именно соответствующие значения коэффициента теплопроводности, хотя бы оцененные по эмпирическим корреляционным связям. Несомненно актуальность проведения экспериментальных исследований по поискам таких связей между теплопроводностью и факторами её определяющими. Мы использовали наши данные для установления связей между λ_c и λ_b , $K_{\text{п}}$, $\lg K_{\text{пр}}$; λ_b и $K_{\text{п}}$, $\lg K_{\text{пр}}$; λ_b/λ_c и $K_{\text{п}}$, $\lg K_{\text{пр}}$. Все полученные уравнения регрессии для удобства сведены в таблице 2 с сохранением номеров уравнений регрессий.

В первую очередь необходимо отметить наличие устойчивых ($R^2 = 0,43-0,54$) связей λ_c с λ_b и $K_{\text{п}}$. Получены одинаковые корреляционные зависимости λ_c и $K_{\text{п}}$ (4, 10, 11) для обеих коллекции и их суммы, несмотря на различные количества образцов в выборках (93-263 образца) и места их отбора. В то же время следует указать, что во всех изученных выборках представлены одинаковые по типу и возрасту мезозойские осадочные породы. Поэтому актуальной задачей является проверка указанных связей λ_c и $K_{\text{п}}$ на коллекциях, включающих другие породы.

Значительно меньше в рассмотренных коллекциях образцов, для которых имеются измеренные значения λ_b и $K_{\text{п}}$. Однако именно по ним получена наиболее устойчивая

Кол-н обр.	№ ур-я	Параметры	Уравнения регрессии	R ²	N
	1	$\lambda_b/\lambda_c, K_{\text{п}}$	$\lambda_b/\lambda_c = 0,87 + 0,04 \cdot K_{\text{п}}$	0,75	143
	2	$\lambda_b/\lambda_c, K_{\text{п}}$	$\lambda_b/\lambda_c = 0,95 + 0,03 \cdot K_{\text{п}}$	0,85	-
1	3	λ_c, λ_b	$\lambda_b = 1,52 + 0,56 \cdot \lambda_c$	0,51	90
1	4	$\lambda_c, K_{\text{п}}$	$\lambda_c = 2,43 - 0,05 \cdot K_{\text{п}}$	0,54	93
1	5	$\lambda_b, K_{\text{п}}$	$\lambda_b = 2,95 - 0,03 \cdot K_{\text{п}}$	0,34	54
1	6	$\lambda_b/\lambda_c, K_{\text{п}}$	$\lambda_b/\lambda_c = 1,04 + 0,03 \cdot K_{\text{п}}$	0,68	53
1	7	$\lambda_c, \lg K_{\text{пр}}$	$\lambda_c = 1,8 - 0,21 \cdot \lg K_{\text{пр}}$	0,37	53
1	8	$\lambda_b, \lg K_{\text{пр}}$	$\lambda_b = 2,58 - 0,15 \cdot \lg K_{\text{пр}}$	0,29	26
1	9	$\lambda_b/\lambda_c, \lg K_{\text{пр}}$	$\lambda_b/\lambda_c = 1,44 + 0,13 \cdot \lg K_{\text{пр}}$	0,41	25
2	10	$\lambda_c, K_{\text{п}}$	$\lambda_c = 2,47 - 0,04 \cdot K_{\text{п}}$	0,43	170
1+2	11	$\lambda_c, K_{\text{п}}$	$\lambda_c = 2,49 - 0,05 \cdot K_{\text{п}}$	0,5	263
2	12	$\lambda_c, \lg K_{\text{пр}}$	$\lambda_c = 2 - 0,13 \cdot \lg K_{\text{п}}$	0,17	109

Табл. 2. Корреляционные зависимости между теплопроводностью, пористостью и проницаемостью образцов осадочных пород Западно-Сибирской плиты. Уравнения регрессии (1 и 2) приведены в работах (Роров et al., 2003; Попов и др., 2008), соответственно. Уравнения (3-12) получены авторами. R² – параметр, характеризующий степень достоверности линейной аппроксимации; N – количество образцов; K_п – в %

связь ($R^2 = 0,68$) между λ_b/λ_c и $K_{\text{п}}$. Соответствующее уравнение регрессии (6) удовлетворительно соответствует корреляционным связям (1 и 2), полученным ранее для других районов Западно-Сибирской плиты (Роров et al., 2003; Попов и др., 2008). В этих работах высказывается мнение, что корреляции между λ_b/λ_c и $K_{\text{п}}$ присущи различным типам пород, что возможно указывает на их универсальный характер для осадочных пород.

Не удалось получить устойчивые корреляционные связи между теплопроводностью и проницаемостью образцов. Так, для 109 сухих образцов Коллекции 2 получено уравнение регрессии (12), для которого степень достоверности линейной аппроксимации R² составляет всего 0,17. Несколько устойчивее связи между проницаемостью и теплопроводностью водонасыщенных пород (8, 9), однако они получены всего по 26 образцам.

Рассмотренные корреляционные зависимости несомненно представляют практический интерес. Во-первых, часть из них (3-6) может быть использована для приближенной оценки λ_b по измеренным значениям теплопроводности сухих пород или только их пористости. Приведенный в статье пример (Табл. 1) показал, что в этом случае можно получить результаты, соответствующие измеренным.

Весьма важным фактом является наличие корреляционных связей теплопроводности сухих осадочных пород с их пористостью и проницаемостью. Так, установленную зависимость (11) можно использовать для оперативной оценки пористости пород по предварительным измеренным значениям λ_c . Таким образом, используя опережающие измерения λ_c керна, можно выявить высокопористые интервалы разреза, которые в дальнейшем можно более детально изучить традиционными методами. Для применения этой методики потребуются измерить теплопроводность полноразмерного керна (лучше воздушно-сухого) и, используя корреляционные связи λ_c с $K_{\text{п}}$, оценить изменения пористости пород с глубиной. Теплопроводность сухих пород измеряется намного проще и быстрее, чем пористость (и проницаемость), особенно при использовании современной экспрессной аппаратуры типа ИТС.

Очевидно, что выявленные корреляционные связи, имеющие большое значение для оперативной оценки тепловых и структурных свойств осадочных пород, требуют дальнейшего уточнения. Необходимо продолжить работу по увеличению объема выборок измеренных параметров для разных типов пород и геологических провинций, а также анализу и уточнению рассмотренных в статье корреляционных зависимостей.

Благодарности

Исследование выполнено по плану базовых научно-исследовательских работ отделения геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН при финансовой поддержке гранта РФФИ №16-35-00211.

Литература

- Балобаев В.Т. (1991). Геотермия мерзлой зоны литосферы севера Азии. Новосибирск: Наука, 194 с.
- Дучков А.Д., Соколова Л.С., Аюнов Д.Е., Злобина О.Н. (2013). Теплопроводность пород осадочного чехла арктической части Западной Сибири. *Геология и геофизика*, 54(12), с. 1952-1960. <https://doi.org/10.1016/j.jgg.2013.10.015>
- Дучков А.Д., Соколова Л.С., Родякин С.В., Черныш П.С. (2014). Зависимость теплопроводности пород осадочного чехла Западно-Сибирской плиты от влажности и пористости. *Геология и геофизика*, 55(5-6), с. 991-1000. <https://doi.org/10.1016/j.jgg.2014.05.021>
- Калинин А.Н., Соколова Л.С., Дучков А.Д., Черепанов В.Я. (1983). Исследования теплового компаратора применительно к измерениям теплопроводности горных пород. *Геология и геофизика*, 3, с. 116-122.
- Курчиков А.Р., Ставицкий Б.П. (1987). *Геотермия нефтегазоносных областей Западной Сибири*. Москва: Недр, 134 с.
- Липаев А.А., Гуревич В.М., Липаев С.А. (2001). Тепловые свойства горных пород нефтяных месторождений Татарстана. Справочник. Казань: Издательство КМО, 205 с.
- Никитин Д.С., Хуторской М.Д., Никитин А.С. (2016). Бесконтактные измерения теплофизических свойств горных пород на установке ТС14. *Процессы в геосредах*, 3(7), с. 246-254.
- Новиков С.В., Попов Ю.А., Тертычный В.В. и др. (2008). Возможности и проблемы современного теплового каротажа. *Геология и разведка*, 3, с. 54-57.
- Попов Ю.А., Семенов В.Г., Коростелев В.М. и др. (1983). Определение теплопроводности горных пород с помощью подвижного источника тепла. *Физика земли*, 7, с. 86-93.

Попов Ю.А., Ромушкевич Р.А., Попов Е.Ю. (1996). Теплофизические исследования пород разреза Тюменской сверхглубокой скважины. В кн.: Тюменская сверхглубокая скважина (интервал 0-7502 м). Результаты бурения и исследования: *Сборник докл. Научное бурение в России*. Вып. 4. Пермь: КамНИИКИГС, с. 163-175.

Попов Ю.А., Ромушкевич Р.А., Горобцов Д.Н. и др. (2008). Тепловые свойства пород и тепловой поток в районе бурения сверхглубокой Ен-Яхинской скважины. *Геология и разведка*, 2, с. 59-65.

Тепловое поле недр Сибири (1987). Ред. Э.Э. Фотиади. Новосибирск: Наука, 195 с.

Popov Yu., Tertychnyi V., Romushkevich R. et al. (2003). Interrelations between thermal conductivity and other physical properties of rocks: experimental data. *Pure and applied geophysics*, 160, pp. 1137-1161. <https://doi.org/10.1007/PL00012565>

Сведения об авторах

Альберт Дмитриевич Дучков – доктор геол.-мин. наук, профессор, главный научный сотрудник

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН

Россия, 630090, Новосибирск, пр. Акад. Коптюга, д. 3

Дмитрий Евгеньевич Аюнов – канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН

Россия, 630090, Новосибирск, пр. Акад. Коптюга, д. 3

Сергей Владимирович Родякин – младший научный сотрудник

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН

Россия, 630090, Новосибирск, пр. Акад. Коптюга, д. 3

Пётр Александрович Ян – канд. геол.-мин. наук, заведующий лабораторией

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН

Россия, 630090, Новосибирск, пр. Акад. Коптюга, д. 3

Статья поступила в редакцию 04.07.2018;

Принята к публикации 26.09.2018;

Опубликована 30.11.2018

IN ENGLISH

The study of the relationship between thermal conductivity and porosity, permeability, humidity of sedimentary rocks of the West Siberian Plate

A.D. Duchkov, D.E. Ayunov, S.V. Rodyakin, P.A. Yan*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

**Corresponding author: Albert D. Duchkov, e-mail: duchkovad@ipgg.sbras.ru*

Abstract. The determination of correlation between thermal conductivity and structural parameters (porosity, permeability, humidity) of sedimentary rocks is a very urgent task. This article analyzes and compares the results of measurements of these parameters for ~300 samples of Mesozoic sandstones and siltstones from the core of 18 wells drilled in the north-eastern and southern regions of the West Siberian plate. The thermal conductivity of all samples was measured in the dry state and some (90 samples) – after saturation with water. Porosity and permeability are determined for 280 and 230 samples, respectively. The obtained data are used to establish linear correlation connections between thermal

conductivity, porosity and permeability. The most interesting are rather stable dependences of thermal conductivity of dry and water-saturated samples between themselves and with porosity. The established correlation dependences are interesting in practical terms. Some of them can be used to approximate the thermal conductivity of water-saturated rocks by measurements of dry rocks or even only by the porosity value. The relationship between the thermal conductivity of sedimentary rocks and porosity can be used for rapid assessment of porosity of rocks on advanced measurements of thermal conductivity of a full-size core. It is obvious that the revealed correlation connections require further clarification.

Keyword: West Siberian plate, Mesozoic sandstones and siltstones, thermal conductivity, porosity, permeability, humidity, correlation dependence

Recommended citation: Duchkov A.D., Ayunov D.E., Rodyakin, S.V., Yan P.A. (2018). The study of the relationship between thermal conductivity and porosity, permeability, humidity of sedimentary rocks of the West Siberian Plate. *Georesursy = Georesources*, 20(4), Part 2, pp. 396-403. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2018.4.396-403>

Acknowledgments

The study was carried out according to the plan of basic research works of the Department of Geophysics, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, with financial support from the Russian Foundation for Basic Research grant No. 16-35-00211.

References

- Balobaev V.T. (1991). Geotermya merzloi zony litosfery severa Azii [Geothermy of the frozen zone of the lithosphere of the north of Asia]. Novosibirsk: Nauka, 194 p. (In Russ.)
- Duchkov A.D., Sokolova L.S., Ayunov D.E., Zlobina O.N. (2013). Thermal conductivity of sediments in high-latitude West Siberia. *Russian Geology and Geophysics*, 54(12), pp. 1522-1528. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2013.10.015> (In Russ.)
- Duchkov A.D., Sokolova L.S., Rodyakin S.V., Chernysh P.S. (2014). Thermal conductivity of the sedimentary-cover rocks of the West Siberian Plate in relation to their humidity and porosity. *Russian Geology and Geophysics*, 55(5-6), pp. 784-792. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2014.05.021> (In Russ.)
- Kalinin A.N., Sokolova L.S., Duchkov A.D., Cherepanov V.Ya. (1983). Issledovaniya teplovogo komparatora primenitel'no k izmereniyam teploprovodnosti gornykh porod [Research of the thermal comparator in relation to measurements of thermal conductivity of rocks]. *Geologiya i geofizika = Geology and Geophysics*, 3, pp. 116-122. (In Russ.)
- Kurchikov A.R., Stavitskii B.P. (1987). Geotermya neftegazonosnykh oblastei Zapadnoi Sibiri [Geothermy of oil and gas regions of Western Siberia]. Moscow: Nedra, 134 p. (In Russ.)
- Lipaev A.A., Gurevich V.M., Lipaev S.A. (2001). Teplovye svoystva gornykh porod neftyanykh mestorozhdenii Tatarstana [Thermal properties of rocks of oil fields of Tatarstan]. Kazan: KMO Publ., 205 p. (In Russ.)
- Nikitin D.S., Khutorskoi M.D., Nikitin A.S. (2016). Beskontaknye izmereniya teplofizicheskikh svoystv gornykh porod na ustanovke TS14 [Non-contact measurements of thermal-physical properties of rocks on TC14 device]. *Protsessy v geosredakh = Processes in GeoMedia*, 3(7), pp. 246-254. (In Russ.)
- Novikov S.V., Popov Yu.A., Tertychnyi V.V. et al. (2008). Vozможности i problemy sovremennogo teplovogo karotazha [Opportunities and problems of modern thermal logging]. *Geologiya i razvedka = Geology and exploration*, 3, pp. 54-57. (In Russ.)

Popov Yu., Tertychnyi V., Romushkevich R. et al. (2003). Interrelations between thermal conductivity and other physical properties of rocks: experimental data. *Pure and applied geophysics*, 160, pp. 1137-1161. <https://doi.org/10.1007/PL00012565>

Popov Yu.A., Romushkevich R.A., Gorobtsov D.N. et al. (2008). Teplovye svoystva porod i teplovoi potok v raione bureniya sverkhglubokoi En-Yakhinskoi skvazhiny [Thermal properties of rocks and heat flow in the area of ultra-deep drilling in the En-Yakhinskaya well]. *Geologiya i razvedka = Geology and exploration*, 2, pp. 59-65. (In Russ.)

Popov Yu.A., Romushkevich R.A., Popov E.Yu. (1996). Thermophysical studies of rocks of the Tyumen ultradeep well section. V kn.: *Tyumenskaya sverkhglubokaya skvazhina (interval 0-7502 m). Rezul'taty bureniya i issledovaniya* [Book: Tyumen ultradeep well (interval 0-7502 m). Results of drilling and research]. *Sbornik dokl. Nauchnoe burenie v Rossii* [Coll. papers: Scientific drilling in Russia]. Is. 4. Perm: KamNIKIGS, pp. 163-175. (In Russ.)

Popov Yu.A., Semenov V.G., Korostelev V.M. et al. (1983). Opredelenie teploprovodnosti gornykh porod s pomoshch'yu podvizhnogo istochnika tepla [Determination of thermal conductivity of rocks using a movable heat source]. *Izvestiya. Physics of the Earth*, 7, pp. 86-93. (In Russ.)

Teplovoe pole nedr Sibiri [Thermal field of Siberia depths] (1987). Ed. E.E. Fotiadi. Novosibirsk: Nauka, 195 p. (In Russ.)

About the Authors

Albert D. Duchkov – DSc (Geology and Mineralogy), Professor, Chief Researcher

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences
3 Ak. Koptyug ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

Dmitry E. Ayunov – PhD (Physics and Mathematics), Senior Researcher

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences
3 Ak. Koptyug ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

Sergey V. Rodyakin – Junior Researcher

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences
3 Ak. Koptyug ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

Petr A. Yan – PhD (Geology and Mineralogy), Head of laboratory

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences
3 Ak. Koptyug ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

Manuscript received 04 July 2018;

Accepted 26 September 2018; Published 30 November 2018