

КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ СВЯЗИ МЕЖДУ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬЮ, ПОРИСТОСТЬЮ И ПРОНИЦАЕМОСТЬЮ МЕЗОЗОЙСКИХ ПЕСЧАНИКОВ И АЛЕВРОЛИТОВ ИЗ ЮЖНЫХ РАЙОНОВ ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ ПЛИТЫ

А.Д. Дучков, Д.Е. Аюнов, Л.С. Соколова, П.А. Ян

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия*

Рассматриваются результаты измерений теплопроводности, пористости и проницаемости 780 образцов мезозойских песчаников и алевролитов из керна 50 скважин, пробуренных в трех южных районах (Новосибирская и Томская области, Сургутский район ХМАО) Западно-Сибирской плиты. Теплопроводность образцов измерялась дважды — в сухом и в водонасыщенном состояниях. Установлено, что теплопроводность водонасыщенных пород в среднем на 20—40 % выше. Выявлены корреляционные связи между измеренными параметрами. В результате определены достаточно устойчивые зависимости теплопроводности сухих и водонасыщенных образцов между собой, а также с пористостью и проницаемостью. Установленные корреляционные зависимости могут быть использованы для приближенной оценки теплопроводности водонасыщенных пород по измерениям теплопроводности сухих образцов или даже только по значениям пористости. Связь между теплопроводностью и пористостью можно использовать для оперативной оценки пористости пород по измерениям теплопроводности керна.

Мезозойские песчаники и алевролиты, теплопроводность, влажность, пористость, проницаемость, корреляционная зависимость, Западно-Сибирская плита

CORRELATIONS AMONG THERMAL CONDUCTIVITY, POROSITY, AND PERMEABILITY OF MESOZOIC SANDSTONES AND SILTSTONES FROM THE SOUTHERN REGIONS OF THE WEST SIBERIAN PLATE

A.D. Duchkov, D.E. Ayunov, L.S. Sokolova, P.A. Yan

We consider results of measurements of thermal conductivity, porosity, and permeability for 780 samples of Mesozoic sandstones and siltstones from the cores of 50 wells drilled in three southern regions of the West Siberian Plate (Novosibirsk and Tomsk regions, Surgut region of the Khanty-Mansi Autonomous Area). The thermal conductivity of the samples was measured twice: in dry and in water-saturated states. It has been established that the thermal conductivity of water-saturated rocks is on average 20–40 % higher. The thermal conductivities of dry and water-saturated samples show stable correlations between each other and with the sample porosity and permeability. These correlations can be used for the approximate estimation of the thermal conductivity of water-saturated rocks from the measured thermal conductivity of dry samples or even from the porosity values. The relationship between thermal conductivity and porosity can be used for the rapid assessment of rock porosity from the measured thermal conductivity of the core.

Mesozoic sandstones and siltstones, thermal conductivity, humidity, porosity, permeability, correlation, West Siberian Plate

ВВЕДЕНИЕ

Коэффициент теплопроводности (λ) характеризует способность горной породы передавать тепло от нагретой ее части к более холодной. Знание теплопроводности необходимо при оценке внутриземного теплового потока и глубинных температур при проведении термогидродинамического и бассейнового моделирования, расчете теплообменных процессов в горных породах. Вся информация о теплопроводности горных пород основывается на результатах измерения их образцов в лабораторных условиях, так как до сих пор отсутствует надежная аппаратура для измерения тепловых свойств горных пород непосредственно в скважине. Многолетние исследования показали, что теплопроводность горных пород определяется их структурно-минералогической характеристикой, пористостью (ϕ) и проницаемостью (k), а также типом флюида, заполняющего поры (газ, вода, нефть). Среди горных пород наиболее сложным объектом для изучения теплопроводности являются осадочные породы вследствие их высокого разнообразия и неоднородности.

Активное измерение теплопроводности пород осадочного чехла Западно-Сибирской плиты началось в середине прошлого столетия в связи с постановкой геотермических исследований, направленных на изучение теплового потока [Курчиков, Ставицкий, 1987; Тепловое поле..., 1987; Теплофизические свойства..., 1987; Балобаев, 1991]. Измерения проводились в основном на сухих образцах с помощью различной, часто самодельной, аппаратуры, требующей предварительной сложной подготовки образцов (вырезание таблеток, сверление отверстий и др.). Накопленная при изучении теплового потока информация о теплопроводности осадочных пород Западно-Сибирской плиты оказалась в целом малоприменимой для сопоставления данных, полученных разными исследователями, из-за проблем с подбором коллекций образцов, различий в аппаратуре и методиках измерений.

Новый этап изучения теплопроводности осадочных пород Западно-Сибирской плиты начался после создания в нашей стране таких приборов, как «Компаратор теплопроводности» (КТ) [Калинин, 1981] и «Измеритель теплопроводности сканирующий» (ИТС) [Попов и др., 1983], позволяющих выполнять высокоточные экспрессные измерения тепловых свойств пород при минимальной их подготовке. Использование этой аппаратуры привело к существенному увеличению объема экспериментальных данных за сравнительно короткое время. В первую очередь необходимо отметить измерение тепловых свойств более 1600 образцов песчаников, алевролитов, базальтов из 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 осадочного чехла Западно-Сибирской плиты (от отложений мела до триаса). В этот же период этим коллективом были выполнены исследования связи теплопроводности осадочных пород Широкого Приобья с другими физическими свойствами [Роров et al., 2003]. В результате выявлены достаточно тесные линейные и экспоненциальные зависимости, связывающие λ образцов с их пористостью и проницаемостью. Позднее тем же коллективом выполнены обширные теплофизические исследования образцов пород баженновской свиты из керна скважин, пробуренных в пределах Сургутского и Нижневартовского сводов Западно-Сибирской плиты [Попов и др., 2017].

Определенный вклад в изучение теплопроводности пород осадочного чехла Западно-Сибирской плиты внесли и авторы данного сообщения, выполнив в 2010—2011 гг. измерения теплопроводности сухих и водонасыщенных образцов из кернов 28 скважин северо-восточной части плиты в Енисей-Хатангском и Предьенисейском прогибах, а также в Салымском районе [Дучков и др., 2013, 2014, 2016]. Позднее, в 2015—2016 гг., авторами получены новые данные о теплопроводности образцов осадочных пород из керна скважин южных районов Западно-Сибирской плиты. Первое упоминание об этой работе содержится в статье [Дучков и др., 2018]. В настоящем сообщении обсуждаются результаты этих последних исследований. Основное внимание обращается на оценку средних характеристик теплопроводности сухих и водонасыщенных пород, выяснение зависимостей теплопроводности от влажности пород, их пористости и проницаемости.

ОПИСАНИЕ КОЛЛЕКЦИЙ ОБРАЗЦОВ

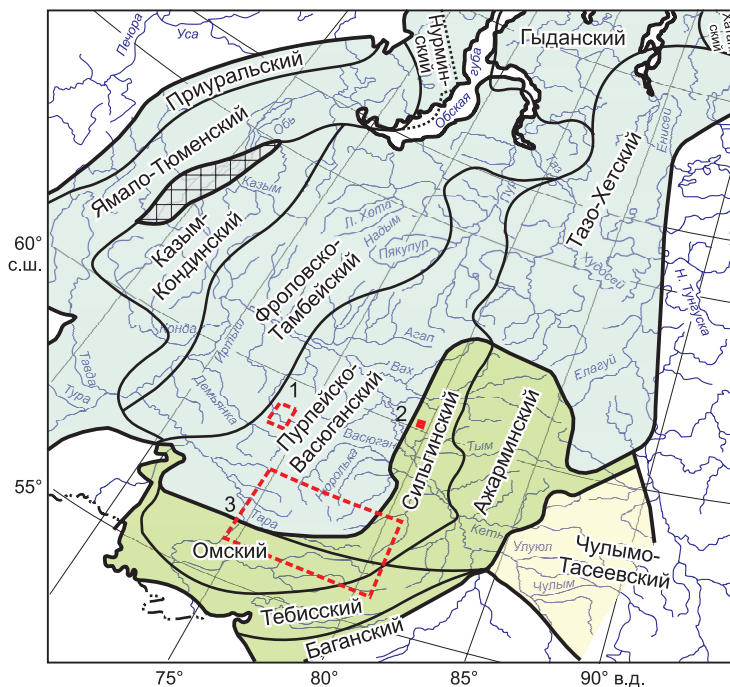
Измерена теплопроводность трех коллекций образцов из керна ряда скважин Сургутского района ХМАО и северной части Новосибирской области, а также из керна Западно-Тымской параметрической скв. № 1 (Томская область). Расположение указанных объектов показано на рис. 1. Все образцы представлены для измерений теплопроводности лабораторией седиментологии ИНГГ СО РАН, в которой также выполнены определения пористости и проницаемости пород.

Коллекция 1 (К1). Образцы, составившие эту коллекцию, отобраны из керна шести скважин (№ 63, 210, 258, 449, 485, 591), пробуренных на Тайлаковском участке в Сургутском районе ХМАО. В тектоническом отношении участок расположен на южном борту Юганской мегавпадины в зоне ее сочленения с Демьянским мегавалом. Коллекция включает 128 образцов мелкозернистых песчаников и алевролитов, отобранных из тюменской свиты ($J_{1,2}$) в интервале глубин 2711—2868 м. Во всех образцах измерены пористость и проницаемость. Значения ϕ изменяются от 3 до 21 %, проницаемость образцов варьирует от 0 до 671 мД. Средние значения ϕ и k составляют 15 % и 20 мД.

Коллекция 2 (К2). В эту коллекцию вошли 112 образцов песчаников и алевролитов мелового и юрского возрастов, отобранных из керна Западно-Тымской параметрической скв. № 1. Скважина пробурена в 2003 г. на северо-западе Томской области в зоне сочленения Усть-Тымской мегавпадины и Александровского свода [Костырева и др., 2014]. Из отложений нижнего мела (K_1) отобрано 24 образца (инт. 1600—2302 м), из васюганской свиты (J_3) — 8 образцов (инт. 2644—2673 м), из отложений средней и нижней юры (тюменская, салатская, тогурская свиты) — 80 образцов с глубины 2700—3175 м. Пористость измерена во всех образцах, проницаемость — в 100 образцах. Пористость образцов изменяется от 5 до 25 %, а k — от 0 до 1380 мД. Средние значения ϕ и k составляют 13.3 % и 63.8 мД. При поисках корреляционных связей авторы использовали только основную часть коллекции К2, а именно результаты измерений образцов из отложений средней и нижней юры.

Рис. 1. Расположение участков отбора коллекций образцов для последующего измерения теплопроводности:

1 — Тайлаковский участок (Ханты-Мансийская автономная область); 2 — Западно-Тымская параметрическая скв. № 1 (Томская область); 3 — участки в северной части Новосибирской области. Цветом выделены фациальные области морского (светло-голубой), переходного (зеленый) и континентального (светло-желтый) седиментогенеза келловоя и верхней юры Западной Сибири [Хабаров и др., 2009].



Коллекция 3 (К3) является наиболее представительной и сложной. Она включает 540 образцов песчаников и алевролитов юрского возраста (327 образцов из васюганской свиты, остальные из тюменской свиты) из кернов 43 скважин, пробуренных в 1973—1995 гг. на 25 участках в северной части Новосибирской области. КERN отбирали для проведения седиментологических исследований с целью выделения и прогнозирования коллекторов в средневерхнеюрских отложениях [Хабаров и др., 2009]. В коллекции представлены образцы со следующих участков (с запада на восток): Рифтовый, Узасский, Чековский, Верхнечековский, Тракторный, Оптимистический, Межовский, Еласский, Майзасский, Веселовский, Биазинский, Заречный, Надеждинский, Верхнетарский, Южно-Тарский, Восточно-Тарский, Дедовский, Ракитинский, Южно-Ракитинский, Тайдасский, Пешковский, Восточный, Касманский, Пограничный, Западно-Калгачский. Территория исследования располагается в зоне сочленения Пурейско-Васюганского, Омского и Сильгинского структурно-фациальных районов. В тектоническом отношении территория исследования (протяженность 240 км в широтном направлении и порядка 100 км в меридиональном) приурочена к Северо-Межовской мегаантиклинали и южной части Колтогорско-Нюрольского желоба. На каждом участке отбирали разное количество образцов (от 10 до 55) из керна разного количества скважин (от 1 до 4). Максимальный разброс глубин отбора в пределах одной скважины достигал 234 м (скв. Биазинская-1), а общий диапазон глубин отбора образцов коллекции К3 составлял от 2315.9 м (скв. Веселовская-5) до 2991 м (скв. Восточная-2) в пределах всей этой огромной площади. Пористость измерена для 522 образцов, проницаемость — для 390 образцов (исключены образцы плохо проницаемых пород с $k < 0.001$ мД). Пористость образцов изменяется от 0.7 до 21.6 %, проницаемость — от 0 до 405.4 мД. Средние значения ϕ и k составляют 12 % и 15.3 мД.

Таким образом, подавляющее большинство образцов этих коллекций отобрано из тюменской и васюганской свит, которые являлись целевыми объектами работ разных лет, и представлено в основном алевритопесчаными породами, что связано с опробованием потенциальных гранулярных коллекторов. В основном это песчаники мелко-, среднелкозернистые и алевролиты крупнозернистые, в подчиненных количествах присутствуют образцы мелкозернистых алевролитов и крупносреднезернистых песчаников. Обломочный материал имеет преимущественно полимиктовый состав со значительными вариациями содержания отдельных компонентов. Как правило, преобладают кварц и обломки пород при пониженном содержании полевых шпатов. Цемент преимущественно глинисто-карбонатный. Примерно в 80 % образцов его содержание не превышает 25 %. Около 10 % выборки характеризуются содержанием существенно карбонатного цемента от 40 до 70 % и, по сути, относится уже к переходным терригенно-карбонатным породам с очень низкими значениями пористости и межзерновой проницаемости. Пористость образцов всех коллекций изменяется от десятых долей процента до 25 %, а проницаемость — от 0 до 1380 мД.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения теплопроводности выполнены на приборе «Измеритель теплопроводности сканирующий» (ИТС) [Попов и др., 1983] методом оптического сканирования, который основан на нагреве поверхности образца подвижным точечным источником тепловой энергии (специальная электролампа с

отражателем, температура светового пятна порядка 40 °С) и регистрации приращений температуры нагреваемой поверхности подвижным инфракрасным радиометром. Определение λ осуществляется путем автоматического сравнения приращений температур на изучаемом образце и на двух эталонах с известной теплопроводностью, размещенных до и после образца. Прибор выполняет бесконтактные измерения λ на любой плоской или цилиндрической поверхности, которая не требует шлифовки, если неровности не превышают ± 0.5 мм. Подготовка образца перед измерением заключается только в нанесении на его поверхность вдоль линии сканирования полосы черной эмали шириной порядка 10 мм. Скорость сканирования составляет 4 мм/с, что позволяет измерить 20—30 образцов в час. Погрешность измерений 3—4 %.

Все образцы представляли стандартные керны: цилиндры диаметром 3.7—3.8 см и высотой 4—6 см, вырезанные из полноразмерного керна перпендикулярно его оси (параллельно слоистости). Именно стандартные керны используются на практике при изучении фильтрационно-емкостных свойств пород. Определение пористости и проницаемости выполнено на автоматическом порозиметре-пермеатре AP-608. В выборках данных рассматривались результаты, полученные в атмосферных условиях.

Сканирование (измерение теплопроводности) осуществлялось по боковой цилиндрической поверхности стандартного керна. Для образцов с выраженной слоистостью измерения проводились по линии параллельной плоскости напластования. Таким образом, измеренные значения λ отражают преимущественно теплопроводность по направлению, перпендикулярному слоистости, что в условиях горизонтальной слоистости должно соответствовать теплопроводности, формирующей вертикальную составляющую теплового потока.

В естественных условиях осадочные породы обычно полностью насыщены водой. Поэтому теплопроводность образцов измерялась дважды — сначала в сухом (λ_c), а затем в водонасыщенном (λ_b) состояниях. Насыщение образцов водой осуществлялось в лаборатории седиментологии ИНГГ СО РАН по стандартной методике под вакуумом. После насыщения образцы помещали в сосуд с водой, откуда их извлекали для проведения измерений λ .

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Сводные результаты измерений теплопроводности сухих и водонасыщенных образцов из всех коллекций представлены в табл. 1. На рисунке 2 показаны гистограммы значений λ_c и λ_b для наиболее обширной коллекции К3. Так как во всех коллекциях представлены относительно близкие по составу породы, отобранные примерно из одного глубинного интервала, то естественно, что они характеризуются близкой теплопроводностью несмотря на географическую удаленность и разбросанность участков отбора образцов. Теплопроводность сухих пород (λ_c) всех коллекций изменяется от 1.0 до 2.7 Вт/(м·К), их среднее значение составляет 2.0—2.2 Вт/(м·К). Такие же средние значения λ_c получены для образцов васюганской и тюменской свит.

После насыщения водой теплопроводность пород (λ_b) существенно возрастает, что объясняется многократным различием теплопроводности воды и воздуха (0.6 и 0.025 Вт/(м·К) соответственно). Теплопроводность водонасыщенных пород всех коллекций варьирует от 2.0 до 3.5 Вт/(м·К), среднее значение λ_b составляет 2.7—2.8 Вт/(м·К) (см. табл. 1; рис. 2). Примерно в тех же пределах возрастает после

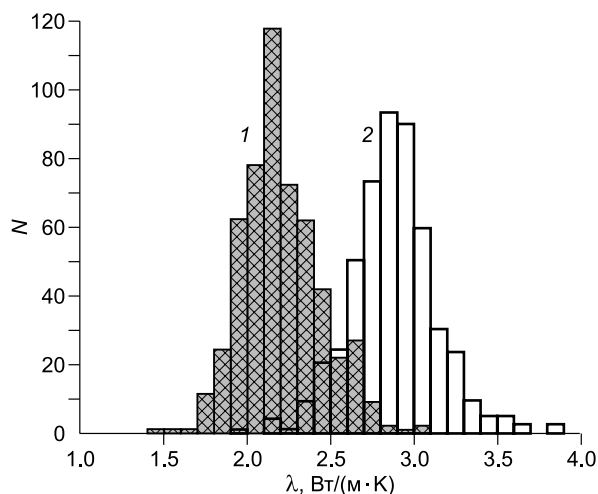
Таблица 1. Теплопроводность образцов мезозойских песчаников и алевролитов из керна скважин южных районов Западно-Сибирской плиты

Коллекция образцов	Часть коллекции	Число образцов	Теплопроводность, Вт/(м·К)		λ_b/λ_c
			λ_c	λ_b	
K1	Все образцы (Тюменская свита, J _{1,2})	128/128	(1.5—2.7)/2.0	(2.3—3.4)/2.8	1.4
K2	Все образцы, K ₁ –J _{1,2}	111/111	(1.7—2.7)/2.2	(2.1—3.3)/2.7	1.2
K2	Тюменская свита, J _{1,2}	80/80	(1.8—2.6)/2.2	(2.0—3.2)/2.7	1.2
K3	Все образцы, J ₃ –J _{1,2}	536/500	(1.0—2.7)/2.0	(2.2—3.5)/2.8	1.4
K3	Васюганская свита, J ₃	327/300	(1.6—2.7)/2.1	(2.1—3.6)/2.9	1.3
K3	Тюменская свита, J _{1,2}	196/192	(1.6—2.7)/2.0	(2.0—3.6)/2.7	1.35

Примечание. K1, K2, K3 — коллекции образцов из керна скважин Тайлаковского участка (Сургутский район ХМАО), из керна Западно-Тымской параметрической скважины № 1 (Томская область), из керна скважин северной части Новосибирской области, соответственно; «Число образцов»: первое значение — число сухих образцов, второе — число водонасыщенных образцов; «Теплопроводность»: цифры в скобках — диапазон изменений λ_c и λ_b , последнее число — средние значения λ_c и λ_b ; λ_b/λ_c — отношение средних значений λ_b и λ_c .

Рис. 2. Гистограммы значений теплопроводности юрских песчаников и алевролитов из керна скважин, пробуренных в северной части Новосибирской области (коллекция К3):

1 — сухие образцы ($N = 536$), 2 — водонасыщенные образцы ($N = 500$). N — количество образцов.



насыщения водой теплопроводность образцов васюганской и тюменской свит. Таким образом, теплопроводность водонасыщенных осадочных пород изученных коллекций в среднем на 20—40 % превышает теплопроводность тех же, но сухих пород. Приведенные оценки показывают, насколько существенно зависит теплопроводность осадочных пород от пористости и типа флюида, заполняющего поровое пространство (в нашем случае воздух или вода). Столь же значительной может быть ошибка при оценке теплопроводности геологического разреза или величины теплового потока при использовании значений λ_c вместо λ_b .

КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ СВЯЗИ МЕЖДУ ПАРАМЕТРАМИ

Экспериментальное изучение физических свойств осадочных горных пород в лабораторных условиях представляет длительный и трудоемкий процесс, включающий отбор образцов, подготовку их и аппаратуры к измерениям, само измерение. Особенно затруднена работа с высокопористыми и слабоцементированными осадочными породами, которые часто разрушаются при насыщении образцов флюидами или при повторных измерениях. В этой ситуации весьма актуальной задачей является поиск корреляционных связей между измеренными параметрами. Установленные таким образом корреляции позволяют оценивать, хотя бы и грубо, значения тех или иных параметров через другие, уже известные, минуя необходимость их измерений. Авторы использовали полученные результаты измерений λ_c , λ_b , ϕ , k для поисков корреляционных связей между этими параметрами, анализируя образцы отдельных коллекций, а также из тюменской и васюганской свит. Представляющие интерес корреляционные зависимости сведены в табл. 2 (их номера указаны в первом столбце).

Сопоставление значений ϕ и k . При проведении седиментологических исследований керна выполнено значительное количество определений пористости и проницаемости образцов пород. Краткие сведения об изменениях этих параметров даны при описании отдельных коллекций образцов. При отыскании корреляционной связи между значениями ϕ и k в связи с существенным диапазоном изменения проницаемости были использованы, как обычно, значения логарифма проницаемости ($\lg k$). Поэтому все измеренные значения k перед сопоставлением с другими параметрами пересчитывались в значения $\lg k$. Сопоставление значений ϕ и $\lg k$ для образцов отдельных коллекций показало, что между этими параметрами существуют устойчивые линейные положительные связи. Уравнения корреляции приведены в табл. 2 (уравнения (1)—(3), достоверность аппроксимации $R^2 = 0.43—0.73$). Наиболее тесная связь между ϕ и k зафиксирована для набора образцов из Западно-Тымской скважины №1 (коллекция К2).

Сопоставление значений λ_c и λ_b . Сопоставление пар значений λ_c и λ_b показало, что для изученных образцов в объемах отдельных коллекций и свит существуют линейные положительные корреляционные зависимости, отличающиеся разной достоверностью аппроксимации. При проведении корреляций значения λ_c изменялись в пределах 1.3—3.0 Вт/(м·К), а λ_b — в пределах 1.9—3.8 Вт/(м·К). Сведения о наборах образцов и соответствующих уравнениях регрессии приведены в табл. 2 (уравнения (4)—(8)). Наиболее достоверная аппроксимация ($R^2 = 0.33—0.44$) фиксируется по результатам измерений теплопроводности образцов тюменской свиты из керна скважин Тайлаковского участка и Западно-Тымской скважины № 1 (уравнения (4) и (5)). Значительно слабее ($R^2 = 0.21$) положительная корреляция между значениями λ_c и λ_b образцов более масштабной коллекции К3 (уравнение (6)). Для этой зависимости характерен существенный разброс точек в пределах корреляционного поля (рис. 3).

По-видимому, это связано с тем, что коллекция К3 характеризует значительный стратиграфический диапазон и наибольшую территорию по сравнению с коллекциями К1 и К2. Кроме того, формирование этих отложений происходило на южной окраине бат-верхнеюрского седиментационного бассейна, где колебания относительного уровня моря были наиболее контрастными. Бат-верхнеюрские песчаные пласты здесь накапливались в широком спектре континентальных, переходных и морских

Таблица 2. Корреляционные зависимости между теплопроводностью, пористостью и проницаемостью образцов юрских песчаников и алевролитов, отобранных из керна скважин южных районов Западно-Сибирской плиты

№ п/п	Коллекция	Часть коллекции	Параметр	Число образцов	Уравнение регрессии	R^2	Изменения параметров при проведении корреляции
Сопоставление значений ϕ и k							
1	K1	Тюменская свита, J_{1-2}	$\phi - k$	118	$\phi = 13.45 + 2.26 \lg k$	0.69	$\phi: 5...25\%$; $k: 0.01...1380$ мД
2	K2	Тюменская—тогурская свиты, J_{1-2}	$\phi - k$	72	$\phi = 13.45 + 5 \lg k$	0.73	
3	K3	Все образцы, J_3-J_{1-2}	$\phi - k$	374	$\phi = 11.94 + 5.88 \lg k$	0.43	
Сопоставление значений λ_c и λ_b							
4	K1	Тюменская свита, J_{1-2}	$\lambda_c - \lambda_b$	127	$\lambda_c = 0.24 + 0.64 \lambda_b$	0.44	$\lambda_c: 1.5...2.6$; $\lambda_b: 2.3...3.4$ Вт/(м·К)
5	K2	Тюменская—тогурская свиты, J_{1-2}	$\lambda_c - \lambda_b$	80	$\lambda_c = 0.69 + 0.57 \lambda_b$	0.33	$\lambda_c: 1.7...2.6$; $\lambda_b: 2.1...3.1$ Вт/(м·К)
6	K3	Все образцы, J_3-J_{1-2}	$\lambda_c - \lambda_b$	496	$\lambda_c = 0.9 + 0.44 \lambda_b$	0.21	$\lambda_c: 1.4...3.0$; $\lambda_b: 1.8...3.8$ Вт/(м·К)
7	K3	Васюганская свита, J_3	$\lambda_c - \lambda_b$	295	$\lambda_c = 0.91 + 0.43 \lambda_b$	0.19	—
8	K3	Тюменская свита, J_{1-2}	$\lambda_c - \lambda_b$	193	$\lambda_c = 1.05 + 0.38 \lambda_b$	0.19	—
Сопоставление значений λ_c и ϕ							
9	K1	Тюменская свита, J_{1-2}	$\lambda_c - \phi$	118	$\lambda_c = 2.54 - 0.039 \phi$	0.26	$\lambda_c: 1.5...2.6$ Вт/(м·К); $\phi: 8...21\%$
10	K2	Тюменская—тогурская свиты, J_{1-2}	$\lambda_c - \phi$	80	$\lambda_c = 2.60 - 0.036 \phi$	0.37	$\lambda_c: 1.7...2.7$ Вт/(м·К); $\phi: 4...25\%$
11	K3	Все образцы, J_3-J_{1-2}	$\lambda_c - \phi$	522	$\lambda_c = 2.46 - 0.034 \phi$	0.35	$\lambda_c: 1.5...3.0$ Вт/(м·К); $\phi: 0...22\%$
12	K3	Васюганская свита, J_3	$\lambda_c - \phi$	327	$\lambda_c = 2.49 - 0.034 \phi$	0.37	—
13	K3	Тюменская свита, J_{1-2}	$\lambda_c - \phi$	195	$\lambda_c = 2.51 - 0.043 \phi$	0.47	—
Сопоставление значений λ_b/λ_c и ϕ							
14	K1	Тюменская свита, J_{1-2}	$\lambda_b/\lambda_c - \phi$	121	$\lambda_b/\lambda_c = 1.13 + 0.019 \phi$	0.24	$\lambda_b/\lambda_c: 1.1...1.6$; $\phi: 3...21\%$
15	K2	Тюменская—тогурская свиты, J_{1-2}	$\lambda_b/\lambda_c - \phi$	80	$\lambda_b/\lambda_c = 1.0 + 0.021 \phi$	0.55	$\lambda_b/\lambda_c: 1.0...1.4$; $\phi: 4...25\%$
16	K3	Все образцы, J_3-J_{1-2}	$\lambda_b/\lambda_c - \phi$	480	$\lambda_b/\lambda_c = 1.04 + 0.027 \phi$	0.66	$\lambda_b/\lambda_c: 0.9...1.8$; $\phi: 0...22\%$
17	K3	Васюганская свита, J_3	$\lambda_b/\lambda_c - \phi$	290	$\lambda_b/\lambda_c = 1.05 + 0.027 \phi$	0.70	—
18	K3	Тюменская свита, J_{1-2}	$\lambda_b/\lambda_c - \phi$	193	$\lambda_b/\lambda_c = 1.02 + 0.03 \phi$	0.54	—
Сопоставление значений λ_b/λ_c и k							
19	K3	Все образцы, J_3-J_{1-2}	$\lambda_b/\lambda_c - \lg k$	356	$\lambda_b/\lambda_c = 1.39 + 0.075 \lg k$	0.32	$\lambda_b/\lambda_c: 1.0...1.8$; $\lg k: -2...+3.0$
20	K3	Васюганская свита, J_3	$\lambda_b/\lambda_c - \lg k$	221	$\lambda_b/\lambda_c = 1.37 + 0.08 \lg k$	0.37	$\lambda_b/\lambda_c: 1.0...1.8$; $\lg k: -2...+2.7$
21	K2	Тюменская свита, J_{1-2}	$\lambda_b/\lambda_c - \lg k$	71	$\lambda_b/\lambda_c = 1.26 + 0.058 \lg k$	0.31	$\lambda_b/\lambda_c: 1.0...1.4$; $\lg k: -2...+1.2$

Примечание. K1, K2, K3 — коллекции образцов из керна скважин Тайлаковского участка (Сургутский район ХМАО), из керна Западно-Тымской параметрической скважины №1 (Томская область), из керна скважин северной части Новосибирской области соответственно; R^2 — величина достоверности аппроксимации.

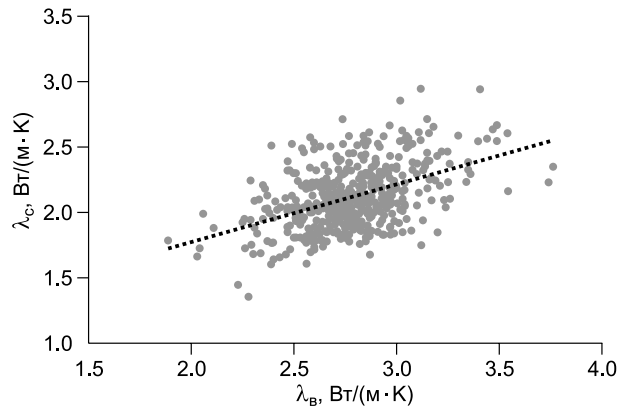
обстановок седиментации, специфические условия седиментогенеза в которых сказывались впоследствии и на особенностях преобразования отложений в диа- и катагенезе. Корреляционные зависимости отдельно для образцов тюменской и васюганской свит коллекции K3 характеризуются близкими, но малодостоверными уравнениями регрессии (уравнения (7) и (8), $R^2 = 0.19$).

Таким образом, все изученные наборы образцов характеризуются наличием разных по качеству корреляционных связей между значениями теплопроводности сухих и водонасыщенных пород. Это позволяет, используя формулы (4)–(8), с разной степенью достоверности оценивать теплопроводность водонасыщенных образцов по значениям λ_c , если непосредственные измерения λ_b выполнить невозможно по каким-либо причинам.

Сопоставление значений λ_c и ϕ , k . Пористость, определяющая объем породы, заполненный флюидом, оказывает существенное влияние на теплопроводность пород. При увеличении пористости в сухой породе увеличивается количество воздуха, плохо проводящего тепло, и, соответственно, уменьшается эффективная теплопроводность образца. Между λ_c и ϕ обычно наблюдается обратная корреля-

Рис. 3. Корреляционная зависимость между измеренными значениями теплопроводности сухих (λ_c) и водонасыщенных (λ_b) образцов коллекции КЗ.

Линия — уравнение регрессии $\lambda_c = 0.90 + 0.44 \lambda_b$ ($R^2 = 0.21$, $N = 496$). Здесь и далее: R^2 — параметр, характеризующий степень достоверности линейной аппроксимации, N — число образцов.



ция, более тесная при измерении параметров на одних и тех же образцах. Авторы проверили, как и в предыдущем случае, характер корреляции между λ_c и ϕ для образцов всех коллекций и отдельных свит. В разных наборах образцов их пористость изменялась от 0 до 25 %, а λ_c — от 1.5 до 3.0 Вт/(м·К). Полученные уравнения регрессии приведены в табл. 2 (уравнения (9)—(13)).

Наиболее слабая корреляция между λ_c и ϕ (уравнение (9), $R^2 = 0.26$) установлена для К1, хотя собранные в ней образцы характеризуются высокой пористостью (среднее $\phi = 15$ %). Более четкие корреляции присущи образцам из керна Западно-Тынской скважины (уравнение (10), $R^2 = 0.37$) и скважин Новосибирской области (уравнения (11)—(13), $R^2 = 0.35$ — 0.47). Сопоставление значений λ_c и ϕ для всех образцов коллекций КЗ показано на рис. 4.

Таким образом, обратные зависимости установлены между значениями λ_c и ϕ для всех изученных наборов образцов. Они характеризуются более высокой достоверностью, чем ранее рассмотренные связи между λ_c и λ_b . Полученные формулы (9)—(13) можно использовать для приближенной оценки λ_c песчаников и алевролитов из юрских отложений в южной части Западно-Сибирской плиты по измеренным значениям пористости. Эти же формулы позволяют оценить ϕ по значениям теплопроводности сухих пород.

Изменения пористости водонасыщенных пород отражаются на значениях λ_b заметно слабее, так как контраст теплопроводности минерального скелета (λ_m) породы и воды, заполняющей поры, много меньше, чем контраст λ_m и λ воздуха. Вероятно, поэтому для разных наборов образцов авторы выявили наличие только слабых корреляционных зависимостей между λ_b и ϕ с достоверностью аппроксимаций не более $R^2 = 0.01$ — 0.06 .

Связи между λ_c и ϕ (уравнения (9)—(13)) позволяют оценить среднюю теплопроводность минерального скелета изучаемых пород (λ_m) при задании $\phi = 0$. Зависимости для разных наборов образцов показывают, что в песчаниках и алевролитах изучаемых коллекций λ_m изменяется незначительно — в пределах 2.5—2.6 Вт/(м·К). Однако известны и более существенные изменения λ_m в породах осадочного чехла Западной Сибири. Так, в работе [Роров et al., 2003] отмечается, что песчаники и алевролиты из мезозойских отложений Широтного Приобья характеризуются значениями $\lambda_m = 3.2$ — 3.6 Вт/(м·К).

Выше было показано существование корреляционных связей между пористостью и проницаемостью, а также между пористостью и теплопроводностью изучаемых наборов образцов. Следовательно, можно предположить, что возможно существование зависимости также и между проницаемостью и теплопроводностью. Авторы сопоставили значения λ_c и λ_b с k ($\lg k$) разных наборов образцов из коллекций К1—КЗ. Выполненный анализ показал, что, несмотря на ожидание, значимой корреляции между теплопроводностью и проницаемостью для всех изученных групп образцов не наблюдается.

Сопоставление значений λ_b/λ_c и ϕ , k . Ранее было предложено [Роров et al., 2003; Попов и др., 2008] использовать отношение λ_b/λ_c при поисках корреляционных связей теплопроводности с пористостью и проницаемостью. Это позволяет вклю-

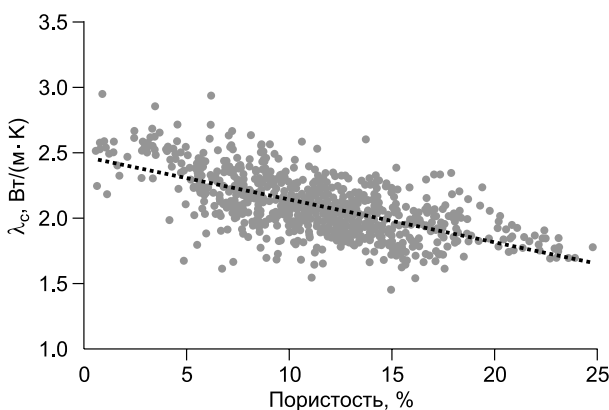


Рис. 4. Корреляционная зависимость между измеренными значениями теплопроводности сухих пород (λ_c) и пористости (ϕ) всех образцов из коллекции КЗ.

Линия — уравнение регрессии $\lambda_c = 2.46 - 0.034 K_\phi$ ($R^2 = 0.35$, $N = 522$).

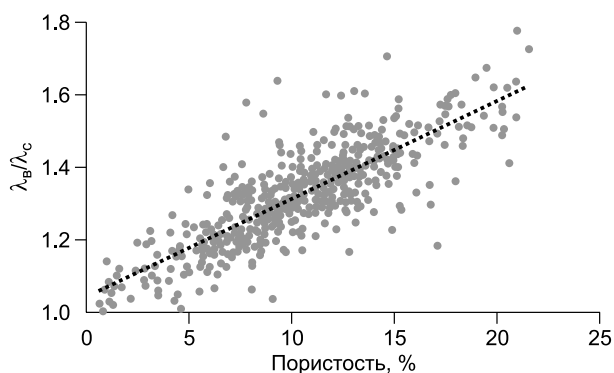


Рис. 5. Корреляционная зависимость между значениями пористости (ϕ) и отношения теплопроводности водонасыщенных и сухих образцов ($\lambda_{\text{в}}/\lambda_{\text{с}}$) коллекции КЗ.

Линия — уравнение регрессии: $\lambda_{\text{в}}/\lambda_{\text{с}} = 1.04 + 0.027 \phi$ ($R^2 = 0.66$, $N = 480$).

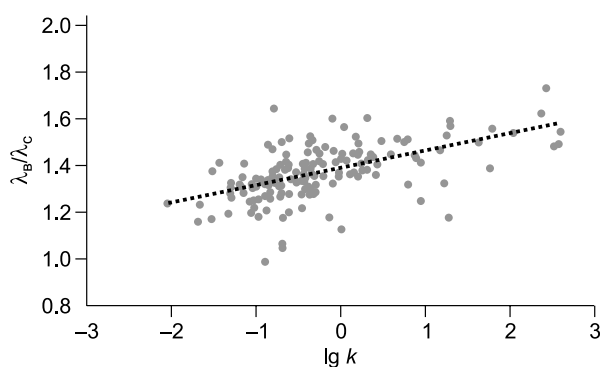


Рис. 6. Корреляционная зависимость между значениями логарифма проницаемости ($\lg k$) и отношения теплопроводности водонасыщенных и сухих образцов ($\lambda_{\text{в}}/\lambda_{\text{с}}$) коллекции КЗ.

Линия — уравнение регрессии: $\lambda_{\text{в}}/\lambda_{\text{с}} = 1.39 + 0.075 \lg k$ ($R^2 = 0.32$, $N = 356$).

чить в процедуру поисков корреляционных связей уже три измеряемых параметра. При сопоставлении значений $\lambda_{\text{в}}/\lambda_{\text{с}}$ и ϕ пористость образцов в разных наборах изменялась от 0 до 25 %, а $\lambda_{\text{в}}/\lambda_{\text{с}}$ — от 0.9 до 1.8. Сведения о наборах образцов и полученные уравнения корреляции указаны в табл. 2 (уравнения (14)—(18)). На этот раз наиболее четкая линейная корреляция получена для образцов из коллекции КЗ (уравнение (16), $R^2 = 0.66$). Эта корреляция показана на рис. 5. Идентичное уравнение корреляции зафиксировано и для образцов, отобранных из васюганской свиты (уравнение (17), $R^2 = 0.7$). Остальные наборы образцов также характеризуются устойчивыми линейными корреляционными связями. Подобные зависимости получены ранее для образцов из ядра скважин Широкого Приобья: $\lambda_{\text{в}}/\lambda_{\text{с}} = 0.93 + 0.041 \phi$ ($R^2 = 0.79$) [Поров et al., 2003]; из ядра Ен-Яхинской сверхглубокой скважины — $\lambda_{\text{в}}/\lambda_{\text{с}} = 0.95 + 0.027 \phi$ ($R^2 = 0.72$) [Попов и др., 2008]; из ядра скважин северо-восточной части Западно-Сибирской плиты: $\lambda_{\text{в}}/\lambda_{\text{с}} = 1.04 + 0.03 \phi$ ($R^2 = 0.69$) [Дучков и др., 2018]. Данные связи позволяют достаточно уверенно прогнозировать значения теплопроводности водонасыщенных пород по результатам измерений $\lambda_{\text{с}}$ и ϕ . Такой подход особенно важен при изучении высокопористых и слаболитифицированных пород, которые быстро разрушаются при насыщении водой. Весьма важно также, что указанные связи могут быть использованы для оценки пористости пород по результатам измерений сухих и водонасыщенных ядер.

Между значениями проницаемости и $\lambda_{\text{в}}/\lambda_{\text{с}}$ устойчивая линейная корреляция обнаружена только для образцов коллекции КЗ (рис. 6); образцов, отобранных из васюганской свиты (коллекция КЗ) и из тюменской свиты (коллекция К2) (уравнения (19)—(21), $R^2 = 0.32$ —0.37). Остальные группы образцов показали очень слабую связь параметров ($R^2 = 0.09$ —0.11). Формулы (19)—(21) могут быть использованы для оценки $\lambda_{\text{в}}$ по $\lambda_{\text{с}}$ и k , или k по $\lambda_{\text{с}}$ и $\lambda_{\text{в}}$. Кстати, подобная корреляционная связь получена авторами ранее для песчаников и алевролитов из ядра скважин северо-восточной части Западно-Сибирской плиты [Дучков и др., 2018].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследований авторами выполнено изучение трех коллекций образцов (всего 780 образцов) мезозойских песчаников и алевролитов из ядра 50 скважин, пробуренных в южной части Западно-Сибирской плиты. Теплопроводность образцов измерена как в сухом, так и в водонасыщенном состоянии на приборе «Измеритель теплопроводности сканирующий». Пористость и проницаемость определены для 750 и 610 образцов соответственно. Теплопроводность осадочных пород определяется в первую очередь пористостью и типом флюида (воздух, вода), заполняющего поры. В наших экспериментах после насыщения водой теплопроводность песчаников и алевролитов (средняя пористость 12—15 %) возросла в среднем на 20—40 %. Эти данные свидетельствуют, насколько важно использовать при различных геотермических оценках именно соответствующие значения коэффициента теплопроводности, хотя бы оцененные по эмпирическим корреляционным связям. Несомненна актуальность поисков таких связей между теплопроводностью и факторами, ее определяющими. Авторы использовали

полученные экспериментальные данные для установления взаимосвязей между теплопроводностью сухих и водонасыщенных образцов, пористостью и проницаемостью. Сравнивались результаты измерений образцов каждой из коллекций К1—К3 в отдельности, а также образцов из васюганской и тюменской свит. Полученные уравнения регрессии сведены в табл. 2.

Первые три уравнения фиксируют линейные положительные связи, существующие между значениями пористости и проницаемости для образцов коллекций К1—К3 (уравнения (1)—(3)). Для всех обозначенных выше наборов образцов установлено наличие положительных корреляций (разных по качеству) между значениями теплопроводности сухих и водонасыщенных пород (уравнения (4)—(8)) и обратные взаимозависимости между значениями λ_c и ϕ (уравнения (9)—(13)). Последние регрессии характеризуются более высокой достоверностью. Наиболее уверенные корреляционные связи получены при сравнении λ_v/λ_c и ϕ (уравнения (14)—(18)). Очевидно, что относительное увеличение теплопроводности при водонасыщении (λ_v/λ_c) более тесно связано с пористостью пород, чем отдельные значения λ_c и λ_v . Несмотря на наличие корреляционных связей как между ϕ и k , так и между λ_c и ϕ , существование зависимости между теплопроводностью и проницаемостью установлено только при сопоставлении значений λ_v/λ_c и k и только для трех наборов образцов (уравнения (19)—(21)).

Полученные корреляционные зависимости (см. табл. 2), несомненно, представляют практический интерес. Во-первых, часть из них (уравнения (4)—(8)) может быть использована для приближенной оценки λ_v по измеренным значениям теплопроводности сухих пород, если непосредственные измерения водонасыщенных образцов выполнить невозможно по каким-либо причинам. Формулы (14)—(18) дают возможность более достоверно оценить λ_v уже по двум измеренным параметрам — по λ_c и ϕ . Такой подход особенно важен при изучении высокопористых и слаболитифицированных пород, которые быстро разрушаются при насыщении водой. Формулы (9)—(13) позволяют оценить λ_c песчаников и алевролитов из юрских отложений в южной части Западно-Сибирской плиты по измеренным значениям пористости. Весьма важно, что эти же корреляционные связи λ_c и λ_v/λ_c с пористостью позволяют оценить ϕ по измерениям теплопроводности пород. Теплопроводность пород (особенно сухих) измеряется намного проще и быстрее, чем пористость (и проницаемость), особенно при использовании современной аппаратуры типа ИТС. Используя опережающие измерения теплопроводности зерна, можно выявить высокопористые интервалы в разрезе, которые в дальнейшем можно более детально изучить традиционными методами.

Выявленные корреляционные связи представляют интерес в случае необходимости выполнения оперативной оценки тепловых и структурных свойств осадочных пород рассмотренных регионов в случае отсутствия экспериментального материала. Они существенно дополняют уже имеющиеся данные, но, конечно, требуют дальнейшего уточнения. Необходимо продолжить работу по увеличению объема выборок измеренных параметров для разных типов пород из разных геологических провинций, а также по анализу и уточнению рассмотренных в статье корреляционных зависимостей.

Исследование выполнено по плану базовых научно-исследовательских работ Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН (проекты № 0331-2019-0012 и 0331-2019-0021) при поддержке проекта РФФИ №18-45-540004 p_a.

ЛИТЕРАТУРА

- Балобаев В.Т.** Геотермия мерзлой зоны литосферы севера Азии. Новосибирск, Наука, 1991, 194 с.
- Дучков А.Д., Соколова Л.С., Аюнов Д.Е., Злобина О.Н.** Теплопроводность пород осадочного чехла арктической части Западной Сибири // Геология и геофизика, 2013, т. 54 (12), с. 1952—1960.
- Дучков А.Д., Соколова Л.С., Родякин С.В., Черныш П.С.** Зависимость теплопроводности пород осадочного чехла Западно-Сибирской плиты от влажности и пористости // Геология и геофизика, 2014, т. 55 (5—6), с. 991—1000.
- 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, т. 57 (7), с. 1367—1380.
- Дучков А.Д., Аюнов Д.Е., Родякин С.В., Ян П.А.** Изучение взаимосвязей между теплопроводностью и пористостью, проницаемостью, влажностью осадочных пород Западно-Сибирской плиты // Георесурсы, 2018, т. 20, № 4, с. 396—403.
- Калинин А.Н.** Прибор с прямым отсчетом коэффициента теплопроводности твердых тел произвольной формы // Промышленная теплотехника, 1981, т. 3, № 1, с. 48—53.
- Костырева Е.А., Москвин В.И., Ян П.А.** Геохимия органического вещества и нефтегенерационный потенциал нижнеюрской тогурской свиты (юго-восток Западной Сибири) // Нефтегазовая геология. Теория и практика, 2014, т. 9, № 1, http://www.ngtp.ru/rub/1/13_2014.pdf.
- Курчиков А.Р., Ставицкий Б.П.** Геотермия нефтегазоносных областей Западной Сибири. М., Недра, 1987, 134 с.

Попов Ю.А., Семенов В.Г., Коростелев В.М., Березин В.В. Бесконтактное определение теплопроводности горных пород с помощью подвижного источника тепла // Изв. АН СССР. Физика Земли, 1983, № 7, с. 86—93.

Попов Ю.А., Ромушкевич Р.А., Попов Е.Ю. Теплофизические исследования пород разреза Тюменской сверхглубокой скважины // Тюменская сверхглубокая скважина (интервал 0—7502 м). Пермь, КамНИИКИГС, 1996, с. 163—175.

Попов Ю.А., Ромушкевич Р.А., Горобцов Д.Н., Коробков Д.А., Есипко О.А., Карасева Т.В., Сиротенко Л.В. Тепловые свойства пород и тепловой поток в районе бурения сверхглубокой Ен-Яхинской скважины // Изв. вузов. Геология и разведка, 2008, № 2, с. 59—65.

Попов Е.Ю., Ромушкевич Р.А., Габова А.В., Савельев Е.Г., Попов Ю.А., Романов Ю.К., Спиридонов Д.А. Тепловые свойства пород баженовской свиты Сургутского и Нижневартовского сводов Западно-Сибирской плиты по результатам непрерывного профилирования керна // Конференция EAGE «Геомодель-2017» (Геленджик, Россия, 11—14 сентября 2017 г.). Геленджик, 2017, с. 1—4.

Тепловое поле недр Сибири / Ред. Э.Э. Фотиади. Новосибирск, Наука, 1987, 195 с.

Теплофизические свойства горных пород / В.В. Бабаев, В.Ф. Будымка, Т.А. Сергеева, М.А. Домбровский. М., Недра, 1987, 156 с.

Хабаров Е.М., Ян П.А., Вакуленко А.Г., Попов А.Ю., Плисов С.Ф. Палеогеографические критерии распределения коллекторов в средневерхнеюрских отложениях юга Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна // Геология нефти и газа, 2009, № 1, с. 26—33.

Popov Y., Tertychnyi V., Romushkevich R., Korobkov D., Pohl J. Interrelations between thermal conductivity and other physical properties of rocks: experimental data // Pure Appl. Geophys., 2003, v. 160, p. 1137—1161.

*Поступила в редакцию 12 февраля 2020 г.,
принята в печать 10 марта 2020 г.*