

## ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ПОРОД ОСАДОЧНОГО ЧЕХЛА АРКТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

А.Д. Дучков, Л.С. Соколова, Д.Е. Аюнов, О.Н. Злобина

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

Анализ публикаций по геотермии северных районов Сибири свидетельствует, что при оценке здесь теплового потока практически не проводились измерения теплопроводности ( $\lambda$ ) пород. Обычно при расчетах потока использовались значения  $\lambda = 1.8\text{--}2.0$  Вт/(м·К), взятые из литературных источников. Авторы статьи выполнили измерение теплопроводности образцов пород из кернов скважин, пробуренных в конце прошлого столетия в северо-восточной части Западно-Сибирской плиты (ЗСП) и в Енисей-Хатангском прогибе (ЕХП). Использовались приборы «Компаратор теплопроводности» и «Измеритель теплопроводности сканирующий». Всего измерена теплопроводность 305 образцов воздушно-сухих пород ( $\lambda_c$ ), отобранных в интервале 1100—4200 м из кернов 23 скважин. 77 образцов из этого массива были насыщены водой и измерена их теплопроводность в водонасыщенном состоянии ( $\lambda_w$ ). Установлено, что средние значения теплопроводности сухих и водонасыщенных осадочных пород составляют в среднем  $\lambda_c = 1.9 \pm 0.2$  и  $\lambda_w = 2.6 \pm 0.1$  Вт/(м·К) соответственно. Таким образом, реальные значения теплопроводности водонасыщенных пород осадочного чехла региона оказались примерно на 20—30 % выше ранее использовавшихся в процессе геотермических исследований. Это означает, что полученные ранее значения тепловых потоков в пределах ЕХП и сопредельных районах ЗСП должны быть увеличены на 20—30 %. Новые уточненные данные о теплопроводности могут привести к существенной переоценке наших представлений о тепловом режиме осадочного чехла этих районов. Очевидно, что столь коренной пересмотр геотермических данных требует постановки дополнительных более обширных экспериментальных работ.

*Керн северных скважин, теплопроводность пород, Западно-Сибирская плита, Енисей-Хатангский прогиб.*

### THERMAL CONDUCTIVITY OF SEDIMENTS IN HIGH-LATITUDE WEST SIBERIA

A.D. Duchkov, L.S. Sokolova, D.E. Ayunov, and O.N. Zlobina

The thermal conductivity of rocks ( $\lambda$ ) used previously to estimate heat flow in high-latitude Siberia was assumed to be  $\lambda = 1.8\text{--}2.0$  W/(m·K), according to published evidence, but was almost never measured specially. We measured the thermal conductivity of core samples from boreholes drilled in the northeastern West Siberian Plate and in the Yenisei–Khatanga basin in the 1990s, using two advanced instruments: a comparator and a scanner of thermal conductivity. Altogether there were 305 samples of air-dry sediments ( $\lambda_d$ ) from the 1100–4200 m interval of 23 holes, 77 samples of which were then moistened ( $\lambda_w$ ). The average thermal conductivities of rocks in dry and wet conditions were found to be  $\lambda_d = 1.9 \pm 0.2$  and  $\lambda_w = 2.6 \pm 0.1$  W/(m·K), respectively. Thus, the true thermal conductivity of sediments, which are saturated with water in this northern area, must be about 20–30 % higher than that assumed in the previous heat flow determinations, and the latter are thus underestimated correspondingly. The updates to the thermal conductivity values imply major revision of the existing ideas of the thermal regime in the Siberian high latitudes. Such a serious revision of geothermal data will obviously require a large amount of additional experimental work.

*Core samples from high-latitude boreholes, thermal conductivity, West Siberian Plate, Yenisei–Khatanga basin*

### ВВЕДЕНИЕ

Прогнозирование температурного режима земной коры осуществляется по значениям плотности теплового потока (далее тепловой поток), который рассчитывается по измерениям температуры в скважинах и коэффициента теплопроводности ( $\lambda$ ) горных пород, вскрытых этими скважинами. Коэффициент теплопроводности (далее теплопроводность) характеризует способность горной породы передавать тепло от более нагретой ее части к более холодной. Активное измерение теплопроводности горных пород началось в середине прошлого столетия в связи с бурным развитием геотермических исследований, направленных на изучение теплового потока. Однако до сих пор не удалось разработать надежную аппаратуру для измерения как теплопроводности, так и других тепловых свойств (температуропровод-

ность и теплоемкость) горных пород непосредственно в скважине при проведении температурного каротажа [Новиков и др., 2008]. Поэтому вся информация о теплопроводности пород до сих пор основывается на изучении образцов горных пород (керна) в лабораторных условиях и последующем уточнении результатов посредством введения поправок, учитывающих различие лабораторных и полевых условий.

Для измерения теплопроводности в лабораториях используют разнообразные преимущественно малосерийные приборы, основанные на закономерностях тепловых процессов в стационарных и нестационарных условиях [Тепловое поле..., 1987; Бабаев и др., 1987; Гаврильев, 1998]. Для большинства из них необходима специальная достаточно трудоемкая подготовка образцов, включающая в том числе выпиливание цилиндров, пластин, сверление отверстий, шлифовку контактных поверхностей. В настоящее время разработаны приборы «Компаратор теплопроводности», «Измеритель теплопроводности сканирующий», которые не требуют значительного разрушения образца перед измерением теплопроводности. Именно на этих приборах получены данные по теплопроводности, представленные в работе.

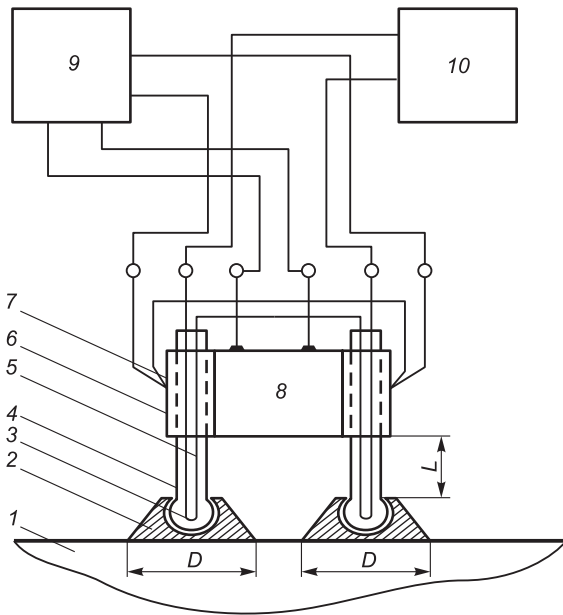
Накапливавшиеся со временем результаты измерений теплопроводности горных пород в разных лабораториях периодически обобщались [Бабаев и др., 1987; Гаврильев, 1998; Липаев и др., 2001], что позволяло при отсутствии необходимой экспериментальной информации пользоваться этими справочными данными для оценки величины теплового потока.

К настоящему времени в пределах обширной Западно-Сибирской плиты (ЗСП) и в Енисей-Ханганском прогибе (ЕХП) получено более 1000 определений теплового потока [Каталог..., 1985; Тепловое поле..., 1987]. В процессе геотермических работ выполнялись также и значительные объемы измерений  $\lambda$ , но в основном для южной части плиты. Теплопроводность пород северных районов практически не изучалась и при оценке здесь тепловых потоков использовались в основном литературные данные о теплопроводности пород, представленных в геологическом разрезе. В геотермических работах нам удалось найти буквально единичные измеренные значения теплопроводности пород из северных скважин. Известны, например, результаты измерений  $\lambda$  образцов из керна скважин Казанцевская-4 (интервал 783—788 м) и Мессояхская-118 (интервал 839—843 м), выполненные С.И. Сергиенко [Бабаев и др., 1987]. По этим данным сухие песчаники имеют теплопроводность 1.63—2.17 Вт/(м·К), а влагонасыщенные — 2.15—2.77 Вт/(м·К). Р.И. Гаврильевым [1998] измерено несколько образцов песчаников и алевролитов из неглубокой скважины участка Пясино (координаты 71°15' с.ш. и 86° в.д., интервал отбора 53—640 м). По этим данным средняя теплопроводность водонасыщенных алевролитов и аргиллитов составляет 2.41 Вт/(м·К), а песчаников — 3.86 Вт/(м·К). Известно также несколько обобщений результатов измерения теплопроводности осадочных пород для Западно-Сибирской плиты в целом, которые впрочем значительно различаются между собой. По данным А.Р. Курчикова и Б.П. Ставицкого [1987], теплопроводность водонасыщенных песчаных пород на глубине 1—3 км составляет 2.1—2.4 Вт/(м·К), а глинистых — 1.8—2.1 Вт/(м·К). По данным В.Т. Балобаева [1991], водонасыщенные мезозойские отложения Западно-Сибирской плиты имеют более низкую теплопроводность: для песчаников, алевролитов и аргиллитов средние значения  $\lambda$  составляют 1.7, 1.67 и 1.6 Вт/(м·К) соответственно. Эти обобщения также использовались при геотермических исследованиях. Анализ сведений о тепловом потоке северных районов ЗСП и ЕХП из работ [Теплофизические исследования..., 1983; Каталог..., 1985; Тепловое поле..., 1987] свидетельствует, что ранее при расчетах теплового потока в основном использовались значения  $\lambda$  порядка 1.8—2.0 Вт/(м·К). Сравнительно недавно выполнены измерения теплопроводности более 1650 образцов из керна сверхглубоких Тюменской и Ен-Яхинской скважин (интервал 1600—7500 м) [Попов и др., 1996, 2008]. Согласно этим измерениям, теплопроводность мезозойских пород осадочного чехла в изученном интервале оказалась заметно выше: в среднем  $\lambda_c = 2—2.4$  Вт/(м·К), а  $\lambda_b = 2.5—2.7$  Вт/(м·К).

В данной ситуации актуальной задачей является определение реальной теплопроводности пород осадочного чехла северных районов ЗСП и ЕХП и переоценка на этой основе имеющихся значений теплового потока в этом регионе. Решению этой задачи в настоящее время способствуют как организация в ИНГГ СО РАН Центра геологических коллекций, в котором собран значительный массив кернового материала из северных регионов Сибири, так и наличие необходимой измерительной аппаратуры. На этой базе нами в 2010—2011 гг. выполнены измерения теплопроводности образцов из кернов северных скважин. В настоящем сообщении представлены полученные при этом результаты.

### ИЗМЕРИТЕЛИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Для измерения теплопроводности при комнатной температуре (фактически при температуре 30—40 °С) нами использовались два прибора: «Компаратор теплопроводности» и «Измеритель теплопроводности сканирующий».



**Рис. 1.** Схема теплового компаратора для измерений теплопроводности [Калинин и др., 1983; Тепловое поле..., 1987].

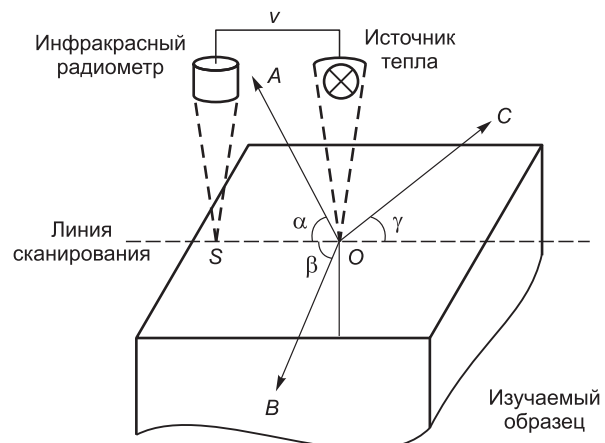
1 — исследуемый образец, 2 — медные наконечники, 3 — концы термозондов шаровой формы, 4 — термозонды из латуни, 5 — измерительная термопара, 6 — медные пластинки, 7 — регулируемая термопара, 8 — термоэлектрическая батарея ТБМ-2М, 9 — автоматический регулятор, 10 — милливольтметр.  $D = 4 \cdot 10^{-3}$  м — диаметр основания наконечников,  $L = 10^{-2}$  м — длина термозондов.

**«Компаратор теплопроводности» (КТ)** разработан А.Н. Калининым в СибНИИ метрологии и приспособлен с нашим участием к измерению теплопроводности горных пород [Калинин и др., 1983; Тепловое поле..., 1987]. Функциональная схема прибора показана на рис. 1. Метод основан на двухточечном тепловом зондировании поверхности исследуемого образца двумя термозондами (рис. 1, 4), между верхними концами которых с помощью термоэлектрической батареи (8) создается и поддерживается постоянная раз-

ность температур ( $\sim 40^\circ\text{C}$ ). О теплопроводности исследуемого образца (1) судят по величине термоЭДС дифференциальной термопары (5), регистрирующей разность температур между нижними концами термозондов при их контакте с поверхностью образца.

Прибор предварительно градуируется по нескольким эталонам теплопроводности, в число которых входят пенополистирол ПС-100,  $\lambda = 0.042$  Вт/(м·К); органическое стекло,  $\lambda = 0.195$  Вт/(м·К); стекло ТФ-1,  $\lambda = 0.696$  Вт/(м·К); стекло К-8,  $\lambda = 1.081$  Вт/(м·К); плавный кварц марки КВ,  $\lambda = 1.335$  Вт/(м·К); образец белого мрамора,  $\lambda = 2.86$  Вт/(м·К); титановый сплав ВТ-6,  $\lambda = 6.622$  Вт/(м·К); нержавеющая сталь 12Х18Н10Т,  $\lambda = 14.74$  Вт/(м·К). Подобный широкий набор эталонов обеспечивает измерение теплопроводности в диапазоне  $0.05\text{—}15.00$  Вт/(м·К) с точностью  $\pm(5\text{—}6)\%$ . «Компаратор теплопроводности» не требует разрушения образца. Достаточно пришлифовать одну из его поверхностей или ее часть. На исследуемой поверхности обычно выполняется несколько измерений  $\lambda$ , что позволяет установить вариации теплопроводности, а также достаточно точно оценить среднее значение параметра. На данном приборе можно измерять теплопроводность как сухих, так и водонасыщенных образцов, размер которых превышает  $30 \times 30 \times 10$  мм. Одно измерение выполняется в течение 5 мин.

**«Измеритель теплопроводности сканирующий» (ИТС)** разработан Ю.А. Поповым в 1980-х годах в Московском геолого-разведочном институте [Попов и др., 1983; Popov et al., 1999, 2008]. Принципиальная схема прибора показана на рис. 2. Метод оптического сканирования основан на нагреве поверхности образца подвижным точечным источником тепловой энергии (специальная электролампа с отражателем, температура светового пятна порядка  $40^\circ\text{C}$ ) и регистрации приращений температуры нагреваемой поверхности подвижным регистратором (инфракрасный радиометр). Определение  $\lambda$  осуществляется путем автоматического сравнения приращений температур на изучаемом образце и на двух эталонах с известной теплопроводностью, размещенных до и после образца. Таким образом, этот прибор, в отличие от КТ, выполняет бесконтактные измерения  $\lambda$ . В качестве эталонов используется упоминавшийся выше набор стандартных образцов. Точность измерений прибором ИТС несколько выше —  $\pm 4\%$ . Измерение может быть выполнено на любой плоской или цилиндрической поверхностях, которые не тре-



**Рис. 2.** Принципиальная схема метода оптического сканирования [Попов и др., 1983; Popov et al., 1999].

$v$  — скорость сканирования,  $O$  — точка действия источника тепла,  $S$  — точка регистрации температуры позади источника тепла,  $A$ ,  $B$  и  $C$  — главные оси теплопроводности с углами  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  относительно линии сканирования.

буют шлифовки, если неровности не превышают  $\pm 0.5$  мм. Подготовка образца перед измерением заключается только в нанесении на его поверхность вдоль линии сканирования полосы черной эмали шириной порядка 10 мм. Качественные результаты получаются при измерениях на образцах, размер которых превышает  $40 \times 40 \times 20$  мм. Скорость сканирования составляет 4 мм/с, что позволяет измерить 15—40 образцов в час в зависимости от их длины.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Указанными приборами выполнены измерения теплопроводности двух коллекций образцов из кернов скважин, пробуренных в конце прошлого столетия в северо-восточной части Западно-Сибирской плиты и в Енисей-Хатангском прогибе. Теплопроводность мезозойских пород этих регионов никогда ранее не изучалась. Рассмотрим результаты этих измерений для каждой коллекции отдельно и затем подведем общий итог.

### Коллекция 1 (северо-восточная часть ЗСП)

С помощью «Компаратора теплопроводности» измерена теплопроводность коллекции образцов пород из кернов семи скважин северо-восточной части Западно-Сибирской плиты: Медвежья-316, Сузунская-4, Горчинская-1, Ушаковская-1, Южно-Носковская-318, Дерябинская-9 и Хабейская-1. Расположение этих скважин показано на рис. 3. Всего изучено 160 образцов, предоставленных лабораторией седиментологии ИНГГ СО РАН. В основном это песчаники и алевролиты, реже аргиллиты из юрских (129 образцов) и меловых (24 образца) отложений. Семь образцов (вулканогенно-осадочные, метаморфизованные терригенные породы и метапесчаники) из скважин Хабейская-1 и Медвежья-316 представляют фундамент. Коллекция охватывает часть разреза от 1800 до 4200 м. В основном измерялся стандартный керн — цилиндры диаметром 38 мм и высотой 35—45 мм с пришлифованными торцами. Часть образцов представляла собой обломки керна с пришлифованной поверхностью с одной или двух сторон. Датчик «Компаратора теплопроводности» устанавливался на торцах или других плоских поверхностях кернов. Все образцы были сначала промерены в воздушно-сухом состоянии ( $\lambda_c$ ). Затем часть образцов (77) из скважин Хабейская-1, Южно-Носковская-318, Медвежья-316, Сузунская-4 были насыщены водой в вакууме и снова измерена их теплопроводность уже в водонасыщенном состоянии ( $\lambda_b$ ). Обобщенные результаты измерений приведены в табл. 1. На рис. 4, а представлены гистограммы значений  $\lambda_c$  и  $\lambda_b$ .

Теплопроводность сухих образцов для всей коллекции изменяется от 1.0 до 3.9 Вт/(м·К), среднее значение  $\lambda_c$  составляет  $1.9 \pm 0.2$  Вт/(м·К). После насыщения водой теплопроводность пород возрастает в среднем на 20—40 % и варьирует от 1.7 до 3.4 Вт/(м·К) вокруг среднего значения, равного  $2.6 \pm 0.1$  Вт/(м·К). Распределения значений  $\lambda_c$  и  $\lambda_b$  для всей коллекции имеют сходный характер, но сдвинуты относительно друг друга. Гистограммы имеют два максимума (см. рис. 4, а). Средние теплопроводности геологических разрезов всех скважин, кроме Хабейской-1, различаются между собой незначительно:  $\lambda_c$  изменяется от 1.8 до 2.2 Вт/(м·К), а  $\lambda_b$  — от 2.4 до 2.7 Вт/(м·К). Теплопроводность меловых и юрских отложений по измерениям на сухих образцах различаются несущественно:  $\lambda_c$  всего мелового разреза, а также песчаников и алевролитов составляет в среднем 1.7 Вт/(м·К). Теплопроводность юрских пород примерно на 10 % выше — в среднем 1.9 Вт/(м·К). Породы фундамента имеют более высокую теплопроводность — в среднем  $\lambda_c = 3.0$  Вт/(м·К) при изменениях от 1.7 до 3.9 Вт/(м·К).

Водонасыщенные меловые и юрские породы характеризуются также близкой теплопроводностью — в среднем  $\lambda_b = 2.6$  Вт/(м·К), хотя средние значения  $\lambda_b$  песчаников и алевролитов все же несколько различаются. Приведенные цифры показывают, насколько значительно зависит теплопроводность оса-

**Рис. 3. Обзорная карта расположения скважин (черные точки), по керну которых измерена теплопроводность пород.**

Скважины: 1 — Медвежья-316, 2 — Сузунская-4, 3 — Горчинская-1, 4 — Ушаковская-1, 5 — Южно-Носковская-318, 6 — Дерябинская-9, 7 — Хабейская-1, 8 — Волочанская-1, 9 — Новая-2, 10 — Логатская-361, 11 — Восточно-Кубалахская-357, 12 — Кубалахская-1, 13 — Западно-Кубалахская-365, 14 — Массоновская-363, 15 — Рыбинская-1, 16 — Костроминская-1, 17 — Хорудалаская-1, 18 — Северо-Суолемская-1, 19 — Южно-Суолемская-10, 20 — Улаханская-1, 21 — Южно-Тигянская-1, 22 — Гуримисская-2, 23 — Восточная-1.

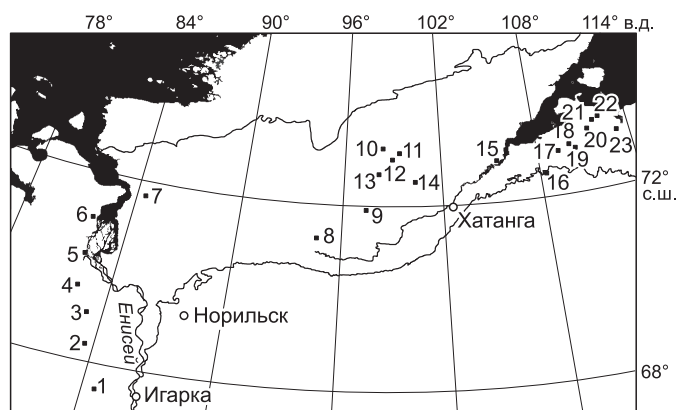


Таблица 1. Средние значения коэффициента теплопроводности образцов пород из керна скважин северо-восточной части Западно-Сибирской плиты

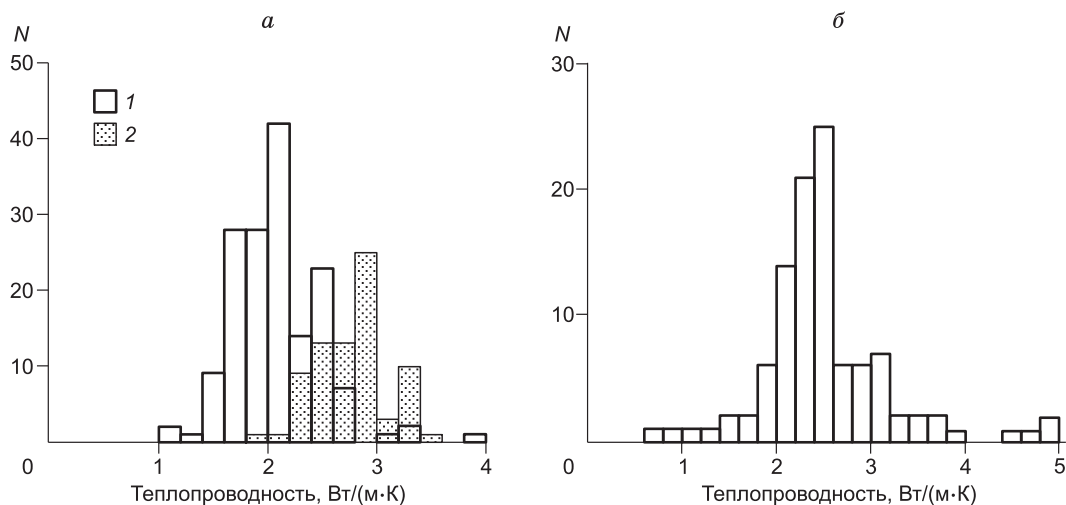
Скважина (возраст), часть геологического разреза, свита	Интервал отбора образцов, м	Число образцов (сухие/водонасыщенные)	Теплопроводность, Вт/(м·К)		$\lambda_{\text{в}}/\lambda_{\text{с}}$	
			$\lambda_{\text{с}}$	$\lambda_{\text{в}}$		
Медвежья-316 (J—PZ)	2072—2800	31/8	1.9	2.4	1.26	
Сузунская-4 (J)	2671—4177	39/39	2.2	2.7	1.23	
Горчинская-1 (K—J)	2234—3495	25/—	1.9	—	—	
Ушаковская-1 (J)	3095—3820	25/—	1.9	—	—	
Южно-Носковская-318 (K—J)	1807—4200	28/27	1.8	2.5	1.39	
Дерябинская-9 (K—J)	2277—3505	9/—	1.8	—	—	
Хабейская-1 (PZ)	2158—2277	2/2	2.0	2.0	1	
Все скважины	1807—4200	160/77	1.9	2.6	1.37	
Породы фундамента (PZ)	2157—2485	7/2	3.0	—	—	
Породы осадочного чехла (J—K)	1807—4200	153/75	1.9	2.6	1.39	
Породы юры	2072—4200	129/67	1.9	2.6	1.37	
песчаники	—	46/22	1.9	2.8	1.47	
алевролиты, аргиллиты	—	82/43	1.9	2.5	1.32	
Породы мела	1807—3602	24/8	1.7	2.6	1.53	
песчаники	—	7/7	1.7	2.6	1.53	
алевролиты, аргиллиты	—	17/1	1.7	2.4	—	
Юра	Гольчихинская	—	11/10	1.7	2.4	1.41
	Яновстановская	—	5/2	2.0	2.4	1.2
	Сиговская	—	1/—	1.8	—	—
	Точинская	—	4/4	2.1	2.6	1.24
	Малышевская	—	4/3	1.9	2.2	1.16
	Леонтьевская	—	31/17	2.1	2.7	1.29
	Вымская	—	15/7	1.9	2.4	1.26
	Лайдинская	—	18/10	1.7	2.7	1.59
	Надояхская	—	2/2	2.0	2.9	1.45
	Китербютская	—	14/4	1.9	3.0	1.58
	Шараповская	—	1/1	2.3	2.7	1.17
	Нерасчлененные отложения	—	23/7	1.9	2.7	1.42
Мел	Байкаловская	—	4/4	1.9	2.6	1.37
	Суходудинская	—	8/—	1.7	—	—
	Шуратовская	—	4/4	1.6	2.6	1.62
	Нижнехетская	—	8/—	1.9	—	—

Примечание.  $\lambda_{\text{с}}$  — теплопроводность воздушно-сухих пород,  $\lambda_{\text{в}}$  — теплопроводность водонасыщенных пород. Расположение скважин см. на рис. 3.

дочных пород от пористости и типа заполняющего поровое пространство вещества (в данном случае воздух или вода). При насыщении образцов водой теплопроводность может увеличиться на 20—30 % и более.

В табл. 1 указаны также средние значения  $\lambda_{\text{с}}$  и  $\lambda_{\text{в}}$  для отдельных свит мела и юры. В целом данных недостаточно для уверенной характеристики теплопроводности всех свит (особенно в водонасыщенном состоянии). Только гольчихинская, леонтьевская и лайдинская свиты охарактеризованы десятью и более измерениями  $\lambda_{\text{в}}$ . Для этих свит средние значения  $\lambda_{\text{в}}$  изменяются в пределах 2.4—2.7 Вт/(м·К).

Следует отметить, что наши измерения в целом подтвердили цитировавшиеся ранее данные С. И. Сергиенко о теплопроводности пород из скважин Казанцевская-4 и Мессояхская-118 [Бабаев и др., 1987].



**Рис. 4.** Гистограммы значений теплопроводности образцов из керна скважин, расположенных в северо-восточной части Западно-Сибирской плиты (*а*) и в Енисей-Хатангском прогибе (*б*).

*а*: 1 — 160 воздушно-сухих образцов, 2 — 77 водонасыщенных образцов; *б* — 145 воздушно-сухих образцов.

#### Коллекция 2 (Енисей-Хатангский прогиб)

В 2011 г. было выполнено измерение прибором ИТС теплопроводности образцов пород из керна старых скважин, пробуренных в пределах Енисей-Хатангского прогиба. Всего изучено 145 воздушно-сухих образцов из кернов шестнадцати скважин: Волочанская-1, Новая-2, Логатская-361, Восточно-Кубалахская-357, Кубалахская-1, Западно-Кубалахская-365, Массоновская-1, Рыбинская-1, Костроминская-1, Хорудалахская-1, Северо-Суодемская-1, Южно-Суодемская-10, Улаханская-1, Южно-Тигянская-1, Гуримисская-2 и Восточная-1 (см. рис. 3). Образцы отбирались в интервале 1100—3600 м, т.е. примерно в той же части разреза, что и образцы коллекции 1 (1800—4200 м). Мезозойский осадочный чехол (Т—К) охарактеризован 75 образцами. Породы фундамента разного возраста (Р—рС) представляли 70 образцов. Понятно, что при отборе образцов не отдавалось предпочтения породам фундамента. Просто они (доломиты, ангидриты, долериты, известняки), будучи наиболее плотными, лучше сохранились при длительном хранении и оказались наиболее пригодными к измерениям. Многие керны из осадочно-чехла не соответствовали требованиям, необходимым для измерений на приборе ИТС.

Исследуемые образцы представляли собой полноразмерный керн из Центра геологических коллекций ИНГГ СО РАН. Во всех экспериментах сканирование осуществлялось по образующей керна (вдоль его оси), т.е. перпендикулярно слоистости. В этом случае измеряется теплопроводность породы вдоль слоистости. В ходе измерений для каждого образца автоматически рассчитывается  $\lambda_{\text{макс}}$ ,  $\lambda_{\text{мин}}$ ,  $\lambda_{\text{ср}}$ . Обобщенные результаты экспериментов представлены в табл. 2 и на рис. 4, б.

Теплопроводность сухих пород из скважин ЕХП изменяется в широких пределах — от 0.7 Вт/(м·К) (переслаивание алевролитов и песчаников мела) до 5 Вт/(м·К) (ангидриты). Среднее значение теплопроводности всей коллекции образцов составляет  $2.26 \pm 0.2$  Вт/(м·К). Оно заметно выше среднего значения  $\lambda$  коллекции 1 (см. табл. 1). Это связано с большим количеством в коллекции 2 пород фундамента со средней теплопроводностью порядка 2.7 Вт/(м·К). По той же причине значительно различаются средние теплопроводности изученных геологических разрезов по скважинам. Наименьшие теплопроводности зафиксированы в образцах из мезозойских отложений, вскрытых скважинами Восточно-Кубалахская-357 и Массоновская-363: 1.6 и 1.8 Вт/(м·К) соответственно. Наибольшей теплопроводностью (в среднем 3.36 Вт/(м·К)) характеризуются кембрийские доломиты из скв. Южно-Суодемская-10. В керне остальных скважин, где преобладали породы фундамента, средние значения  $\lambda_c$  также оказались высокими — от 2.17 до 2.74 Вт/(м·К).

Новые данные для осадочных пород мелового и юрского возраста в целом совпали с предыдущими (сравниваются только результаты измерений воздушно-сухих пород, см. табл. 1, 2), несмотря на использование разной измерительной аппаратуры. При изучении коллекции 2 впервые удалось оценить, правда по небольшому количеству образцов, теплопроводность сухих вулканогенно-осадочных пород триаса, которая в среднем составляет 2.0 Вт/(м·К).

Таблица 2. Средние значения коэффициента теплопроводности воздушно-сухих пород из керна скважин Енисей-Хатангского прогиба

Скважина (возраст), часть геологического разреза, свита	Интервал отбора образцов	Число образцов	Теплопроводность, Вт/(м·К)		
			изменения $\lambda_c$	среднее значение $\lambda_c$	
Волочанская-1 (Т—Р)	1469—3344	10	1.41—2.69	2.17	
Новая-2 (J)	1442—3431	15	1.72—2.31	2.07	
Логатская-361 (J—Т)	3142—3331	5	0.98—2.47	1.82	
Восточно-Кубалахская-357 (К—J)	1244—1950	11	0.74—2.17	1.6	
Кубалахская-1 (J)	2842—3600	10	1.9—2.74	2.16	
Западно-Кубалахская-365 (J)	2770—3163	11	1.62—2.23	1.99	
Массоновская-363 (К—J)	2605—4350	5	1.41—2.05	1.8	
Рыбинская-1 (Р—С)	1795—2401	5	1.32—4.66	2.18	
Костроминская-1 (С—рС)	1106—2131	5	1.84—3.05	2.38	
Хорудалахская-1 (Р—рС)	1518—2762	9	1.22—2.98	2.23	
Северо-Суолемская-1 (С—рС)	3290—3346	2	2.08—3.4	2.74	
Южно-Суолемская-10 (С—рС)	2203—3135	9	2.03—4.95	3.36	
Улаханская-1 (Т—С)	1198—3044	14	1.75—2.39	2.24	
Южно-Тигянская-1 (?)	1544—3303	10	1.64—2.99	2.28	
Гуримиская-2 (Р—С)	1245—2250	8	2.09—2.49	2.3	
Восточная-1 (Р—С)	1802—3280	17	2.08—4.29	2.65	
Все скважины	1106—3600	145	0.74—4.95	2.26	
Породы фундамента (Р—рС)	1106—3346	70	1.22—4.95	2.67	
породы (Р)	—	20	1.22—2.92	2.23	
породы (С)	—	21	2.08—2.98	2.4	
породы (С—рС)	—	23	1.84—4.95	3.3	
нерасчлененные породы	—	6	1.84—2.62	2.28	
Породы осадочного чехла (Т—J)	1198—2564	75	0.74—2.69	1.93	
породы (Т)	—	12	1.09—2.69	1.92	
породы (J)	—	37	1.6—2.57	2.0	
породы (К)	—	10	0.74—2.17	1.67	
нерасчлененные породы	—	16	1.76—2.79	2.28	
Юра	Гольчихинская	—	9	1.6—2.1	1.78
	Мальшевская	—	7	1.89—2.14	2.0
	Леонтьевская	—	9	1.72—2.28	2.03
	Вымская	—	5	2—2.1	2.04
	Лайдинская	—	2	2.11—2.2	2.15
	Надояхская	—	1		2.31
	Китербютская	—	1		2.3
	Шараповская	—	3	1.73—2.57	2.27
Мел	Суходудинская	—	5	0.85—2.11	1.74
	Нижнехетская	—	5	0.74—2.17	1.6

Примечание. Расположение скважин см. на рис. 3.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В итоге изучения теплопроводности образцов обеих коллекций, отобранных из керна 23 скважин (интервал 1100—4200 м), пробуренных на территории северо-восточной части Западно-Сибирской плиты и Енисей-Хатангского прогиба, впервые получено 305 значений теплопроводности для пород в воздушно-сухом состоянии ( $\lambda_c$ ), для 77 образцов измерены также и значения  $\lambda_v$ . В результате установлено,

что средние значения теплопроводности сухих и водонасыщенных осадочных пород составляют  $1.9 \pm 0.2$  и  $2.6 \pm 0.1$  Вт/(м·К) соответственно. Породы фундамента в сухом состоянии имеют среднюю теплопроводность порядка  $2.7 \pm 0.2$  Вт/(м·К). Скорее всего, при насыщении водой породы фундамента будут иметь близкую теплопроводность, так как для них типична невысокая пористость.

Возможно, что полученные значения  $\lambda_c$  и  $\lambda_b$  (см. табл. 1, 2) можно рассматривать в качестве максимальной оценки теплопроводности изученных геологических разрезов, так как измерения теплопроводности проводились на кернах старых скважин, хранившихся длительное время и часто в неблагоприятных условиях. При хранении на воздухе слабосцементированные породы обычно достаточно быстро разрушаются, сохраняются же наиболее прочные, характеризующиеся и более высокой теплопроводностью. Именно такие породы в большинстве своем и попали в наши коллекции, приведя, возможно, к некоторому увеличению теплопроводности разреза. Оценить «эффект хранения» можно только при сравнении полученных результатов с измерениями теплопроводности образцов из керна скважин, бурение которых завершилось сравнительно недавно.

## ВЫВОДЫ

Выполненные исследования позволили впервые достаточно детально охарактеризовать теплопроводность геологических разрезов северо-восточной части Западно-Сибирской плиты и Енисей-Хатангского прогиба. В итоге установлены средние значения теплопроводности водонасыщенных пород как в целом для осадочного чехла ( $\lambda_b = 2.6 \pm 0.1$  Вт/(м·К)), так и для отдельных его частей (см. табл. 1, 2). Очевидно, что именно эти значения  $\lambda_b$  следует использовать при определении теплового потока в северных районах Западной Сибири. Важно отметить, что они на 20—30 % выше значений  $\lambda = 1.8—2.0$  Вт/(м·К), использовавшихся ранее при оценках теплового потока в северных районах Западной Сибири [Теплофизические исследования..., 1983; Каталог..., 1985; Тепловое поле..., 1987]. Отсюда следует, что полученные ранее значения тепловых потоков могут быть занижены на 20—30 % и нуждаются в существенной корректировке. Кстати, на пересмотре значений теплового потока настаивают и авторы работы [Попов и др., 2008] на основании изучения тепловых свойств пород сверхглубокой Ен-Яхинской скважины. Это очень серьезный вывод, касающийся и многих других северных площадей Западно-Сибирской плиты, Сибирской платформы, где теплопроводность геологического разреза также специально не изучалась и соответственно не дооценивалась. Новые данные о теплопроводности пород могут привести к переоценке наших представлений и о тепловом режиме земной коры Западно-Сибирской плиты, так как они основываются в значительной степени на значениях теплового потока. При этом, конечно, может измениться (повыситься) на 20—30 % лишь средний уровень теплового потока, в то время как его латеральная изменчивость должна сохранить свои очертания. Очевидно, однако, что столь коренной пересмотр геотермических данных по Западно-Сибирской плите и Енисей-Хатангскому прогибу невозможен без существенного увеличения объема новой экспериментальной информации о теплопроводности горных пород, слагающих ее осадочный чехол.

Авторы благодарят академика А.Э. Конторовича за постоянное внимание к данной работе, предоставление kernового материала и сведений о геологических разрезах.

Работа частично поддерживалась интеграционными проектами ОНЗ РАН 7-1 (2010—2012 гг.).

## ЛИТЕРАТУРА

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

**Балобаев В.Т.** Геотермия мерзлой зоны литосферы севера Азии. Новосибирск, Наука, 1991, 194 с.

**Гаврильев Р.И.** Теплофизические свойства горных пород и напочвенных покровов криолитозоны. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 1998, 280 с.

**Калинин А.Н., Соколова Л.С., Дучков А.Д., Черепанов В.Я.** Исследования теплового компаратора применительно к измерениям теплопроводности горных пород // Геология и геофизика, 1983 (3), с. 116—122.

**Каталог** данных по тепловому потоку Сибири / Ред. А.Д. Дучков. Новосибирск, ИГиГ СО АН СССР, 1985, 82 с.

**Курчиков А.Р., Ставицкий Б.П.** Геотермия нефтегазоносных областей Западной Сибири. М., Недра, 1987, 134 с.

**Липаев А.А., Гуревич В.М., Липаев С.А.** Тепловые свойства горных пород нефтяных месторождений Татарстана. Справочник. Казань, Изд-во КМО, 2001, 205 с.



**Новиков С.В., Попов Ю.А., Тертычный В.В., Шако В.В., Пименов В.П.** Возможности и проблемы современного теплового каротажа // Изв. вузов. Геология и разведка. 2008, № 3, с. 54—57.

**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). Результаты бурения и исследования. Вып. 4. 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.

**Тепловое поле** недр Сибири / Ред. Э.Э. Фотиади. Новосибирск, Наука, 1987, 190 с.

**Теплофизические исследования** криолитозоны Сибири / Ред. А.В. Павлов. Новосибирск, Наука, 1983, 215 с.

**Popov Yu., Pribnow D., Sass J., Williams C., Burkhardt H.** Characterization of rock thermal conductivity by high-resolution optical scanning // Geothermics, 1999, № 28, p. 253—276.

*Рекомендована к печати 10 апреля 2013 г.  
М.И. Эповым*

*Поступила в редакцию  
12 ноября 2012 г.*