

## ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ОСАДОЧНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД ЛЕНО-ВИЛЮЙСКОЙ НЕФТЕГАЗОНОСНОЙ ПРОВИНЦИИ

**В.П. Семенов, М.Н. Железняк, А.Р. Кириллин, В.И. Жижин**

*Институт мерзлотоведения имени П.И. Мельникова СО РАН,  
677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия; Semenov.vp@rambler.ru*

Представлены и проанализированы результаты исследований теплопроводности основных типов осадочных горных пород Лено-Вилуйской нефтегазоносной провинции. Лабораторные исследования выполнены по 283 образцам керна, отобраным из 12 глубоких скважин, расположенных в различных областях провинции. Дана оценка теплопроводности горных пород в условиях их естественного залегания (полного влагонасыщения) и эффективной теплопроводности пород отдельных геологических свит.

*Теплопроводность, плотность пород, эффективная теплопроводность, осадочные горные породы, песчаники, алевролиты, аргиллиты*

### THERMAL CONDUCTIVITY OF SEDIMENTARY ROCKS IN THE LENO-VILUY OIL-AND-GAS BEARING PROVINCE

**V.P. Semenov, M.N. Zheleznyak, A.R. Kirillin, V.I. Zhizhin**

*Melnikov Permafrost Institute, SB RAS,  
36, Merzlotnaya str., Yakutsk, 677010, Russia; Semenov.vp@rambler.ru*

The results of studying the thermal conductivity of sedimentary rocks in the West-Central part of the Leno-Viluy oil-and-gas bearing province have been obtained and analyzed. The data have been obtained from laboratory studies of 283 samples from 12 deep boreholes bored in different parts of the structure. Thermal conductivity of the rocks has been analyzed under conditions of their natural bedding, with complete water saturation assessed. Effective thermal conductivity has been estimated for certain geological suites.

*Thermal conductivity, rock density, effective thermal conductivity, sedimentary rocks, sandstone, siltstone, argillite*

### ВВЕДЕНИЕ

Лено-Вилуйская нефтегазоносная провинция по высокой концентрации углеводородных природных ресурсов и их экономической значимости принадлежит к числу важнейших регионов России. В настоящее время здесь возобновляются комплексные геолого-разведочные работы (ПАО “Газпром”, АО “Росгеология”) на различных площадях и месторождениях, что обуславливает практическую актуальность настоящих исследований.

При освоении территории и разработке месторождений полезных ископаемых теплофизические свойства пород требуются для характеристики геотемпературного поля и расчетов по тепловому взаимодействию инженерных объектов с горными породами. Ранее целенаправленных теплофизических исследований горных пород верхней части разреза (до глубины 1500 м), слагающих Лено-Вилуйскую нефтегазоносную провинцию, не проводилось. Известны лишь единичные данные о теплофизических свойствах отдельных образцов горных пород [Гаврильев, 2013], чего явно недостаточно для объективной характеристики этого региона. В условиях сплошного распространения многолетнемерзлых толщ, характерного

для рассматриваемой территории, важность теплофизических исследований возрастает. На основе выполненных лабораторных работ были рассчитаны значения теплопроводности мерзлых горных пород, что позволит в будущем провести более достоверные расчеты геотемпературного поля и использовать полученные данные для решения прикладных и научных прогнозных задач.

### ПРИРОДНЫЕ УСЛОВИЯ ТЕРРИТОРИИ

Лено-Вилуйская нефтегазоносная провинция (НГП) относится к юго-восточной части Сибирской платформы, в тектоническом плане она принадлежит к Вилуйской синеклизе и не включает восточную часть провинции – Верхоянскую орогенную область. На юге Лено-Вилуйская НГП граничит с Алданской антеклизой, на севере с Анабаро-Оленекской антеклизой, а в административном отношении относится к Сунтарскому, Кобяйскому, Нюрбинскому, Верхневилуйскому и Вилуйскому районам Республики Саха (Якутия).

Геологический разрез здесь представлен докембрийскими, палеозойскими и мезозойскими отложениями, которые перекрыты сплошным чехлом кайнозойских образований. Нижнепалеозой-

ские карбонатные породы представлены засоленными известняками, записованными глинами, аргиллитами, алевролитами, мергелями, песчаниками, песками, туфами, туффитами и пластами каменной соли мощностью до 80 м. Отложения верхнего триаса–нижней юры распространены практически повсеместно и представлены ритмичным переслаиванием песков, песчаников, алевролитов, аргиллитов и глин. Мощность их в пределах провинции увеличивается от 100 м на западе до 900 м в восточной части. Песчано-глинистые угленосные отложения верхней юры и нижнего мела залегают почти горизонтально: в краевых частях синеклизы на глубине от 3 до 100 м, а в центральной части на глубинах 500–1000 м. Представлены они ритмичным переслаиванием песков, песчаников, алевролитов, аргиллитов и глин. Преимущественно песчаные отложения позднемелового возраста слагают отдельные мульдообразные впадины в центральной части провинции. В наиболее погруженных частях мощность их достигает 1000 м, тогда как в пределах Верхневилюйского поднятия она уменьшается до 160 м [Геология СССР, 1970].

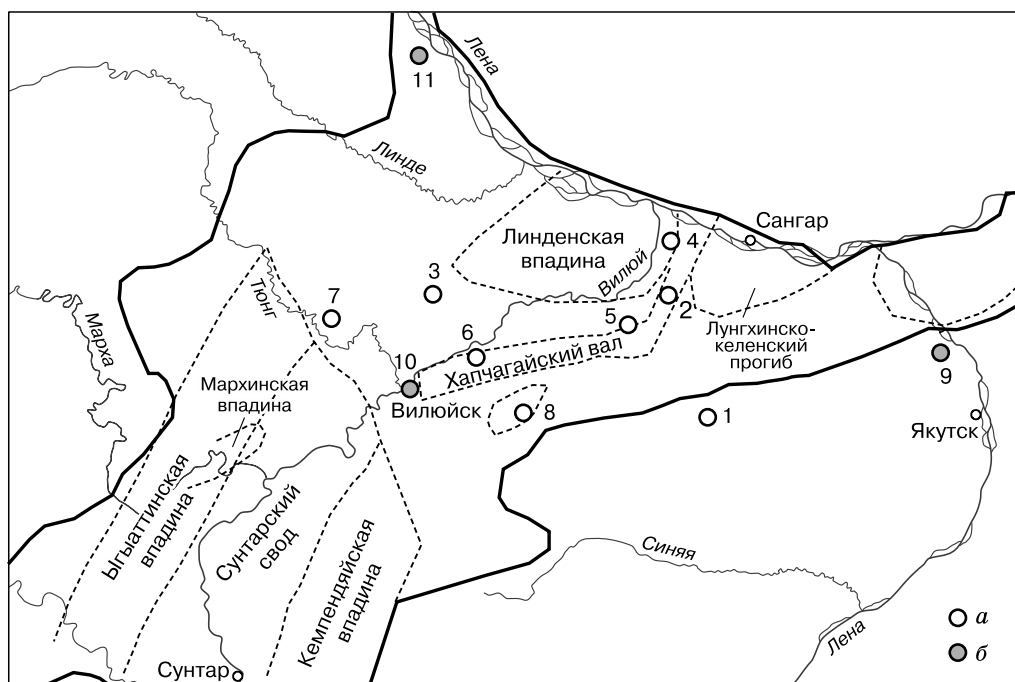
Кайнозойские песчано-глинистые отложения сплошным чехлом различной мощности перекрывают породы палеозойского и мезозойского возраста. Наибольшая их мощность (до 1000 м) ха-

рактерна для впадин в низовьях р. Вилюй. Широко распространены аллювиальные и озерно-аллювиальные отложения. Плейстоценовые отложения в пределах Вилюйской синеклизы распространены повсеместно, их мощности изменяются от первых до нескольких десятков метров [Тектоника..., 2001].

По данным гидрогеологических исследований, статические уровни подземных вод имеющих здесь гидрогеологических комплексов колеблются на глубинах 40–100 м. В связи с этим на глубинах более 100 м горные породы находятся в состоянии полного влагонасыщения на всей рассматриваемой территории, включая зону многолетнемерзлой толщи.

### МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД

Теплофизические исследования проведены на образцах из ведомственного кернохранилища Государственного унитарного горно-геологического предприятия “Якутскгеология”. Образцы керна были отобраны из глубоких геологических поисково-разведочных и опорных скважин, бурение которых началось в 1950-х гг. на рассматриваемой территории. Литологическое описание и лабораторные исследования выполнены в лаборатории геотермии криолитозоны Института мерз-



**Рис. 1.** Схема геолого-разведочных скважин, по которым выполнен отбор образцов керна на теплофизические исследования.

Скважины: а – геолого-разведочные; б – опорные. 1 – Андреевская (скв. 2); 2 – Бадаранская (скв. 1-р); 3 – Балагачинская (скв. 2); 4 – Нижневиллюйская (скв. 1-р); 5 – Неджелинская (скв. 16); 6 – Средневиллюйская (скв. 19); 7 – Среднетюньская (скв. 231); 8 – Хайлахская (скв. 1, 2); 9 – Намская (опорная); 10 – Вилюйская (опорная); 11 – Бахынайская (опорная).

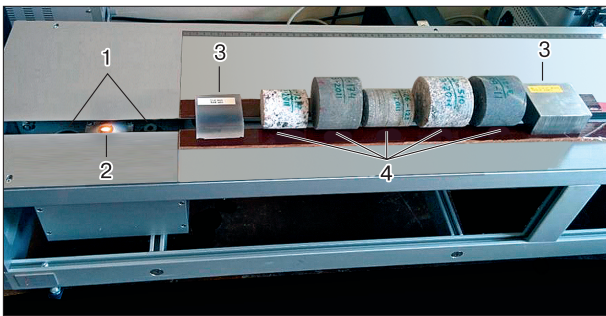
лотоведения СО РАН. Всего было отобрано и проанализировано 283 образца по 12 скважинам, расположенным на 10 геолого-разведочных площадях (рис. 1). Образцы керна, отобранные с различных глубин залегания (от первых десятков до 3500 м), характеризуют основные разновидности и структурно-вещественные комплексы разреза горных пород. В геологическом возрастном отношении керн был представлен меловыми, юрскими, триасовыми, пермскими и кембрийскими толщами горных пород.

Теплопроводность горных пород (коэффициент теплопроводности) определялась в воздушно-сухом и талом состояниях на приборе оптического сканирования измерения теплопроводности (Thermal Conductivity Scanning – TCS).

Принцип метода оптического сканирования (TCS) основан на нагреве изучаемых образцов горных пород оптическим излучением, сконцентрированным в небольшом пятне, которое перемещается вдоль поверхности образцов с постоянной скоростью (рис. 2). Для нагрева использовался оптический источник. Уровни нагрева и начальной температуры образца регистрировали приемниками инфракрасного излучения, поле зрения каждого из которых перемещалось вдоль той же поверхности с такой же скоростью, что и пятно нагрева. В одну серию с изучаемыми образцами помещали два стандартных образца (эталоны) с известными значениями теплопроводности. Теплопроводность образцов пород определяли на основе сравнения уровней их нагрева с уровнем нагрева эталонных образцов.

Измерения производили на цилиндрической поверхности керна (при сканировании образцов вдоль оси керна) или на плоской поверхности образцов. В некоторых случаях сочетали измерения на цилиндрической поверхности керна и на его торцах.

Профиль теплопроводности регистрировался при облучении образцов и при сканировании их



**Рис. 2. Установка для оптического сканирования.**

1 – инфракрасные регистраторы температуры; 2 – оптический источник нагрева; 3 – эталоны теплопроводности и температуропроводности; 4 – изучаемые образцы горных пород.

датчиками температуры. Это дало возможность определить как средние значения теплопроводности для всего образца, так и локальные значения в отдельных частях образца. Данная характеристика позволяет хорошо дифференцировать породы с близкой теплопроводностью, но различными структурно-текстурными особенностями. Достоинством TCS являются высокая скорость и точность измерений, возможность проводить их на образцах произвольной формы и размера. Технические характеристики TCS: диапазон измерений теплопроводности – от 0.2 до 50 Вт/(м·К), погрешность измерений 3 % (при доверительной вероятности 0.95) [Попов и др., 1983].

Теплопроводность пород в водонасыщенном состоянии была рассчитана на основе гидрогеологических данных регионов [Гидрогеология СССР, 1970; Грубов, Славин, 1971; Анищферов, 1989] и исследований зависимости теплопроводности сухих и водонасыщенных осадочных отложений по Западно-Сибирской плите [Дучков и др., 1987, 2013].

Эффективная (осредненная) теплопроводность горных пород вычислялась по формуле Р.И. Гаврильева [1988]:

$$\lambda_{\text{eff}} = \frac{I}{\sum_{i=1}^n (h_i/\lambda_i)}$$

где  $\lambda_i$  – коэффициент теплопроводности  $i$ -го отдельного слоя (пачки пород) с учетом их полного влагонасыщения, Вт/(м·К);  $h_i$  – мощность  $i$ -го слоя, м;  $I$  – совокупная мощность слоев стратиграфического комплекса (свита, горизонт), м.

Теплопроводность в мерзлом состоянии находилась расчетным методом по формуле Р.И. Гаврильева для осадочных пород [Гаврильев, 1998].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

При литологическом описании исследуемых образцов и в результате анализа теплопроводности выявлена неоднородность свойств однотипных горных пород различного геологического возраста. Они разделены на три группы: 1) породы мелового возраста (К); 2) породы юрского возраста (J); 3) породы триасового, пермского и кембрийского возраста (Т + Р + Е) (табл. 1).

Горные породы меловых отложений представлены песком, мощными пачками песчаников с прослоями алевролитов и аргиллитов. Песчаники здесь рыхлые, мелко- и среднезернистые, в большинстве случаев имеют сульфатный или полевошпатовый состав, реже глинистый или кварц-полевошпатовый. Теплопроводность меловых песчаников в воздушно-сухом состоянии  $\lambda_{ad}$  изменяется от 0.84 до 4.05 Вт/(м·К), в среднем составляет 1.54 Вт/(м·К). Теплопроводность алевролитов  $\lambda_{ad}$  варьирует от 0.62 до 1.89 Вт/(м·К) при среднем

Таблица 1. Коэффициент теплопроводности ( $\lambda_{ad}$ ) в воздушно-сухом состоянии и плотность скелета ( $\rho_{sk}$ ) основных типов горных пород Лено-Виллюйской нефтегазоносной провинции

Порода	Геологический индекс					
	К		J		T + P + E	
	$\lambda_{ad}$ , Вт/(м·К)	$\rho_{sk}$ , кг/м <sup>3</sup>	$\lambda_{ad}$ , Вт/(м·К)	$\rho_{sk}$ , кг/м <sup>3</sup>	$\lambda_{ad}$ , Вт/(м·К)	$\rho_{sk}$ , кг/м <sup>3</sup>
Пески	0.60–0.92	1779–1970	–	–	–	–
	0.73 (12)	1888 (12)				
Песчаники	0.84–4.05	1065–2833	1.21–4.29	1950–3080	1.47–2.35	2203–2740
	1.54 (84)	2204 (84)	1.67 (83)	2345 (83)	1.91 (28)	2441 (28)
Алевролиты	0.62–1.89	1883–2193	1.01–2.10	1000–2510	–	–
	1.17 (19)	2048 (19)	1.63 (7)	2186 (7)		
Аргиллиты	1.09–1.52	1799–2371	1.24–2.13	1000–2707	1.40–2.13	2383–3073
	1.22 (7)	2126.7 (7)	1.60 (27)	2368 (27)	1.79 (6)	2595 (6)
Глины	–	–	1.24–1.26	2000–2192	–	–
			1.25 (2)	2096 (2)		
Уголь	–	–	0.95–1.53	1000–2336	–	–
			1.24 (2)	1668 (2)		
Известняк	–	–	1.48–2.35	2316–2604	1.39–2.61	2436–2668
			1.83 (4)	2498 (4)	2.03 (6)	2563 (6)
Доломиты	–	–	1.58–2.04	2430–2484	1.74–2.16	2273–2667
			1.78 (3)	2453 (3)	1.97 (3)	2476 (3)
Конгломераты	–	–	–	–	1.63–1.64	2408–2468
					1.64 (2)	2438 (2)
Долериты	–	–	–	–	1.09–1.57	2475–2917
					1.34 (3)	2631 (3)

Примечание. В числителе – предельные, в знаменателе – средние значения; в скобках – количество образцов для осреднения. К – породы мелового возраста; J – породы юрского возраста; T + P + E – породы триасового, пермского и кембрийского возраста.

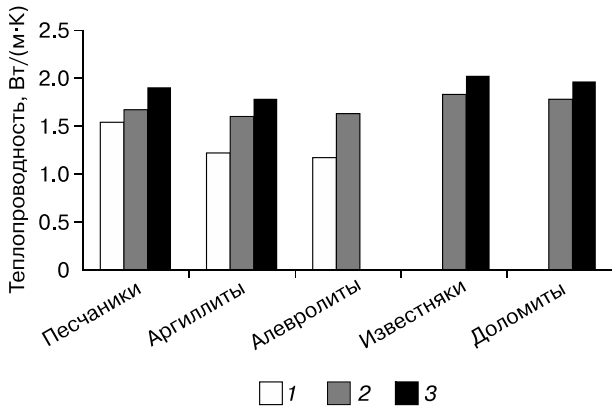
значении 1.17 Вт/(м·К) и средней плотности 2048 кг/м<sup>3</sup>; аргиллитов – от 1.09 до 1.52 Вт/(м·К) при среднем 1.22 Вт/(м·К). Теплопроводность песков  $\lambda_{ad}$  имеет наименьшие значения и изменяется от 0.60 до 0.92 Вт/(м·К), в среднем составляя 0.73 Вт/(м·К). Плотность их варьирует от 1799 до 1970 кг/м<sup>3</sup>.

Отложения второй группы горных пород (юрского возраста) представлены чередованием песчаников, аргиллитов и алевролитов, с прослоями угля и глин. В юго-восточной части провинции (см. рис. 1, скв. Намская) в разрезе отмечаются прослой известняков и доломитов. Песчаники этой группы наряду с алевролитами и аргиллитами имеют большие средние значения теплопроводности в воздушно-сухом состоянии, чем породы мелового возраста, соответственно 1.67, 1.63 и 1.60 Вт/(м·К). Как теплопроводность, так и плотность горных пород этой толщи выше, чем у толщи меловых отложений (см. табл. 1).

В целом диапазон изменения теплопроводности пород этой группы составляет от 0.95 Вт/(м·К) в углях до 4.29 Вт/(м·К) в песчаниках. Средние значения теплопроводности известняков 1.83 Вт/(м·К), доломитов 1.78 Вт/(м·К), встречающихся здесь глин 1.25 Вт/(м·К).

Отложения третьей группы (объединенного триасового, пермского и кембрийского возраста) представлены песчаниками, известняками, доломитами с прослоями глинистых пород. Редко встречаются долериты и конгломераты. Песчаники в основном серицит- или кварц-полевошпатового состава, реже глинистого, мелкозернистые, плотные. Теплопроводность  $\lambda_{ad}$  их выше, чем у песчаников юрского возраста, и варьирует от 1.47 до 2.35 Вт/(м·К), в среднем составляя 1.91 Вт/(м·К). Теплопроводность известняков  $\lambda_{ad}$  изменяется от 1.39 до 2.61 Вт/(м·К) при среднем значении 2.03 Вт/(м·К). Аргиллиты и доломиты, как и песчаники, отличаются более высокими по отношению к породам второй группы величинами теплопроводности и плотности, средние значения равны 1.79 и 1.97 Вт/(м·К) и 2595, 2476 кг/м<sup>3</sup> соответственно. Долериты и конгломераты имеют среднюю теплопроводность 1.34 и 1.64 Вт/(м·К) при плотности 2631 и 2438 кг/м<sup>3</sup> соответственно.

По данным лабораторных исследований построена диаграмма изменения осредненных значений теплопроводности горных пород с их геологическим возрастом (рис. 3). Отмечается четко выраженная тенденция роста значений теплопроводности горных пород с их возрастом и глубиной



**Рис. 3. Диаграммы изменения осредненных значений теплопроводности горных пород с их геологическим возрастом.**

Породы: 1 – мелового возраста (К); 2 – юрского возраста (J); 3 – триасового, пермского и кебрийского возраста (Т + Р + Є).

залегания (см. рис. 3). Это связано с изменением вещественного состава пород и их плотностью. Так, среди песчаников разного возраста наибольшим средним значением теплопроводности характеризуются карбонатные 1.66 Вт/(м·К), наименьшее значение имеют полевошпатовые

1.18 Вт/(м·К). У глинистых пород средние значения теплопроводности изменяются от 1.16 Вт/(м·К) у алевролитов до 1.63 Вт/(м·К) у аргиллитов.

На основе выполненного авторами корреляционного анализа получены уравнения регрессии, описывающие зависимость коэффициента теплопроводности ( $\lambda$ ) от плотности скелета ( $\rho_{sk}$ ) для глинистых пород и песчаников различного состава (рис. 4):

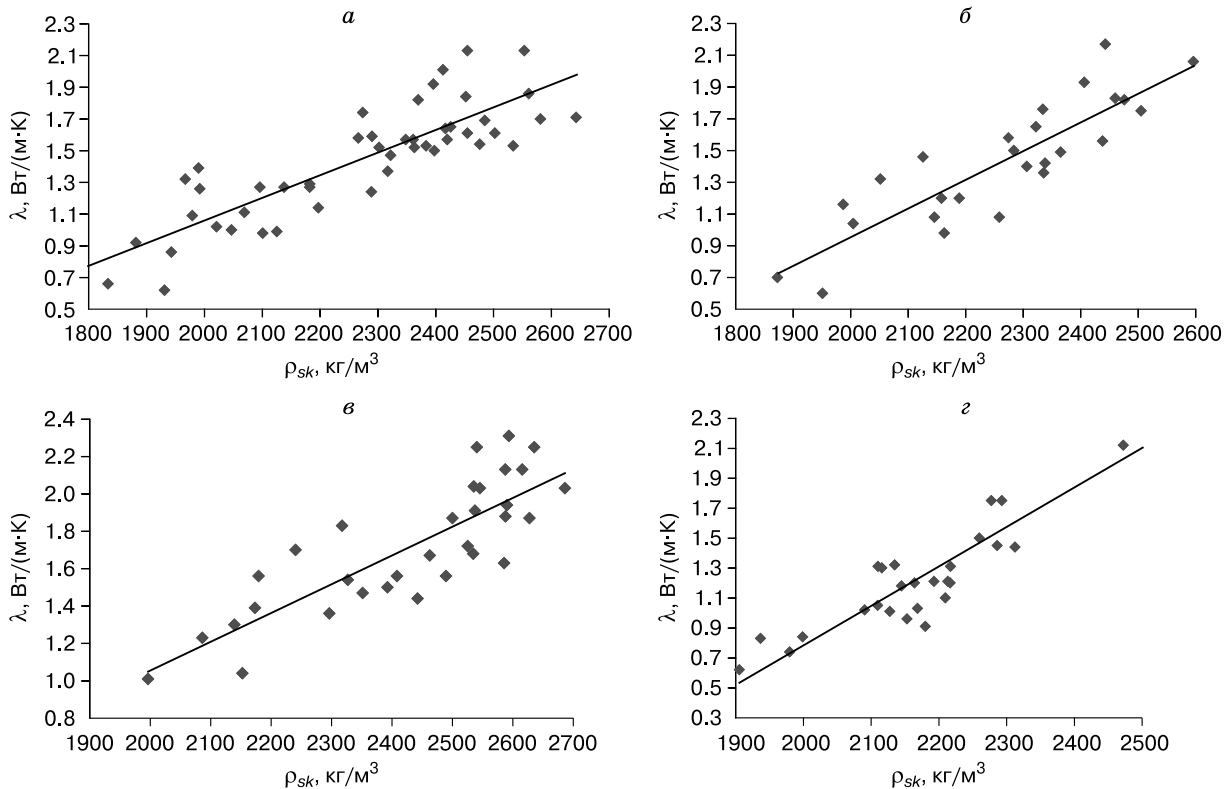
$$\lambda = 0.0014 \rho_{sk} - 1.7722 \quad (R^2 = 0.71) \text{ для алевролитов и аргиллитов;}$$

$$\lambda = 0.0018 \rho_{sk} - 2.7047 \quad (R^2 = 0.75) \text{ для глинистых песчаников;}$$

$$\lambda = 0.0015 \rho_{sk} - 2.0262 \quad (R^2 = 0.71) \text{ для карбонатных песчаников;}$$

$$\lambda = 0.0026 \rho_{sk} - 4.4765 \quad (R^2 = 0.77) \text{ для полевошпатовых песчаников.}$$

Лабораторные исследования теплофизических свойств горных пород выполнены для воздушно-сухого состояния образцов. В естественных условиях залегания горные породы в подмерзлотной толще находятся во влагонасыщенном состоянии. Экспериментальное изучение теплопроводности осадочных пород различных регионов в зависимости от коэффициента открытой пористости в воздушно-сухом ( $\lambda_{ad}$ ) и влагонасы-



**Рис. 4. Зависимость коэффициента теплопроводности ( $\lambda$ ) от плотности скелета ( $\rho_{sk}$ ):**

а – глинистых (алевролиты и аргиллиты) пород; б – глинистых песчаников; в – карбонатных песчаников; г – полевошпатовых песчаников.

щенном ( $\lambda_m$ ) состояниях проводилось многими исследователями. Ими были предложены различные эмпирические формулы для выражения этой зависимости [Гаурбеков, 1975; Ржевский, Новик, 1978; Дучков и др., 1987, 2013].

Для осадочных пород Лено-Виллюйской провинции по вещественному составу и условиям формирования наиболее близкими являются породы Западно-Сибирской плиты. Зависимость между значениями коэффициента теплопроводности воздушно-сухих ( $\lambda_{ad}$ ) и водонасыщенных ( $\lambda_m$ ) осадочных меловых и юрских отложений для талых пород глинистого и песчанистого составов установлена А.Д. Дучковым и Л.С. Соколовой [Дучков и др., 1987]. Корреляционная зависимость имеет вид

$$\lambda_m = 0.54 + 0.9 \lambda_{ad} \quad (1)$$

где  $\lambda_m$  – теплопроводность пород при их полном влагонасыщении;  $\lambda_{ad}$  – теплопроводность пород в воздушно-сухом состоянии.

Позже в ходе экспериментальных лабораторных исследований [Дучков и др., 2013] было установлено, что значения  $\lambda_m$  на 20–30 % выше значений  $\lambda_{ad}$ . Помимо вещественного состава породы рассматриваемых структур близки по значению их открытой пористости. Так, по данным Б.А. Соколова и др. [1986], отмечается изменение коэффициента пористости ( $K_p$ ) с глубиной в разновозрастных песчаниках отдельных районов Западно-Сибирской плиты. Градиенты уменьшения  $K_p$  с глубиной для описываемых отложений в рассматриваемых структурах в диапазоне глубин 500–3000 м колеблются в пределах 5–10 % на 1000 м (рис. 5) [Соколов и др., 1986]. В связи с этим выбор зависимости (1) коэффициентов теплопроводности  $\lambda_{ad}$  и  $\lambda_m$ , по мнению авторов, является оправданным. С использованием зависимости (1) авторами была выполнена оценка значений теплопроводности горных пород при учете их водонасыщенного состояния для талых и мерзлых пород (табл. 2).

Таким образом, средние значения теплопроводности сухих и водонасыщенных осадочных пород составляют (Вт/(м·К)): для песчаников первой группы (К)  $\lambda_{ad} = 1.54$ ,  $\lambda_m = 1.93$ , второй (J)  $\lambda_{ad} = 1.67$ ,  $\lambda_m = 2.04$ , третьей (Т + Р + Е)  $\lambda_{ad} = 1.91$ ,  $\lambda_m = 2.26$ ; для аргиллитов первой группы (К)  $\lambda_{ad} = 1.22$ ,  $\lambda_m = 1.64$ , второй (J)  $\lambda_{ad} = 1.60$ ,  $\lambda_m = 1.98$ , третьей (Т + Р + Е)  $\lambda_{ad} = 1.79$ ,  $\lambda_m = 2.15$  (см. табл. 2). В целом средние значения  $\lambda_m$  осадочных пород рассматриваемой структуры выше значений  $\lambda_{ad}$  на 15–25 %.

Используя полученные величины теплопроводности горных пород с учетом их полного влагонасыщения и геологического строения, авторы рассчитали значения эффективной теплопроводности [Гаурильев, 1998, 2013] стратиграфических

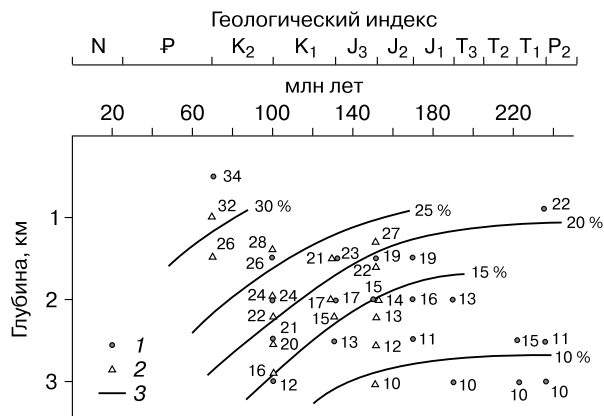


Рис. 5. Коэффициент открытой пористости разновозрастных песчаников.

1 – пород Лено-Виллюйской НПП; 2 – пород Западно-Сибирской плиты; 3 – линии средних значений открытой пористости пород по глубине, %.

подразделений по трем опорным скважинам – Намской, Виллюйской, Бахынайской (см. рис. 1, табл. 3). Полученные значения эффективной теплопроводности по свитам изменяются от 1.27 до 2.16 Вт/(м·К) в зависимости от возраста пород и их вещественного состава.

Так, для тимирдяжской свиты, сложенной породами верхнемелового возраста и представленной песками с прослоями глин и маломощными пачками песчаника, значения  $\lambda_{eff}$  варьируют в пределах 1.27–1.55 Вт/(м·К). Для нижнемеловых намской, эксеняхской, сангарской и батылхской свит, сложенных мощными пачками песчаников с прослоями алевролитов, аргиллитов и глин, значения  $\lambda_{eff}$  изменяются от 1.31 до 1.88 Вт/(м·К). Для пород верхнеюрского возраста, представленных чечумской, верхневолжской, сытагинской и джаской свитами, которые сложены частым переслаиванием песчаников, алевролитов, аргиллитов и углей, значения  $\lambda_{eff}$  изменяются в интервале 1.77–1.99 Вт/(м·К). Для пород средненижнеюрского возраста, в состав которых входят байлыкская, хоронгская, верхне-кыстатимская, нижнекыстатимская свиты, сложенные неравномерным переслаиванием мощных пачек песчаников, аргиллитов и алевролитов, значения  $\lambda_{eff}$  варьируют в пределах 2.00–2.03 Вт/(м·К). Для кельтерской свиты нижнетриасового возраста, представленной мощными пачками аргиллитов с подчиненными прослоями песчаников и алевролитов, значения  $\lambda_{eff}$  равны 2.16 Вт/(м·К).

Ранее геотермическими исследованиями [Семенов, Железняк, 2013, 2016] установлено, что рассматриваемая территория относится к области развития нестационарной мерзлой толщи со зна-

Таблица 2. Коэффициент теплопроводности основных типов горных пород Лено-Вилюйской нефтегазоносной провинции в талом  $\lambda_m$  (т) и мерзлом  $\lambda_m$  (м) состояниях с учетом их влагонасыщения

№ п/п	Порода	Геологический индекс	Объемный вес, г/см <sup>3</sup>	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	
				$\lambda_m$ (т)	$\lambda_m$ (м)*
1	Пески	К	$\frac{1.78-1.97}{1.9(12)}$	$\frac{1.08-1.37}{1.2(12)}$	2.57
2	Песчаники	К	$\frac{1.1-2.8}{2.2(84)}$	$\frac{1.30-4.19}{1.93(84)}$	2.67
		J	$\frac{1.95-3.08}{2.34(83)}$	$\frac{1.63-4.40}{2.04(83)}$	–
		T + P + E	$\frac{2.20-2.74}{2.44(28)}$	$\frac{1.86-2.66}{2.26(28)}$	–
3	Алевролиты	К	$\frac{1.83-2.19}{2.04(19)}$	$\frac{1.10-2.24}{1.59(19)}$	2.23
		J	$\frac{1.00-2.51}{2.19(7)}$	$\frac{1.45-2.43}{2.01(7)}$	–
4	Аргиллиты	К	$\frac{1.80-2.37}{2.13(7)}$	$\frac{1.52-1.91}{1.64(7)}$	2.03
		J	$\frac{1.00-2.71}{2.37(27)}$	$\frac{1.66-2.46}{1.98(27)}$	–
		T + P + E	$\frac{2.38-3.07}{2.6(6)}$	$\frac{1.80-2.46}{2.15(6)}$	–
5	Известняки	J	$\frac{2.32-2.60}{2.5(4)}$	$\frac{1.87-2.66}{2.19(4)}$	–
		T + P + E	$\frac{2.40-2.67}{2.56(6)}$	$\frac{1.79-2.89}{2.37(6)}$	–
6	Доломиты	J	$\frac{2.43-2.48}{2.45(3)}$	$\frac{1.96-2.38}{2.14(3)}$	–
		T + P + E	$\frac{2.27-2.67}{2.48(3)}$	$\frac{2.10-2.48}{2.31(3)}$	–
7	Глины	J	$\frac{2.00-2.19}{2.1(2)}$	$\frac{1.66-1.67}{1.67(2)}$	–
8	Уголь	J	$\frac{1.0-2.3}{1.67(2)}$	$\frac{1.40-1.92}{1.67(2)}$	–
9	Конгломераты	T + P + E	$\frac{2.41-2.47}{2.44(2)}$	$\frac{2.01-2.02}{2.02(2)}$	–
10	Долериты	T + P + E	$\frac{2.48-2.92}{2.63(3)}$	$\frac{1.52-1.95}{1.75(3)}$	–

Примечание. В числителе – предельные, в знаменателе – средние значения; в скобках – количество образцов для осреднения. К – породы мелового возраста; J – породы юрского возраста; T + P + E – породы триасового, пермского и кембрийского возраста.

\* Средние значения.

чительной неоднородностью теплового поля и мощностью мерзлой толщи от 45 до 820 м. В связи с этим породы нижне- и верхнемелового возраста Лено-Вилюйской провинции частично находятся в мерзлом состоянии. Для оценки теплопроводности пород в мерзлом состоянии  $\lambda_f$  с учетом коэффициента открытой пористости и при условии полного влагонасыщения пород авторами использовался теоретический метод расчета Р.И. Гаври-

лева [1998] для осадочных горных пород. По полученным данным средние значения теплопроводности ( $\lambda_f$ ) для мерзлых песков, песчаников, алевролитов и аргиллитов равны 2.57, 2.67, 2.23 и 2.03 Вт/(м·К) соответственно (см. табл. 2), что превышает значения теплопроводности образцов в воздушно-сухом состоянии для песков в 3.5 раза, песчаников и аргиллитов в 1.7 раза и алевролитов в 1.9 раза.

Таблица 3. Коэффициент эффективной теплопроводности ( $\lambda_{\text{эфф}}$ ) стратиграфических подразделений горных пород Лено-Виллюйской нефтегазоносной провинции

Опорная скважина	Система	Интервал, мощность, м	$\lambda_{\text{эфф}}$ , Вт/(м·К)	Отдел	Интервал, мощность, м	$\lambda_{\text{эфф}}$ , Вт/(м·К)	Свита, горизонт породы	Мощность, м	$\lambda_{\text{эфф}}$ , Вт/(м·К)			
Намская	Меловая	130–1900, 1770	1.34	Верхний	130–540, 272	1.27	Тимирдяхская свита	272	1.27			
				Нижний	540–1900, 1360	1.36	Намская свита Эксеняхская свита Сангарская свита	513 185 580	1.31 1.38 1.37			
	Юрская	1900–3000, 1100	2.03	Верхний	1900–2450, 670	1.95	Чечумская свита	670	1.95			
				Средний–нижний	2450–3000, 650	2.02	Байлькская свита	650	2.02			
Виллюйская	Меловая	26–1654, 1628	1.39	Верхний	26–514, 488	1.34	Тимирдяхская свита	488	1.34			
				Нижний	514–1654, 1140	1.41	III горизонт II горизонт I горизонт	367 491 282	1.27 1.52 1.44			
	Юрская	1654–2940, 1286	1.82	Верхний	1654–2695, 1041	1.77	III горизонт II горизонт I горизонт	339 173 531	1.45 1.89 2.03			
				Средний	2697–2940, 243	2.02	II горизонт I горизонт	131 112	2.02 2.03			
				Меловая	20–1428, 1408	1.70	Верхний	20–376, 356	1.55	Тимирдяхская свита	356	1.55
							Нижний	376–1458, 1082	1.81	Намская свита Эксеняхская свита Батыльхская свита	224 280 578	1.79 1.88 1.79
Юрская	1458–2730, 1272	2.00	Верхний	1458–1970, 512	1.99	Верхневолжская свита Сытагинская свита Джаскойская свита	90 60 362	1.93 2.02 2.00				
			Средний	1970–2290, 320	2.03	Хоронгская свита Верхнекыстатымская свита Нижнекыстатымская свита	160 74 86	2.03 2.06 2.02				
			Нижний	2290–2730, 440	2.00	Верхний Лейас Средний Лейас	110 330	1.99 2.01				
			Триасовая	2730–2825, 95	2.16	Нижний	2730–2825, 95	2.16	Кельтерская свита	95	2.16	

### ВЫВОДЫ

Исследована теплопроводность горных пород, характеризующих основные литологические разновидности Лено-Виллюйской нефтегазоносной провинции. Установлено, что теплопроводность горных пород изменяется в широком диапазоне – от 0.6 Вт/(м·К) в песках до 4.29 Вт/(м·К) в песчаниках, а плотность горных пород варьирует от 1000 кг/м<sup>3</sup> в глинах до 3080 кг/м<sup>3</sup> в песчаниках. Это обусловлено многообразием вещественного состава пород и осадочных толщ, слагающих рассматриваемую провинцию.

По полученным данным выделено три группы горных пород: меловые, юрские и объединенная группа триасового, пермского и кембрийского воз-

раста, где отмечается четко выраженная тенденция роста значений теплопроводности с увеличением геологического возраста горных пород.

С использованием гидрогеологических сведений и теоретических наработок расчетным путем получены значения теплопроводности горных пород при их полном влагонасыщении, характерном для естественных условий их залегания в исследуемой толще геологического разреза (до 3500 м). Для пород мелового возраста, которые частично находятся в мерзлом состоянии, вычислены коэффициенты теплопроводности, значения которых существенно превышают коэффициенты теплопроводности в воздушно-сухом состоянии пород. При этом приведены исходные данные лаборатор-



ных исследований образцов для возможной их дальнейшей интерпретации.

Выполнен корреляционный анализ и получены зависимости теплопроводности от плотности для различных типов и вещественного состава горных пород.

Следует отметить, что чередование (переслаивание) различных типов горных пород в разрезе и их неоднородность, характерная для геологического строения рассматриваемой провинции, во многом определяет широкий диапазон значений эффективной теплопроводности геологических толщ в разных частях провинции, что необходимо в дальнейшем учитывать при исследовании геотемпературного поля.

*Работа выполнена в рамках бюджетного проекта IX.135.2. “Геотемпературное поле и трансформация криолитозоны Северной Азии и горных областей Центральной Азии” и Интеграционного проекта СО РАН “Палеорекострукция теплового поля и криолитозоны Вилюйской синеклизы в позднем плейстоцене – голоцене”.*

### Литература

- Анциферов А.С.** Гидрогеология древнейших нефтегазоносных толщ Сибирской платформы. М., Недра, 1989, 176 с.  
Antsiferov, A.G., 1989. The Hydrogeological Features of the Ancient Oil and Gas-bearing Formations of the Siberian Platform. Nedra, Moscow, 176 pp. (in Russian)
- Гаврильев Р.И.** Метод определения теплофизических свойств почв и горных пород в квазистационарном режиме нагрева // Проблемы гидротермики мерзлотных почв. Новосибирск, Наука, 1988, с. 66–72.  
Gavriliev, R.I., 1988. Method for determination of thermophysical properties of soils and rocks in quasistationary heating mode, in: Hydrothermal problems of frozen soils. Nauka, Novosibirsk, pp. 66–72. (in Russian)
- Гаврильев Р.И.** Теплофизические свойства горных пород и напочвенных покровов криолитозоны. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 1998, 280 с.  
Gavriliev, R.I., 1998. The Thermal Physical Properties of Mountain Rocks and of Soil Covers of Permafrost. Publishing House of SB RAS, Novosibirsk, 280 pp. (in Russian)
- Гаврильев Р.И.** Каталог теплофизических свойств горных пород Северо-Востока России / Отв. ред. М.Н. Железняк, В.И. Жижин. Якутск, ИМЗ СО РАН, 2013, 172 с.  
Gavriliev, R.I., 2013. A Catalogue of thermal Physical Properties of Mountain Rocks of the North-East of Russia. Ed. by M.N. Zheleznyak and V.I. Zhizhin. Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, Yakutsk, 172 pp. (in Russian)
- Гаирбеков Х.А.** Исследование зависимости теплопроводности осадочных пород от степени влагонасыщения и ее использования в структурной терморазведке: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Махачкала, 1975, 24 с.  
Gairbekov, H.A., 1975. A study of dependence of the thermal conductivity of sedimentary rocks on the extent of water saturation and its use in structural thermal geological survey. The author's candidate's thesis review. Institute of Geothermal Issues, Dagestan Scientific Center, USSR Academy of Sciences, Makhachkala, 24 pp.
- Геология СССР.** Т. 18. Западная часть Якутской АССР. Ч. 1. Геологическое описание. М., Наука, 1970, кн. 1, 535 с.  
Geology of the USSR, vol. 18, 1970. The western part of the Yakutsk Autonomous Republic, part 1: the geological description. Book 1. Nauka, Moscow, 535 pp. (in Russian)
- Гидрогеология СССР.** Т. 20. Якутская АССР. М., Недра, 1970, 384 с.  
Hydrogeology of the USSR, vol. 20, 1970. Yakutsk Autonomous Republic. Nedra, Moscow, 384 pp. (in Russian)
- Грубов Л.А., Славин В.И.** Сравнительная оценка гидрогеологических условий различных районов Якутского артезианского бассейна в связи с нефтегазоносностью // Гидрогеологические исследования в нефтегазоносных районах. Л., Изд-во ВНИГРИ, 1971, с. 184–203.  
Grubov, L.A., Slavin, V.I., 1971. Comparative assessment of hydrogeological conditions of different regions of the Yakutsk artesian basin related to its oil and gas-bearing properties, in: Hydrogeological Studies in Oil and Gas-bearing Provinces. VNIIGRI, Leningrad, pp. 184–203. (in Russian)
- Дучков А.Д., Лысак С.В., Балобаев В.Т. и др.** Тепловое поле недр Сибири. Новосибирск, Наука, 1987, 193 с.  
Duchkov, A.D., Lysak, S.V., Balobayev, V.T., et al., 1987. The Thermal Field of the Earth's Entrails in Siberia. Nauka, Novosibirsk, 193 pp. (in Russian)
- 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.  
Duchkov, A.D., Sokolova, L.S., Ayunov, D.E., Zlobina, O.N., 2013. Thermal conductivity of sedimentary rocks of the Arctic part of Western Siberia. Geologiya i Geofizika 54 (12), 1952–1960.
- Попов Ю.А., Семенов В.Г., Коростылев В.М. и др.** Бесконтактное определение теплопроводности горных пород с помощью подвижного источника тепла // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли, 1983, № 7, с. 86–93.  
Popov, Yu.A., Semenov, V.G., Korostylev, V.M., et al., 1983. Remote assessment of thermal conductivity of mountain rocks by using a mobile heat source. Izv. AN SSSR, physics series 7, 86–93.
- Ржевский В.В.** Основы физики горных пород / В.В. Ржевский, Г.Я. Новик. М., Недра, 1978, 390 с.  
Rzhevsky, V.V., Novik, G.Ya., 1978. The Foundations of Alpine Rock Physics. Nedra, Moscow, 390 pp. (in Russian)
- Семенов В.П., Железняк М.Н.** Геотермические условия Вилюйской синеклизы // Криосфера Земли, 2013, т. XVII, № 4, с. 3–10.  
Semenov, V.P., Zhelezniak, M.N., 2013. Geothermal conditions in the Vilyui basin. Earth's Cryosphere XVII (4), 3–10.
- Семенов В.П., Железняк М.Н.** Особенности формирования геотемпературного поля и мощности многолетнемерзлой толщи Вилюйской синеклизы // Материалы Пятой конф. геокриологов России (Москва, 14–17 июня 2016 г.). М., Унив. книга, 2016, т. 2, с. 229–233.  
Semenov, V.P., Zhelezniak, M.N., 2016. Details of formation of the geotemperature field and permafrost thickness of the Vilyui basin, in: Proceedings of the Fifth Conference of the Geocryologists of Russia (Moscow, June 14–17, 2016). Universitetskaya Kniga, Moscow, vol. 2, pp. 229–233.
- Соколов Б.А., Сафронов А.Ф., Трофимук А.А. и др.** История нефтегазообразования и нефтегазоаккумуляция на востоке Сибирской платформы. М., Наука, 1986, 167 с.  
Sokolov, B.A., Safronov, A.F., Trofimuk, A.A., Fradkin, G.S., Bakin, V.E., Kashirtsev, V.A., Yapaskurt, O.V., Izosimova, A.N., 1986. The History of Oil and Gas Formation and Accumulation in the East of the Siberian Platform. Nauka, Moscow, 167 pp. (in Russian)
- Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия).** М., МАИК “Наука/Интерпериодика”, 2001, 571 с.  
Tectonics, Geodynamics, and Metal Genesis in the Territory of the Sakha Republic (Yakutia), 2001. MAIK Nauka/Interperiodika, Moscow, 571 pp. (in Russian)

Поступила в редакцию  
27 апреля 2018 г.