

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОСНОВНЫХ ТИПОВ ПОРОД ЭЛЬКОНСКОГО ГОРНОГО МАССИВА

Р.И. Гаврильев, М.Н. Железняк, В.И. Жижин, А.Р. Кириллин, А.Ф. Жирков, А.В. Пазынич

*Институт мерзлотоведения имени П.И. Мельникова СО РАН,
677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия; gubanova@mpi.ysn.ru*

Представлены и обсуждаются результаты исследований теплофизических свойств и физических параметров магматических, метаморфических, метаморфизованных и осадочных горных пород Эльконского горста Алданского щита. В 2011 г. выполнены определения на 220 образцах. Установлено, что указанные параметры горных пород характеризуются широким диапазоном их значений. Это свойственно метаморфическим и магматическим породам из-за их сложного минерального состава. Определены предельные и осредненные значения теплопроводности и объемной массы скелета для разных типов пород. Проведен подробный анализ полученных результатов в зависимости от особенностей вещественного состава горных пород.

Метаморфические породы, гранитные интрузивы, теплопроводность, объемная теплоемкость, температуропроводность, объемная масса скелета

THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF THE MAIN ROCK TYPES IN THE ELKON MOUNTAIN MASSIF

R.I. Gavriliev, M.N. Zheleznyak, V.I. Zhizhin, A.R. Kirillin, A.F. Zhirkov, A.V. Pazynich

Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, 677010, Yakutsk, Merzlotnaya st., 36, Russia; gubanova@mpi.ysn.ru

The results of study on the thermal properties and physical parameters of magmatic, metamorphic, metamorphosed and sedimentary rocks from the Elkton horst of the Aldan Craton have been presented and discussed. In 2011, 220 rock samples were investigated. It has been determined that the thermophysical properties of rocks have a wide range of their values. It is typical of metamorphic and magmatic rocks due to their complex mineral composition. The limit and average values of thermal conductivity and rock skeleton volume weight have been assessed. The obtained results have been analyzed in detail according to mineral composition of the rocks.

Metamorphic rocks, granite intrusions, thermal conductivity, volumetric heat capacity, thermal diffusivity, rock skeleton volume weight

ВВЕДЕНИЕ

Эльконский горный массив расположен в северной части Алданского щита (10–70 км южнее пос. Томмот). На этой площади открыта серия золотоурановых месторождений, которые в настоящее время планируются к освоению.

Определение теплопроводности горных пород различного состава с их детальной петрофизической характеристикой позволит объяснить выявленные региональные особенности геотемпературного поля, оценить параметры многолетнемерзлой толщи и величину внутриземного теплового потока.

Приведенные в работе данные будут использованы в теоретических расчетах геотемпературных полей и в проектных решениях при строительстве наземных и подземных сооружений в процессе освоения месторождений.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В процессе разведочного бурения было отобрано более 220 образцов керна, характеризующих

наиболее представительные по разрезу слои, а также типичные петрографические разновидности пород. Образец отбирали из средней части горизонта, длина столбика керна была более 5 см. После доставки проб в лабораторию образцы подвергали распиловке с полировкой торцов. Перед опытом подготовленные образцы увлажняли до полного влагонасыщения в эксикаторе. Из всех теплофизических характеристик экспериментально измеряли только коэффициент теплопроводности образцов. Объемная теплоемкость образцов находилась расчетным путем по формуле

$$c_g = (c_{ск} + c_{вл} W) \gamma_{ск},$$

где $c_{ск}$, $\gamma_{ск}$ – удельная теплоемкость и плотность сухого скелета, $\text{кг}/\text{м}^3$; $c_{вл}$ – удельная теплоемкость влаги, равная $4200 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ в талом и $2100 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ в мерзлом состояниях породы; W – влажность, отн. ед. Коэффициент температуропроводности a исследованных образцов горных пород находился по значениям коэффициента теплопроводности λ и объемной теплоемкости c_g из формулы связи: $a = \lambda/c_g$.

Удельная теплоемкость метаморфических и магматических пород изменяется в небольших пределах и для основных их разновидностей принимает следующие значения [Гаврильев, 2004]: 785 Дж/(кг·К) для гранита и пегматита, 790 для гнейса, 752 для глинистого сланца, 802 для гранодиорита, 773 для микроклина, 752 для порфирита, 760 Дж/(кг·К) для сиенит-порфира.

Коэффициент теплопроводности образцов измеряли при помощи теплового компаратора УИТ-1 разработки А.Н. Калинина [А.с. 949449 СССР, 1982] с инструментальной погрешностью не более $\pm 6\%$. Исследуемые образцы имели форму цилиндра высотой 5 см с гладко отшлифованной торцевой поверхностью. Определения проводили при комнатной температуре. Результатом одного опыта была средняя величина λ из 5–7 измерений в различных точках поверхности образца, что исключало случайные погрешности опыта из-за неоднородностей породы.

После каждого опыта методом гидростатического взвешивания и сушки определяли влажность и объемную массу скелета образцов.

Оценку теплофизических свойств четвертичных отложений проводили расчетным методом на основе материалов инженерно-геологических изысканий основных инженерно-геологических элементов (ИГЭ) разрезов территории. При этом использовали методику расчетной оценки эффективных теплофизических свойств и физических параметров горных пород, разработанную Р.И. Гаврильевым [2011]. Данная методика основана на знании теплофизических и физических параметров пород разрезов с учетом их мощности.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для определения теплопроводности пород отбирали образцы с различных глубинных интервалов из серии глубоких (до 1300 м) стволовых скважин, пробуренных вдоль зоны Южной, расположенной в восточной части Эльконского горного массива. Образцы взяты таким образом, чтобы были охарактеризованы типичные разновидности горных пород с различных глубин и структурно-вещественных комплексов. Всего проведены определения теплопроводности 218 образцов. Замеры значений теплофизических свойств горных пород приведены в табл. 1.

Испытания образцов во влажном состоянии выполнены на приборе при комнатной температуре. Поскольку образцы являются кристаллическими максимально плотными породами, их влажность была ничтожной (в табл. 1 она не указана). Кроме того, из-за почти нулевой влажности образцов измеренные теплофизические параметры горных пород относятся к их мерзлому состоянию.

В результате анализа этих замеров установлено, что они характеризуют широкий диапазон изменений каждой разновидности, это свойственно метаморфическим и магматическим породам вообще. Так, коэффициент теплопроводности изменяется от 1,47 до 7,71 Вт/(м·К), а объемная масса их кристаллического скелета – от 2236 до 3460 кг/м³ соответственно, что связано с многообразием минеральных парагенезисов магматических, метаморфических или метасоматических пород.

На основе полученных данных по теплофизическим свойствам горных пород и справочных сведений по грунтам [Гаврильев, 2004] оценены физические параметры и теплофизические характеристики четвертичных отложений Эльконского горста, что необходимо для проведения теплофизических расчетов при проектировании инженерных сооружений на территории осваиваемого месторождения. В расчетах исходили из данных по физико-механическим параметрам и составу отложений. Охарактеризованы все типы генезиса отложений, начиная от долины до водораздела данной территории. Выявлено, что в зависимости от состава грунтов физические параметры и теплофизические характеристики четвертичных отложений Эльконского горста изменяются в широких пределах: $\gamma_{\text{ск}} = 1,69–2,25$ г/см³, $W = 4,2–40,0\%$, $\lambda_{\text{т}} = 1,48–1,94$ Вт/(м·К), $\lambda_{\text{м}} = 2,15–2,42$ Вт/(м·К), $c_{\gamma} = 1825–1947$ кДж/(м³·К), $a_{\text{т}} \cdot 10^{-6} = 0,58–0,92$ м²/с, $a_{\text{м}} \cdot 10^{-6} = 0,96–1,26$ м²/с. Индексы “т” и “м” означают талое и мерзлое состояния пород соответственно.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В табл. 1 приведены предельные и осредненные значения теплофизических свойств и объемной массы скелета наиболее распространенных разновидностей магматических и метаморфических пород. Метаморфизованные граниты, в отличие от типичных, характеризуются широкими интервалами значений λ и $\gamma_{\text{ск}}$, что обусловлено их переменчивым минеральным составом. Однако осредненные значения проведенных замеров соответствуют параметрам нормальных гранитов, для которых $\gamma_{\text{ск}} = 2650$ кг/м³ и $\lambda = 3,0$ Вт/(м·К) [Гаврильев, 1998, 2004].

Охарактеризуем вкратце полученные результаты по каждой приведенной в таблице разновидности пород. При петрографическом описании по минеральному составу гранитов выделено 27 разновидностей, а по теплопроводности они объединены в три группы: микроклиновые, плагиоклазовые граниты и граниты с рудными минералами (сульфидами и магнетитом). Вариации их теплопроводности и плотности представлены в табл. 2. Максимальные величины теплопроводности и

Таблица 1. Предельные и осредненные значения теплофизических параметров и объемной массы магматических и метаморфических горных пород Эльконского горста Алданского щита

№ п/п	Типы пород	$\gamma_{ск}$, кг/м ³	λ , Вт/(м·К)	c_p , кДж/(м ³ ·К)	$a \cdot 10^{-6}$, м ² /с
1	Граниты	2580–2860	1,42–4,12	1990–2260	0,65–1,59
		2660 (53)	2,69 (57)	2100 (59)	1,27 (59)
2	Гнейсы	2580–2880	1,55–3,31	2030–2260	0,73–1,55
		2750 (37)	2,20 (37)	2170 (35)	1,03 (35)
3	Кристаллические сланцы	2670–3090	1,65–6,64	2100–2430	0,75–3,07
		2860 (41)	2,20 (41)	2240 (43)	0,97 (43)
4	Амфиболиты	2630–3460	1,98–4,20	2070–2570	0,88–1,71
		3100 (11)	2,92 (12)	2400 (11)	1,20 (11)
5	Кварциты	2480–2840	2,11–7,71	1950–2240	0,96–3,70
		2710 (11)	2,98 (11)	2136 (10)	1,43 (10)
6	Милониты	2670–2760	1,36–2,29	2102–2325	0,65–1,06
		2710 (2)	1,82 (2)	2200 (3)	0,86 (3)
7	Метасоматиты	2240–2940	1,67–4,02	1760–2510	0,95–1,74
		2670 (8)	2,60 (8)	2150 (9)	1,33 (9)
8	Метабазиты	2810 (1)	2,41 (1)	2205 (1)	1,01 (1)
9	Метадиориты	2730–3230	1,75–2,28	2150–2540	0,80–1,04
		2900 (5)	1,98 (5)	2260 (5)	0,89 (5)
10	Плагиоклазиты	2630–2920	1,61–3,60	2070–2200	0,77–1,74
		2720 (11)	2,45 (11)	2140 (11)	1,21 (11)
11	Лампрофиры	2560–2820	1,47–2,24	2080–2220	0,82–1,07
		2690 (8)	1,99 (8)	2120 (7)	0,98 (7)
12	Тектоническая брекчия с карбонатным цементом	2290–2720	1,40–3,09	1800–2140	0,73–1,46
		2500 (7)	1,95 (7)	1970 (7)	0,98 (7)
13	Сиенит-порфиры	2580–2650	1,75–2,07	2030–2090	0,86–0,99
		2610 (2)	1,91 (2)	2060 (2)	0,92 (2)
14	Кварц-микроклиновые прожилки в плагиоклазите с амфибол-пирротиновыми включениями	2710–3050	1,96–2,43	2140–2400	0,82–1,14
		2880 (2)	2,19 (2)	2270 (3)	0,98 (3)
15	Бластоклазиты	2700 (1)	2,37 (1)	2130 (1)	1,11 (1)
16	Трахисиениты	2480 (1)	2,04 (1)	1950 (1)	1,04 (1)

Примечание к табл. 1, 2. В числителе – предельные значения, в знаменателе – средние, в скобках – количество образцов для осреднения (N).

объемной массы скелета имеют граниты с сульфидным и магнетитовым оруденением из-за того, что рудные минералы характеризуются высокими значениями плотности и теплопроводности. Например, у магнетита $\lambda = 5,26$ Вт/(м·К), а у сфале-

рита $\lambda = 26,56$ Вт/(м·К) [Берч, 1949; Справочник..., 1969], а их объемная масса порядка 4000–5000 кг/м³.

Наименьшей теплопроводностью обладают плагиоклазовые граниты, так как минералы этой группы (альбиты, олигоклазы, андезины, лабрадоры, битовниты и анортиты), согласно данным К. Хорай (K. Horai) и Г. Симмонса (G. Simmons) [Смыслов, 1979; Моисеенко, 1986], имеют небольшие величины λ – от 1,55 до 2,31 Вт/(м·К).

Теплопроводность микроклиновых гранитов и пегматитов близка к теплопроводности нормальных гранитов. Основной породообразующий минерал этих гранитов – микроклин из группы калиевых полевых шпатов имеет λ почти такого же порядка, как и у нормальных гранитов: 2,42–2,92 Вт/(м·К) [Миснар, 1968; Справочник..., 1969; Смыслов, 1979].

Таблица 2. Плотность сухого скелета и теплопроводность характерных разновидностей гранитов Эльконского горста

№ п/п	Типы пород	$\gamma_{ск}$, кг/м ³	λ , Вт/(м·К)
1	Микроклиновые граниты и пегматиты	2530–2840	2,22–3,50
		2660 (41)	2,79 (41)
2	Плагиоклазовые граниты	2580–2870	1,67–3,20
		2700 (14)	2,16 (14)
3	Граниты с сульфидной и магнетитовой минерализацией	2680–3460	1,42–4,12
		2910 (4)	2,88 (4)

По минеральному составу среди кристаллических сланцев выделено девять разновидностей (см. табл. 1). Наиболее характерным их парагенезисом является биотит–амфибол–диопсид–плагиоклазовые кристаллические сланцы. Иногда в их составе присутствуют магнетит, гиперстен, сульфиды, а также милонитизированные прожилки. Значительные части разрезов слагают амфибол–плагиоклазовые кристаллические сланцы. Они характеризуются следующими значениями параметров: $\gamma_{\text{СК}} = 2790\text{--}3040 \text{ кг/м}^3$, среднее значение $\gamma_{\text{СК}} = 2860 \text{ кг/м}^3$ при количестве образцов для осреднения $N = 8$; $\lambda = 1,80\text{--}3,04 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, среднее значение $\lambda = 1,96 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ при $N = 8$. Плагиоклазовая основа кристаллических сланцев обеспечивает теплопроводность порядка $2,20 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

Содержание диопсида в кристаллических сланцах обуславливает возрастание значений их коэффициента теплопроводности и объемной массы скелета, так как диопсид обладает более высокими значениями этих параметров, чем плагиоклазы: $\gamma_{\text{СК}} = 3300 \text{ кг/м}^3$ и $\lambda = 3,62\text{--}4,93 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ [Берч, 1949; Справочник..., 1969]. Присутствие сульфидов в породах резко повышает теплопроводность кристаллических сланцев, вплоть до $6,64 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

Наиболее типичны минеральные парагенезисы гнейсов и гранитогнейсов: биотит–амфибол–кварц–плагиоклазовые гнейсы или гранитогнейсы. Плагиоклазовая составляющая гнейсов обеспечивает средние значения λ , близкие к теплопроводности кристаллических сланцев. У гнейсов, содержащих сульфиды, λ достигает $3,31 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. Повышенным значением $\lambda = 2,81\text{--}3,03 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ обладают гнейсы с высоким содержанием кварца без биотита. Биотитовые гнейсы характеризуются минимальными значениями коэффициента теплопроводности, вплоть до $1,51 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

Амфиболиты обладают довольно высокими средними значениями $\gamma_{\text{СК}} = 3100 \text{ кг/м}^3$ и $\lambda = 2,92 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. Особенно высокие значения $\lambda = 3,17\text{--}4,20 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ в амфиболитах наблюдаются из-за содержания в них сульфидов (пирротина) и магнетита.

Из всех метаморфических пород Эльконского горного массива самые высокие значения λ имеют кварциты, у которых теплопроводность иногда достигает $7,71 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ при средней ее величине, равной $3,33 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. Метасоматиты характеризуются существенными пределами изменения объемной массы скелета и коэффициента теплопроводности. Например, амфибол–карбонатные метасоматиты бывают в очень рыхлом состоянии ($\gamma_{\text{СК}} = 2240 \text{ кг/м}^3$), при этом их теплопроводность составляет всего лишь $\lambda = 1,67 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. В таких породах в результате воздействия поровых растворов происходят процессы выщелачивания карбо-

натов и образование пустот. В то же время метасоматиты почти такого же состава (амфибол–микрочлин–карбонатного состава) и представляют собой породы, которые находятся в весьма плотном состоянии ($\gamma_{\text{СК}} = 2940 \text{ кг/м}^3$) и имеют большую теплопроводность ($\lambda = 4,02 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$). Возможно, здесь объем растворенных карбонатов полностью заполнен калиевыми полевыми шпатами (микрочлином), а пустоты в породе отсутствуют.

Милониты, тонко перетертые горные породы с отчетливо сланцеватой текстурой, образованы в процессе динамического истирания в зонах дробления вдоль разломов. Они имеют малую теплопроводность порядка $1,36 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. В то же время это довольно плотные породы с $\gamma_{\text{СК}} = 2710 \text{ кг/м}^3$. Мы полагаем, что это объясняется тем, что в милонитах, образованных при истирании гранитогнейсов и гранитов, кварцевая составляющая находится в сильно раздробленном состоянии в окружении малотеплопроводных полевых шпатов.

Метадиориты и диориты – это глубинные породы, состоящие в основном из плагиоклаза (андезин с $\lambda = 1,57 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$), роговой обманки с $\lambda = 2,74 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, которые почти во всех случаях не содержат кварц. Поэтому их теплопроводность изменяется в небольших пределах – от $1,75$ до $2,28 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ и в среднем составляет $1,98 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, т. е. величина λ не очень большая, находящаяся посередине теплопроводностей вышеуказанных минералов. Отметим лишь, что иногда эти породы обладают большой плотностью, вплоть до 3230 кг/м^3 .

Лампрофиры – меланократовые гипабиссальные и жильные породы. В состав лампрофиров входят полевой шпат (иногда фельдшпатид) и цветные минералы, представленные биотитом, амфиболом, пироксеном и иногда оливином (присутствуют то порознь, то совместно) с $\lambda = 0,70 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ [Берч, 1949; Справочник..., 1969]. Их теплопроводность близка к средней величине вышеуказанных порообразующих минералов.

Плагиоклазиты образованы в основном плагиоклазом среднего или кислого состава (андезиты, олигоклазы) или плагиоклазом основного состава (лабрадоры, анортиты). Теплопроводность этих минералов находится в пределах от $1,55$ до $2,31 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ [Кобранова, 1962; Справочник..., 1969]. Однако в наших измерениях обнаруживается, что теплопроводность плагиоклазитов метаморфического генезиса изменяется в гораздо больших пределах – от $1,61$ до $3,60 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ со средней величиной $2,45 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. Объемная масса кристаллического скелета плагиоклазитов имеет устойчивое значение около 2700 кг/м^3 .

Сиенит–порфиры и щелочные порфириты образуют дайки и небольших размеров секущие тела, которые составлены только из калиевых полевых шпатов (70 %) с пироксенами (30 %), и их петро-

Таблица 3. Сводные исходные данные основных типов грунтов Эльконского горста

№ п/п	Описание грунтов	$\gamma_{скр}$, г/см ³	W, %	λ , Вт/(м·К)		c_{γ} , кДж/(м ³ ·К)		$a \cdot 10^{-6}$, м ² /с	
				талое	мерзлое	талое	мерзлое	талое	мерзлое
1	Почвенно-растительный слой (дерн, биогенные грунты)	0,62	$\frac{30,0-70,0}{67,0}$	$\frac{0,30-0,50}{0,50}$	$\frac{0,40-1,00}{1,00}$	$\frac{1562-2604}{2534}$	$\frac{1172-1692}{1659}$	$\frac{0,20}{0,20}$	$\frac{0,34-0,60}{0,60}$
2	Торф	0,18	$\frac{100,0-480,0}{450,0}$	$\frac{0,13-0,52}{0,52}$	$\frac{0,10-1,30}{1,30}$	$\frac{1044-3917}{3690}$	$\frac{666-2102}{1989}$	$\frac{0,12-0,13}{0,14}$	$\frac{0,15-0,62}{0,58}$
3	Супесь дровяная, супесь гравелистая со щебнем	$\frac{1,22-1,55}{1,55}$	$\frac{10,0-45,0}{20,2}$	$\frac{0,75-1,60}{1,60}$	$\frac{1,20-2,30}{2,30}$	$\frac{1790-3202}{2454}$	$\frac{1465-2050}{1797}$	$\frac{0,41-0,65}{0,65}$	$\frac{0,82-1,28}{1,28}$
4	Суглинок дровяной, суглинок со щебнем, суглинок песчанистый	$\frac{1,20-1,64}{1,64}$	$\frac{10,0-50,0}{20,1}$	$\frac{0,60-1,40}{1,40}$	$\frac{0,75-2,10}{1,70}$	$\frac{1963-3452}{2659}$	$\frac{1619-2192}{1966}$	$\frac{0,30-0,53}{0,53}$	$\frac{0,46-0,96}{0,86}$
5	Песок гравелистый, песок средней крупности	$\frac{1,49-1,83}{1,83}$	$\frac{5,0-30,0}{17,6}$	$\frac{1,15-2,00}{2,00}$	$\frac{1,20-3,20}{3,20}$	$\frac{1652-2910}{2620}$	$\frac{1460-1971}{1944}$	$\frac{0,76}{0,76}$	$\frac{0,82-1,65}{1,65}$
6	Галечниковый грунт, щебенный грунт (с супесчаным заполнителем)	1,90	$\frac{5,0-16,0}{12,8}$	$\frac{1,15-1,80}{1,70}$	$\frac{1,20-2,50}{2,30}$	$\frac{1835-2713}{2458}$	$\frac{1636-2075}{1947}$	$\frac{0,63-0,69}{0,69}$	$\frac{0,65-1,18}{1,18}$
7	Глыбовый грунт, щебенный грунт	$\frac{2,13-2,32}{2,32}$	$\frac{1,0-10,0}{2,4}$	$\frac{1,25-1,90}{2,00}$	$\frac{1,40-2,30}{2,30}$	$\frac{1849-2548}{2034}$	$\frac{1849-2100}{1917}$	$\frac{0,68-0,98}{0,98}$	$\frac{0,76-1,20}{1,20}$
8	Гранитоиды	2,60	$\frac{1,0-4,0}{2,4}$	$\frac{2,64}{2,64}$	$\frac{2,64}{2,64}$	$\frac{2046}{2046}$	$\frac{2046}{2046}$	$\frac{1,29}{1,29}$	$\frac{1,29}{1,29}$

Примечание. В числителе – предельные значения параметров, в знаменателе – значения параметров, использованных в расчетах эффективных теплофизических характеристик четвертичных отложений. Талое и мерзлое состояние грунтов.

Таблица 4. Эффективные значения теплофизических свойств и физических параметров четвертичных отложений Эльконского горста

№ п/п	Местоположение скважин	Генетический тип отложений	Мощность отложений, м	$\gamma_{ск}^*$, г/см ³	W, %	λ , Вт/(м·К)		c_p , кДж/(м ³ ·К)		$a \cdot 10^{-6}$, м ² /с	
						талое	мерз-лое	талое	мерз-лое	талое	мерз-лое
1	Верхняя часть склона сев.-зап. экспозиции долины р. Делинда	Коллювий	8,8	2,25	4,2	1,94	2,30	2106	1922	0,92	1,20
2	Долина р. Делинда	Аллювий, делювиально-элювиальный	7,5	1,78	18,0	1,60	2,35	2557	1937	0,62	1,21
3	Средняя часть склона сев.-зап. экспозиции долины р. Делинда	Делювиально-элювиальный	6,9	1,74	20,1	1,48	2,15	2560	1928	0,58	1,11
4	Верхняя часть склона сев.-зап. экспозиции долины р. Делинда	Коллювий, делювиально-элювиальный	10,0	1,69	40,0	1,56	2,42	2672	1949	0,58	1,24
5	Верхняя часть склона юго-вост. экспозиции верховья долины р. Кене-Сала	Коллювий	9,7	1,73	16,0	1,68	2,30	2354	1825	0,71	1,26
6	Нижняя часть склона сев.-вост. экспозиции верховья долины р. Кене-Сала	Делювий	10,8	2,21	5,2	1,91	2,30	2148	1925	0,89	1,19
7	Верхняя часть склона юго-вост. экспозиции верховья долины р. Кене-Сала	Коллювий	6,0	1,66	19,5	1,58	2,11	2587	1910	0,61	1,10
8	Верховье долины р. Кене-Сала	Аллювий	12,4	1,83	13,1	1,75	2,31	2292	1848	0,76	1,25
9	Нижняя часть склона южной экспозиции руч. Узкий	Коллювий, элювий	5,0	2,12	7,9	1,72	20,7	2194	1924	0,78	1,07
10	Площадка вахтового поселка рудника № 1. Водораздел	Элювиально-делювиальный	3,3	1,98	10,8	1,70	2,30	2458	1947	0,69	1,18
11	Площадка вахтового поселка рудника № 1. Водораздел	То же	4,0	1,98	10,8	1,70	2,30	2458	1947	0,69	1,18
12	Площадка вахтового поселка рудника № 1. Водораздел	»	2,8	1,98	10,8	1,70	2,30	2458	1947	0,69	1,18
13	Площадка вахтового поселка рудника № 1. Водораздел	»	2,2	1,98	10,8	1,70	2,30	2458	1947	0,69	1,18
14	Площадка вахтового поселка рудника № 1. Водораздел	»	3,6	1,84	16,1	1,69	2,35	2452	1885	0,69	1,25

физические характеристики полностью соответствуют этим минеральным соотношениям.

Объемная теплоемкость для данного типа пород определяется значением их объемной массы скелета и за редким исключением меняется в небольших пределах. Для температуропроводности характерна аналогичная закономерность изменения коэффициента теплопроводности горных пород по их типам.

Для выполнения инженерных расчетов, разработки проектных решений и прогноза инженерно-геологических условий при освоении территории необходима оценка теплофизических и физи-

ческих параметров преимущественно четвертичных отложений. Нами на основе материалов инженерно-геологических изысканий выполнена оценка теплофизических свойств основных ИГЭ разрезов для различных участков, расположенных на территории Эльконского горного массива (табл. 3, 4).

В табл. 3 приведены сводные данные физических и теплофизических параметров основных типов грунтов на территории Эльконского горного массива, определенных в процессе инженерно-геологических изысканий, лабораторных измерений по образцам горных пород (см. табл. 1) и из

справочных сведений (по работам Р.И. Гаврильева [2004, 2011]).

На основе данных табл. 3 выполнены расчеты (по 17 скважинам и 95 литологическим разностям) теплофизических свойств основных ИГЭ разреза в слое годовых теплооборотов для различных элементов рельефа (водоразделы, склоны, речные долины и др.). Данные по указанной методике приведены и обобщены в табл. 4 в виде эффективных значений теплофизических свойств, а также физических параметров четвертичных отложений Эльконского горста.

ВЫВОДЫ

Исследования тепловых свойств и физических параметров магматических, метаморфических и метаморфизованных осадочных пород Эльконского горста Алданского щита позволяют сделать следующие выводы.

1. Установлено, что теплофизические свойства горных пород характеризуются широким диапазоном изменений, что свойственно для регионов с архей-раннепротерозойской историей развития. Коэффициент теплопроводности изменяется от 1,47 до 7,71 Вт/(м·К), а объемная масса кристаллического скелета – от 2236 до 3460 кг/м³. Это обусловлено сложным минеральным составом отдельных магматических, метаморфических и метасоматических пород.

2. Выявлены предельные и осредненные значения теплофизических свойств и объемной массы кристаллического скелета для наиболее характерных петрографических разновидностей горных пород.

3. Подробный анализ полученных результатов по этим параметрам в зависимости от особенностей вещественного состава исследованных типов горных пород показал, что присутствие рудных минералов (сульфиды, магнетиты и сфалериты) существенно повышает теплопроводность горных пород.

4. Определены следующие значения теплопроводности λ , Вт/(м·К):

- для кварцитов (7,71) – самые высокие значения λ из всех метаморфических пород;
- для гнейсов (3,31), амфиболитов (3,17–4,20), гранитов (4,12), кристаллических сланцев (6,64);
- для метаморфических пород (метадиоритов, диоритов, гнейсов, кристаллических сланцев и метаморфизованных плагиоклазовых гранитов), плагиоклазовая основа которых обеспечивает близкие средние значения λ (от 1,98 до 2,20);

– для метасоматитов, для которых характерны значительные пределы изменения объемной массы скелета (2240–2940 кг/м³) и $\lambda = 1,67–4,02$ Вт/(м·К), что объясняется выщелачиванием карбонатов под воздействием поровых растворов и образованием пустот в одном случае и заполнением их калиевыми шпатами (микроклины) в другом;

– для биотитовых гнейсов (1,51), а также метадиоритов и диоритов (1,75), не содержащих в своем составе кварца, – самые низкие значения λ из всех метаморфических пород.

5. Для прогноза динамики геотемпературного поля массива в проектных решениях наземных и подземных сооружений в процессе разработки месторождений и строительства инженерных конструкций выполнена оценка физических и теплофизических свойств основных типов грунтов четвертичных отложений (см. табл. 3), а также произведены расчеты (по 17 скважинам и 95 литологическим разностям грунтов) теплофизических свойств основных инженерно-геологических элементов разрезов в слое годовых теплооборотов для водоразделов, склонов и днищ речных долин (см. табл. 4).

Литература

- А.с. 949449 СССР.** Компаратор для экспресс-измерений коэффициента теплопроводности материалов / А.Н. Калинин. Оpubл. 1982, Бюл. № 29, с. 180.
- Берч Фр.** Справочник для геологов по физическим константам / Фр. Берч, Дж. Шевер, Г. Спайсер. М., Изд-во иностран. лит., 1949, 303 с.
- Гаврильев Р.И.** Теплофизические свойства горных пород и напочвенных покровов криолитозоны / Р.И. Гаврильев. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 1998, 280 с.
- Гаврильев Р.И.** Теплофизические свойства компонентов природной среды в криолитозоне: Справ. пособие / Р.И. Гаврильев. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2004, 146 с.
- Гаврильев Р.И.** Теплофизические свойства отложений Енисей-Хатангского прогиба и его южного обрамления // Проблемы инженерного мерзлотоведения: Материалы IX Международн. симп. (Мирный, 2011). Якутск, ИМЗ СО РАН, 2011, с. 404–409.
- Кобранова В.Н.** Физические свойства горных пород / В.Н. Кобранова. М., Госгеолтехиздат, 1962, 490 с.
- Миснар А.** Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций / А. Миснар. М., Мир, 1968, 464 с.
- Моисеенко У.И.** Температура земных недр / У.И. Моисеенко, А.А. Смыслов. Л., Недра, 1986, 180 с.
- Смыслов А.А.** Тепловой режим и радиоактивность Земли / А.А. Смыслов, У.И. Моисеенко, Т.З. Чадович. Л., Недра, 1979, 191 с.
- Справочник** физических констант горных пород / Под ред. С. Кларка мл. М., Мир, 1969, 543 с.

Поступила в редакцию
17 августа 2012 г.