

## ГЕОТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ И МОЩНОСТЬ КРИОГЕННОЙ ТОЛЩИ В ЗОНЕ СОЧЛЕНЕНИЯ ЕНИСЕЙ-ХАТАНГСКОГО ПРОГИБА С ТУНГУССКОЙ СИНЕКЛИЗОЙ

М.Н. Железняк, И.Е. Мисайлов, В.А. Кринин\*

*Институт мерзлотоведения имени П.И. Мельникова СО РАН,  
677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия; fe@mpi.ysn.ru  
\*ЗАО “Ванкорнефть”, 660075, Красноярск, ул. Республики, 51, Россия*

На основе геотермических исследований в глубоких скважинах дана характеристика геотемпературного поля и определена мощность толщи мерзлых пород сложной в геолого-тектоническом отношении переходной зоны от Енисей-Хатангского прогиба к Тунгусской синеклизе. В лабораторных условиях были определены теплофизические параметры основных типов горных пород и оценены величины внутриземного теплового потока в мерзлой толще и подмерзлотном горизонте. В цикле повторных геотермических измерений получена оценка времени восстановления теплового режима в стволе скважины после окончания бурения. По данным проведенных в 2010–2013 гг. исследований построен мерзлотно-геотермический разрез до глубины 1500 м, характеризующий особенности геотемпературного поля региона.

*Температура горных пород, геотермический градиент, мощность толщи мерзлых пород, внутриземной тепловой поток, теплофизические свойства, коэффициент теплопроводности, геотермический разрез*

## SUBSURFACE TEMPERATURE FIELD AND PERMAFROST THICKNESS AT THE FUNCTION OF THE YENISEI-KHATANGA TROUGH AND TUNGUSKA BASIN

M.N. Zhelezniak, I.E. Misailov, V.A. Krinin\*

*Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, 677010, Yakutsk, Merzlotnaya st., 36, Russia; fe@mpi.ysn.ru  
\*ZAO “Vankorneft”, 660075, Krasnoyarsk, Respubliki st., 51, Russia*

Based on the geothermal measurements in deep boreholes, this study provides the first characterization of the subsurface temperature field and the permafrost thickness in the geologically and tectonically complicated, transitional zone extending from the Yenisei-Khatanga trough to the Tunguska basin. The laboratory determinations of thermophysical properties for the main types of rocks, as well as the estimations of geothermal heat fluxes in and below the permafrost are presented. Based on the cycle of repeated geothermal measurements, the time of recovery of the temperature regime in the boreholes after drilling has been accessed. The data obtained in 2010–2013 have been used for constructing the geothermal profile up to the depth of 1.500 m characterizing peculiarities of the subsurface temperature field in the region.

*Ground temperature, geothermal gradient, permafrost thickness, geothermal heat flux, thermophysical properties, thermal conductivity, geothermal profile*

### ВВЕДЕНИЕ

Глубина и скорость промерзания пород земной коры во многом зависят от теплового состояния глубоких горизонтов литосферы. Именно поэтому полную картину о глубине промерзания пород можно получить только в результате геотермических исследований, охватывающих всю мерзлую толщу и подстилающих ее талых пород [Балобаяв, 1991]. При изучении современного теплового состояния пород важную роль играют величины тепловых потоков в талых и мерзлых породах. Соотношение тепловых потоков в талых и мерзлых породах по обе стороны фазовой границы непосредственно указывает на современное состояние мерзлых толщ. Использование этого соотношения открывает дополнительные возможности для изучения и реконструкции палеотемпературы мерз-

лых толщ, для палеогеографических построений. Пространственное распределение теплового потока позволяет наиболее полно представить тепловую ситуацию недр регионов и является дополнительным критерием для выделения границ геоструктур различного порядка и, что особенно важно, граничных (переходных) областей между ними.

В 2010–2012 гг. сотрудниками Института мерзлотоведения (ИМЗ) им. П.И. Мельникова СО РАН совместно с ЗАО “Ванкорнефть” на Кыстыктахской площади выполнены геотермические исследования и получены новые данные о мощности многолетнемерзлой толщи (ММТ) и тепловом поле горных пород в пределах переходной зоны от Енисей-Хатангского прогиба к Сибирской платформе.

### ПРИРОДНЫЕ УСЛОВИЯ

Кыстыктахская площадь находится на северо-востоке Красноярского края, в северо-западных отрогах плато Путорана, в верховье р. Кыстыктах (рис. 1).

*Климат* района резко континентальный, субарктический, с продолжительной холодной зимой и коротким теплым летом. Среднегодовая температура воздуха  $-10,8^{\circ}\text{C}$ . Январь наиболее холодный месяц, средняя температура  $-29,9^{\circ}\text{C}$ , минимальная  $-58^{\circ}\text{C}$ . Июль наиболее теплый месяц, средняя температура  $12,4^{\circ}\text{C}$ , максимальная  $31^{\circ}\text{C}$ . Годовое количество осадков составляет 368 мм, среднегодовая относительная влажность 78 %. На зимний период приходится 197 мм осадков [Кобышева, 2001].

*Рельеф* плато Путорана тесно связан с геологической историей развития. В результате чередования стадий поднятия и пенепленизации, начиная с позднего мела и заканчивая современностью, на нем сформировались специфические ступенчатые платформы с чередованием выровненных и крутых участков [Гаврилов, 1979]. После ослабления тектонических поднятий в раннем плиоцене началось постепенное разрушение склонов с формированием ступеней за счет развития экзогенных процессов, в том числе ледниковой деятельности с формированием каров и цирков.

*Гидрографическая сеть* района принадлежит бассейну р. Дудышты (правого притока Пясины) и является довольно густой и равномерно распределенной. Основные реки района – Кыстыктах, Самоедская речка, Мастах-Сала, Ондодоми – имеют ширину от 30 до 300 м и глубину от 0,5 до 3–4 м.

Самой крупной водной артерией района является р. Кыстыктах. Долины рек корытообразной формы, местами ущельеобразной, сложены преимущественно песчано-валунными отложениями. Долину р. Кыстыктах осложняют стекающие в нее с перевалов ручьи. Форма и характер отложений в их долинах указывает на то, что ранее ручьи были селевыми лотками.

Материалы геолого-съёмочных и геолого-разведочных работ, выполненных в разные годы сотрудниками Красноярской комплексной геолого-съёмочной экспедиции, Полярной геолого-разведочной экспедиции (ГРЭ), Норильской комплексной ГРЭ и другими, свидетельствуют о том, что геологический разрез исследуемой территории до глубины 10–20 м представлен четвертичными отложениями, глубже залегают эффузивные базальты и туфы, осложненные миндалитами из кварцитов и кальцитов, а с глубины более 1100 м – осадочные породы (песчаники, алевролиты, доломиты, известняки, мергели).

В гидрогеологическом плане район входит в состав Курейско-Норильского района Тунгусского артезианского бассейна. В разрезе осадочного чехла бассейна выделяются два гидродинамических этажа: нижний, объединяющий водоносные комплексы рифея и нижнего палеозоя, и верхний, включающий верхнепалеозойские и нижнемезозойские комплексы [Гидрогеология..., 1972].

Район исследований расположен севернее полярного круга в зоне развития сплошной многолетнемерзлой толщи мощностью до 500 м. Ниже деятельного слоя залегает мощная толща многолетнемерзлых пород, кровля которых является водоупором для надмерзлотных вод. Скопления

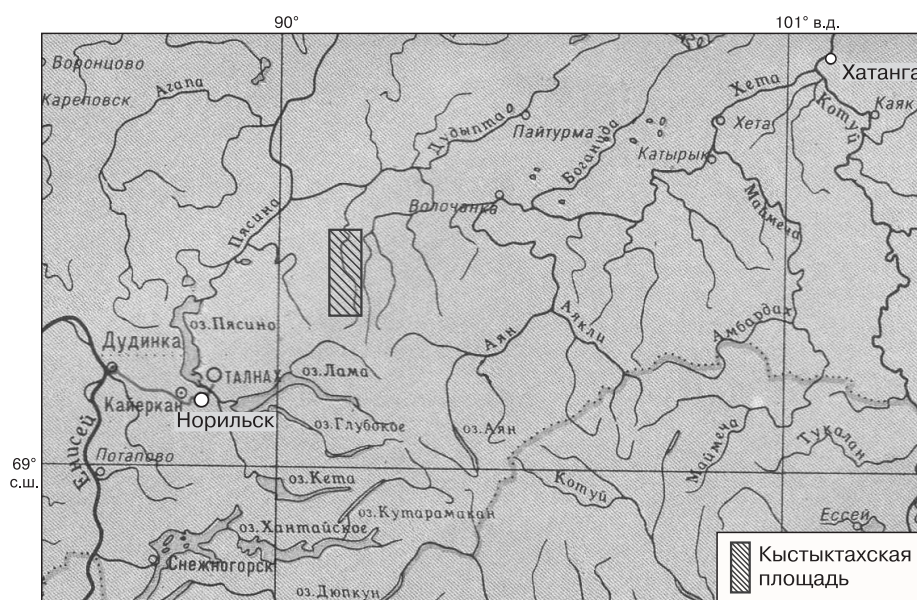


Рис. 1. Схематическая карта расположения района работ.

этих вод приурочены к отрицательным формам рельефа и широким водораздельным пространствам. Миграция надмерзлотных вод слабая, так как питание их происходит в основном за счет атмосферных осадков. Под долинами крупных рек и озер могут быть развиты сквозные талики.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В геокриологии главным методом определения мощности толщ мерзлых пород (нулевой изотермы) является метод температурных замеров в стволе выстоявшейся скважины. Геотермические измерения в скважинах Кыстыктахской площади проводились точечным методом, установками, изготовленными на базе полупроводниковых терморезисторов [Балобаев, 1985].

В области распространения многолетнемерзлых пород пьезометрический уровень подземных вод в большинстве случаев значительно выше отметки подошвы толщи мерзлых пород (ТМП), а на исследуемой площади его превышение составляло от 150 до 300 м. Поэтому при восстановлении температуры в ТМП ствол с находящейся в ней жидкостью замерзает в течение 3–5 дней, что не позволяет в дальнейшем проводить температурные измерения. Оборудование скважин глухой обсадной колонной требует больших материаль-

ных затрат. Вследствие этого нами было принято решение использовать на Кыстыктахской площади глубокие стационарные геотермические установки с последующим их «вмораживанием». По истечении определенного времени (более года) при проведении геотермических измерений были получены данные, близкие к естественному температурному полю.

На рассматриваемой территории геотермические исследования осуществлялись в скважинах (глубиной от 900 до 1500 м) непосредственно после окончания бурения и проведения каротажных работ. В дальнейшем все скважины оборудовались стационарными установками.

Теплофизические исследования кернов горных пород выполнялись в лабораторных условиях при помощи прибора оптического сканирования для измерения теплопроводности (Thermal Conductivity Scanning – TCS) и теплового компаратора УИТ-1 [Гаврильев, 1998].

В расчетах эффективных теплофизических свойств литологических разрезов Кыстыктахской площади в качестве исходных параметров использованы данные измерений коэффициента теплопроводности образцов горных пород, доставленных в лабораторию (всего 90 образцов) и характеризующих литологические разновидности пород.

Внутрискважинный тепловой поток рассчитывался в интервалах разреза, в которых выполнены температурные измерения и оценен коэффициент теплопроводности пород. В процессе обработки из термограмм исключались интервалы, нарушенные движением жидкости по стволу скважины, а также интервалы пород, невыстоявшихся (в тепловом отношении) после нарушения при бурении или испытаниях [Балобаев, 1991; Железняк, 2005].

### ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

Согласно [Геокриология..., 1989; Геокриологическая карта..., 1996], в районе исследований многолетнемерзлые породы развиты повсеместно и характеризуются сплошным распространением. Мощность криогенной толщи в Енисей-Хатангском прогибе, по разным данным [Баранов, 1956; Гинзбург, 1971; Балобаев, 1983], оценивается от 350 до 500 м, а в северо-восточной части Тунгусской синеклизы – от 550 до 850 м [Балобаев, 1983]. В переходной зоне от Енисей-Хатангского прогиба к Тунгусской синеклизе до 2010 г. геотермических измерений не проводилось, а мощность ТМП оценивалась по аналогии с соседними территориями по геофизическим данным или расчетам.

В 2009–2012 гг. сотрудниками ИМЗ СО РАН на Кыстыктахской площади были проведены геотермические исследования в девяти скважинах глубиной от 900 до 1500 м (рис. 2).

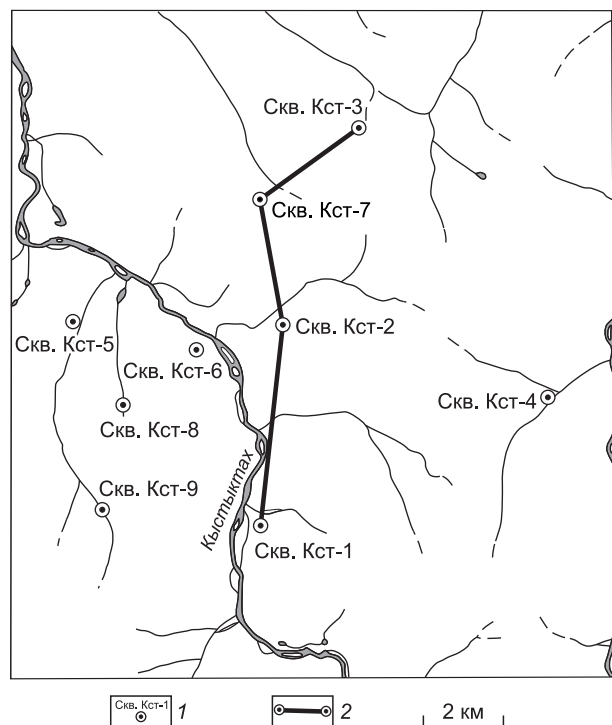


Рис. 2. Схема расположения скважин и линии разреза на Кыстыктахской площади.

1 – номер скважины; 2 – линия разреза.

В процессе работ была дана оценка времени восстановления температурного режима скважин после бурения. По полученным данным установлено, что в скважине Кст-1 по истечении трех месяцев температурный режим был близок к естественному, что подтверждается повторными замерами в течение 2,5 лет. Следует отметить, что в подмерзлотном горизонте время восстановления теплового режима значительно меньше, чем в ТМП. Так, по данным повторных замеров в двух скважинах, температура горных пород через 25 дней после окончания бурения была близка (до 0,1 °С) к значению температуры, измеренному через 2 года. По всем скважинам, в которых проводились повторные измерения, температура пород в подмерзлотном горизонте, полученная непосредственно после выполнения стандартного каротажа (через 2–4 сут по окончании бурения), отличалась на 0,1–0,5 °С от температуры через 1 год и более (за исключением трещиноватых или сильно нарушенных в процессе бурения зон). При этом градиент температуры (от 2,4 до 3,2 °С/100 м) был близок к значению в скважинах с выстоявшимся температурным режимом. Таким образом, время восстановления температуры по стволу 1000-метровой скважины (при сроках ее бурения 5–7 месяцев) в пределах Кыстыктахской площади составило 6–8 месяцев.

По данным геотермических исследований установлено, что температура пород в среднем течении р. Кыстыктах варьирует от –4,5 до –6,6 °С и определяется местоположением участка в рельефе и связанными с этим особенностями формирования снежного и растительного покровов. Мощность современной ТМП изменяется от 185 до 390 м (табл. 1). Небольшая ее мощность для холодного по климатическим характеристикам региона связана с относительно высокими температурами на глубине годовых теплооборотов и повышенным внутриземным тепловым потоком, вероятно, характерным для зоны контакта Енисей-Хатангского прогиба с Сибирской платформой.

Температура пород на глубинах 500, 1000 и 1500 м изменяется от 3,3 до 5,2 °С, от 15,4 до 29,1 °С и от 24,0 до 28,7 °С соответственно. Величина геотермического градиента в мерзлой толще варьирует от 0 до 3,5 °С/100 м, а в подмерзлотном горизонте (в зависимости от состава пород) – от 2,4 до 3,2 °С/100 м. Температурные кривые по скважинам Кст-1 и Кст-2 приведены на рис. 3.

В характере геотемпературных кривых Кыстыктахской площади выделяется от двух до трех интервалов, отличающихся градиентом температуры:

1) интервал (0–30 м) с отрицательным или нулевым градиентом;

2) интервал (130–300 м) с положительным градиентом от 2,1 до 2,7 °С/100 м в толще мерзлых пород;

3) интервал (700–1100 м) с положительным градиентом в подмерзлотной толще, значения которого варьируют от 2,6 °С/100 м (Кст-3) до 3,2 °С/100 м (Кст-2).

Теплофизические свойства горных пород Кыстыктахской площади характеризуются широким диапазоном изменения теплопроводности – от 0,83 до 3,57 Вт/(м·К). По генетическому типу и минеральному составу образцов горных пород выделено 11 типов пород (табл. 2). Коэффициент теплопроводности горных пород варьирует от 0,83 до 2,98 Вт/(м·К) в базальтах, от 1,20 до 2,05 Вт/(м·К) в долеритах, от 1,66 до 3,57 Вт/(м·К) в доломитах, от 1,37 до 1,76 Вт/(м·К) в габбро, от 1,72 до 2,99 Вт/(м·К) в туфах. В табл. 2 приведены предельные и осредненные значения теплофизических характеристик и объемной массы скелета.

Расчетами, выполненными на основе данных геотермических исследований и определений теплофизических свойств горных пород по семи скважинам, установлено, что величина внутриземного теплового потока изменяется в верхней части ТМП (до 80 м) от 0 до 15 мВт/м<sup>2</sup>, непосредственно у подошвы ТМП – от 40 до 48 мВт/м<sup>2</sup>, а в подмерзлотном горизонте – от 44 до 50 мВт/м<sup>2</sup>.

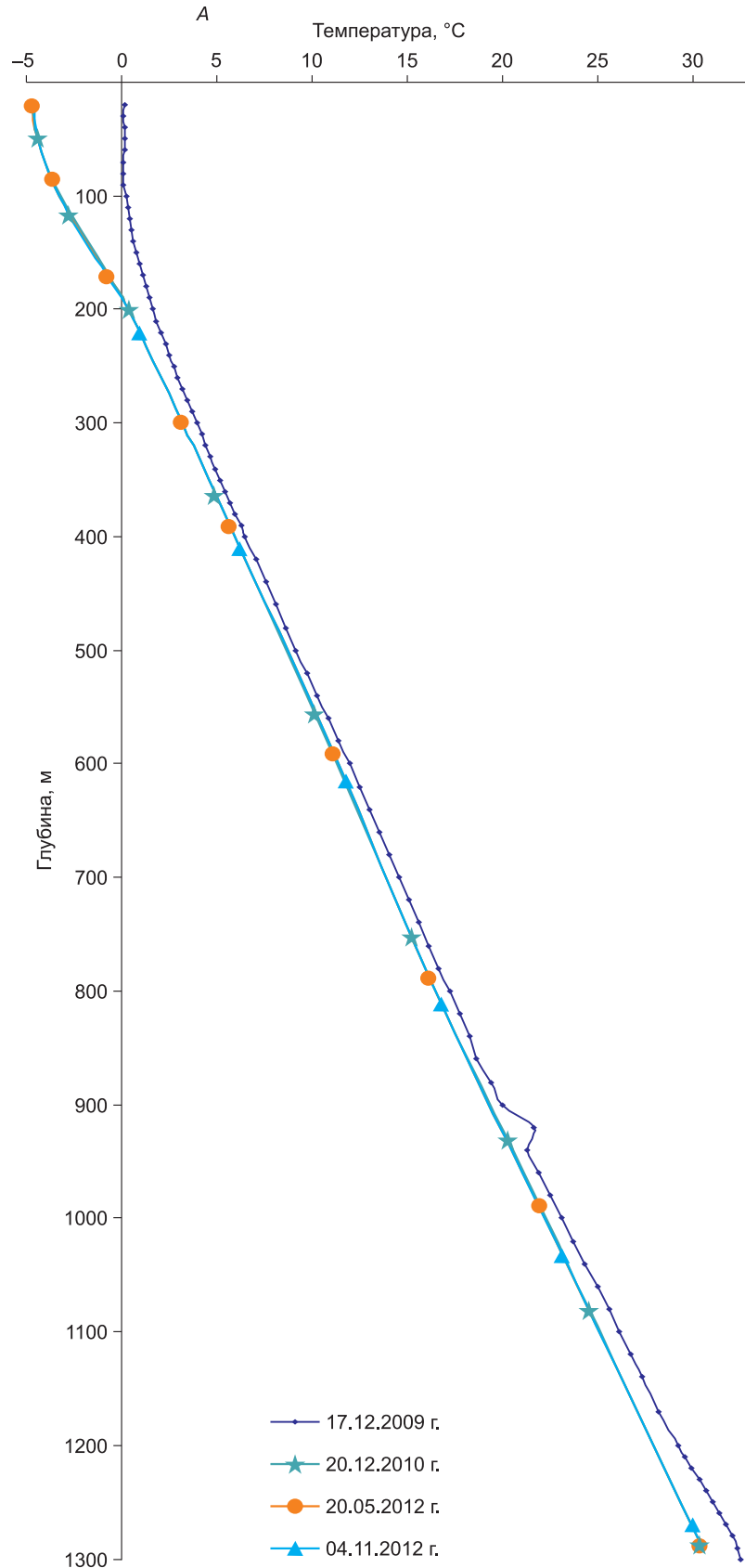
Анализ характера температурных кривых и теплового потока в пределах Кыстыктахской площади говорит о нестационарности мерзлых толщ в верхней (до 120 м) части разреза. Глубже отмечается квазистационарный тепловой режим.

По данным геотермических исследований и тепловым расчетам авторами построен геотермический профиль, описывающий геотемпературное поле и характер залегания подошвы многолетнемерзлой толщи в верховье р. Кыстыктах до глубины 1500 м (рис. 4).

Таблица 1. Мощность многолетнемерзлой толщи по скважинам Кыстыктахской площади

№ п/п	Номер скважины	Мощность ММТ, м
1	Кст-1	185–190
2	Кст-2	195
3	Кст-3	390
4	Кст-4	210–220
5	Кст-5	140–145
6	Кст-6	140–150
7	Кст-7	260–270
8	Кст-8	350
9	Кст-9	300

Геологический индекс	Геологическая колонка
Q	
Мокулаевская свита (Т <sub>1</sub> mk)	
Моронговская свита (Т <sub>1</sub> mg)	
Надеждинская свита (Т <sub>1</sub> nd)	
Туклонская свита (Т <sub>1</sub> tk)	
Хаканчанская свита (Т <sub>1</sub> hk)	
Гудчихинская свита (Т <sub>1</sub> gd)	
Тунгусская серия (С <sub>2</sub> -P <sub>2</sub> )	



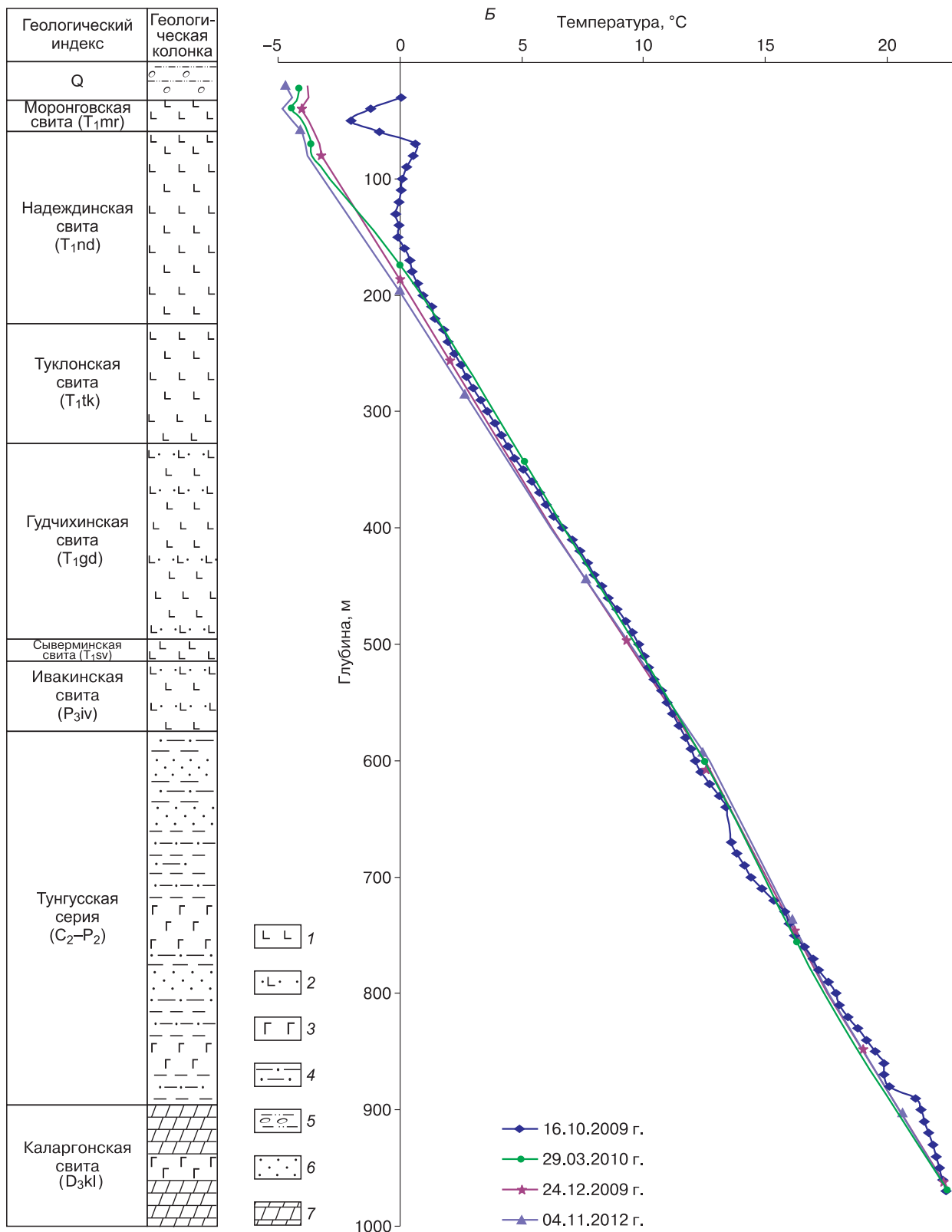


Рис. 3. Изменение температуры пород с глубиной по скважинам Кст-1 (А) и Кст-2 (Б).

1 – базальты различного состава; 2 – туфы; 3 – долериты; 4 – переслаивание аргиллитов и алевролитов; 5 – четвертичные отложения; 6 – песчаники; 7 – доломиты.

Таблица 2. **Предельные (числитель) и осредненные (знаменатель) значения теплофизических характеристик и объемной массы магматических и метаморфических горных пород**

№ п/п	Тип породы	$\gamma_{ск}$ , кг/м <sup>3</sup>	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$c_p$ , кДж/(м <sup>3</sup> ·К)	$a \cdot 10^{-6}$ , м <sup>2</sup> /с
1	Базальты	2368 – 3322	0,83 – 2,98	1588 – 2657	0,45 – 1,33
		2837 (26)	1,56 (26)	2245 (26)	0,70 (26)
2	Долериты	2775 – 3006	1,20 – 2,05	2220 – 2400	0,50 – 0,87
		2907 (5)	1,68 (5)	2324 (5)	0,73 (5)
3	Доломиты	2762 – 2894	1,66 – 3,57	2210 – 2315	0,75 – 1,55
		2844 (3)	2,83 (3)	2275 (3)	1,24 (3)
4	Габбро	2859 – 3054	1,37 – 1,76	2287 – 2443	0,60 – 0,72
		2946 (3)	1,53 (3)	2357 (3)	0,65 (3)
5	Туфы	2842 – 2843	1,72 – 2,99	1720 – 2273	1,00 – 1,32
		2842 (2)	2,36 (2)	1997 (2)	1,16 (2)
6	Микродиориты	2907 (1)	1,74 (1)	2326 (1)	0,75 (1)
7	Алевролиты	2633 (1)	2,24 (1)	2106 (1)	1,06 (1)
8	Известняк	2781 (1)	3,23 (1)	2225 (1)	1,45 (1)
9	Апатиты	2967 (1)	3,44 (1)	2374 (1)	1,45 (1)
10	Дациты	2946 (1)	2,26 (1)	2357 (1)	0,96 (1)
11	Песчаник	2726 (1)	2,51 (1)	2181 (1)	1,15 (1)

Примечание.  $\gamma_{ск}$  – объемная плотность сухого скелета;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности пород;  $c_p$  – объемная теплоемкость;  $a$  – коэффициент температуропроводности.

\* В скобках указано количество образцов для осреднения.

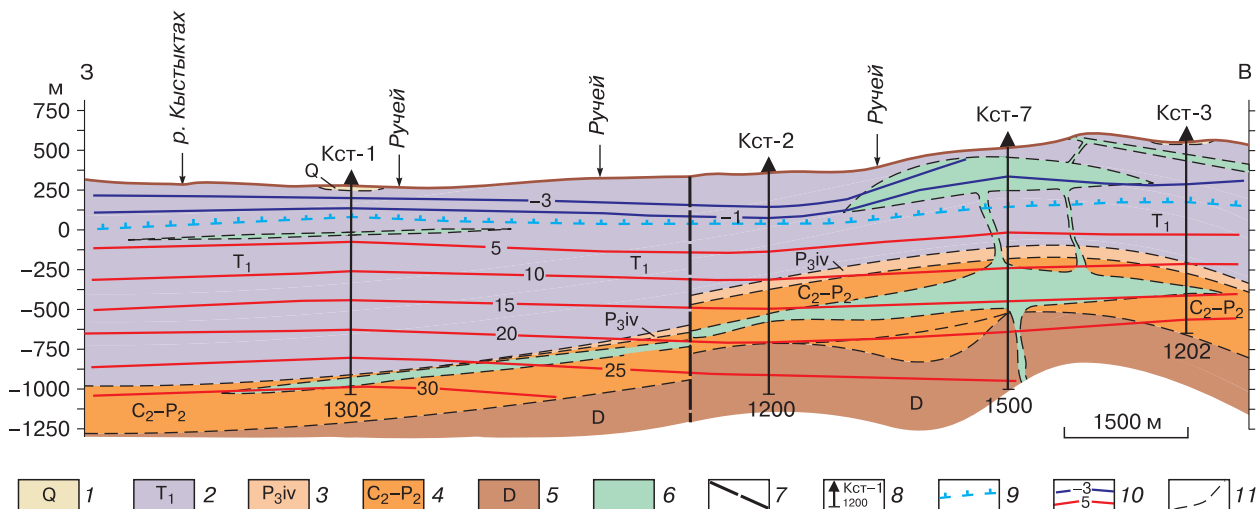


Рис. 4. Геолого-геотермический разрез междуречья Кыстыктах–Ондодами по линии скважин Кст-1 и Кст-3 (положение разреза в плане см. на рис. 2).

1 – аллювиальные, пролювиальные и элювиальные образования (четвертичная система); 2 – туфы (триасовая система); 3 – туфы (пермская система); 4 – переслаивание песчаников, алевролитов, аргиллитов, углистых пород (каменноугольно-пермская система, тунгусская серия); 5 – переслаивание ангидритов и доломитов, мергели, аргиллиты, органогенные известняки (девонская система); 6 – дайки, силы долеритов; 7 – разрывные нарушения; 8 – геотермическая скважина и ее номер; 9 – подошва ТМП (нулевая изотерма); 10 – изотерма (температура, °С); 11 – геологическая граница.

## ВЫВОДЫ

Получение фактических данных о тепловом поле мерзлых толщ и подмерзлотных горизонтов – задача технически сложная, связанная с различием периодов восстановления теплового режима скважины после окончания бурения и дополнительных затратами на ее оборудование. Вследствие этого такая информация единична и требует бережного отношения, хранения и обеспечения доступа к ней.

В результате выполненных исследований в семи глубоких (1000–1500 м) скважинах с выстоявшимся тепловым режимом в междуречье Кыстыктах–Ондодами получены новые данные о тепловом поле и глубине залегания ТМП.

Установлено, что для ранее не изученной в геокриологическом отношении переходной зоны от Тунгусской синеклизы к Енисей-Хатангскому прогибу:

- мощность ТМП изменяется от 185 до 390 м. Небольшая мощность ТМП для региона определяется повышенной температурой горных пород на глубине годовых теплооборотов и высоким внутриземным тепловым потоком, вероятно, характерным для зоны контакта Енисей-Хатангского прогиба с Сибирской платформой;

- температура пород на глубине 500 м изменяется от 3,0 до 9,1 °С, на глубине 1000 м – от 16,3 до 23,1 °С, а величина геотермического градиента в подмерзлотном горизонте изменяется от 2,4 до 3,2 °С/100 м;

- в зависимости от состава коэффициент теплопроводности горных пород изменяется от 0,83 до 3,57 Вт/(м·К), а величина внутриземного теплового потока, определенная по семи скважинам, составляет 48 мВт/м<sup>2</sup>.

На основе проведенных исследований составлен геотермический профиль до глубины 1500 м, характеризующий особенности температурного поля и положение подошвы ТМП Кыстыктах-Ондодоминского междуречья.

Полученные данные послужат исходным базовым материалом при палеореконструкциях криолитозоны и моделировании геотемпературного поля в процессе освоения территории и при проектировании добывающих скважин.

## Литература

- Балобаев В.Т.** Теплофизические исследования криолитозоны Сибири / В.Т. Балобаев, А.В. Павлов, Г.З. Перльштейн и др. Новосибирск, Наука, 1983, 216 с.
- Балобаев В.Т.** Руководство по применению полупроводниковых терморезисторов для геокриологических измерений / В.Т. Балобаев, Б.В. Володько, В.Н. Девяткин и др. Якутск, ИМЗ СО АН СССР, 1985, 48 с.
- Балобаев В.Т.** Геотермия мерзлой зоны литосферы севера Азии / В.Т. Балобаев. Новосибирск, Наука, 1991, 193 с.
- Баранов И.Я.** Геокриологическая карта Союза ССР / И.Я. Баранов. М., Геодиздат, 1956, 48 с.
- Гаврилов В.П.** Историческая геология и региональная геология СССР / В.П. Гаврилов. М., Недра, 1979, 301 с.
- Гаврильев Р.И.** Теплофизические свойства горных пород и напочвенных покровов криолитозоны / Р.И. Гаврильев. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 1998, 279 с.
- Геокриологическая карта СССР** масштаба 1:2 500 000 / Под ред. Э.Д. Ершова. Винница, Картпредприятие, 1996.
- Геокриология СССР.** Средняя Сибирь / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Недра, 1989, с. 278–303.
- Гидрогеология СССР.** Т. XVIII. Красноярский край и Тувинская АССР. М., Недра, 1972, 479 с.
- Гинзбург Г.Д.** Геотермическая характеристика района // Геология и нефтегазоносность Енисей-Хатангского прогиба. Л., НИИ геологии Арктики МГ СССР, 1971, с. 73–82.
- Железняк М.Н.** Геотемпературное поле и криолитозона юго-востока Сибирской платформы / М.Н. Железняк. Новосибирск, Наука, 2005, 228 с.
- Кобышева Н.В.** Климат России / Н.В. Кобышева, Е.М. Акентьева, Э.Г. Богданова и др. СПб., Гидрометеоздат, 2001, 656 с.
- Сумгин М.И.** Вечная мерзлота почвы в пределах СССР / М.И. Сумгин. Владивосток, Дальневост. геофиз. обсерватория, 1927, 372 с.

Поступила в редакцию  
11 июня 2013 г.