

РЕГИОНАЛЬНАЯ И ИСТОРИЧЕСКАЯ ГЕОКРИОЛОГИЯ

УДК 551.345

DOI: 10.15372/KZ20220301

НОВЫЕ ДАННЫЕ О МОЩНОСТИ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛОЙ ТОЛЩИ
НА ЛЕНО-АЛДАНСКОМ МЕЖДУРЕЧЬЕ

А.Р. Кириллин, М.Н. Железняк, В.И. Жижин

*Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН,
677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия; mouks@ya.ru, fe@mpi.ysn.ru, viz956@rambler.ru*

Впервые для Лено-Алданского междуречья получены данные о температуре горных пород до глубины 650 м по скважине с восстановившимся тепловым режимом. Геотермическими измерениями установлена аномальная для территории мощность многолетнемерзлой толщи (750–780 м). Изменение температуры пород с глубиной отражает нестационарный современный режим мерзлой толщи с отрицательным геотермическим градиентом до глубины 200–300 м. Оценена мощность многолетнемерзлой толщи и рассмотрены возможные причины ее отличия на относительно недалеко расположенных участках.

Ключевые слова: геотермические исследования, температура пород, многолетнемерзлые толщи, четвертичные отложения, теплофизические свойства, мощность криолитозоны.

NEW DATA ON THICKNESS
OF PERMAFROST AT THE LENO-ALDAN WATERSHED

A.R. Kirillin, M.N. Zhelezniak, V.I. Zhizhin

*Melnikov Permafrost Institute, SB RAS,
Merzlotnaya str. 36, Yakutsk, 677010, Russia; mouks@ya.ru*

The data on the ground temperature up to the depth of 650 m in a well with a restored thermal regime have been obtained for the first time for the Lena-Aldan interfluvium. The abnormal permafrost thickness for this territory (750–780 m) has been determined by geothermal measurements. The change of ground temperature with depth displays the nonstationary contemporary regime of permafrost with the negative geothermal gradient up to a depth of 300 m. The permafrost thickness has been estimated and the possible reasons of its difference in relatively nearby areas are considered.

Key words: geothermal research, ground temperature, permafrost, Quaternary deposits, thermophysical properties, permafrost thickness.

ВВЕДЕНИЕ

Поверхность Центрально-Якутской низменности в междуречье рек Алдан и Лена окончательно сформировалась к концу четвертичного периода. Морфологически это плоская слаборасчлененная равнина с абсолютными высотами до 240 м, часто заболоченная, с большим количеством озер. Особенностью рельефа является многообразие проявлений криогенных процессов. Равнинный рельеф Лено-Алданского междуречья осложнен серией террас, термокарстовыми котловинами, буграми пучения и полигональными образованиями. Четвертичные отложения здесь имеют различную мощность (30–50 м) и состав (преимущественно кварц-полевошпатовые пески, серые глины, пески с незначительным содержанием гальки) в зависимости от условий образования и залегания. Они формируют приповерхностную часть плосковолнистой структурно-денудационной равнины. На-

ряду с четвертичными отложениями в строении платформенного чехла на исследуемой площади участвуют отложения юрской системы, мощность которых в скважине достигает 520 м. Они представлены преимущественно крупно- и среднезернистыми кварц-полевошпатовыми песчаниками с редкими прослоями трещиноватых глинистых сланцев. В основании их залегает толща конгломератов с карбонатным цементом и прослоями крупнозернистых песчаников мощностью 20–30 м. Ниже залегают породы среднекембрийского отдела (мощность, вскрытая в скважине, 190 м), представленные преимущественно серыми плотными доломитами, а также прослои известняков (от белых до черных). Карбонатные толщи имеют множество прожилков кварца.

По геолого-структурному районированию участок расположен на смыкающем крыле Алдан-

ской антеклизы, осложненной восточным флангом блокового Якутского поднятия и Усть-Алданской впадины [Геодинамическая карта ..., 1992].

Климат района резко континентальный со среднегодовой температурой воздуха -8.5°C и годовым количеством осадков 200–250 мм, причем на теплый период (апрель–октябрь) приходится 80–85 % годового количества осадков [Котляков, Лориус, 2000; Балобаев, Шепелев, 2001]. По геокриологическому районированию территория относится к зоне сплошного распространения многолетнемерзлых толщ (ММТ) с температурой пород от -2.0 до -4.5°C [Геокриологическая карта СССР, 1997]. Геокриологические условия Лено-Алданского междуречья рассматривались в ряде работ [Катасонов, Иванов, 1973; Иванов, 1984; Шепелев и др., 1984], однако данные о мощности ММП этого региона весьма ограничены. Основанием для оценки глубины залегания подошвы ММТ являлись геофизические исследования и вскрытие пресных водоносных горизонтов в процессе бурения геологических и гидрогеологических разведочных и эксплуатационных скважин. По этим данным, мощность криолитозоны оценивается в 240 м (с. Туора-Кюель), 400 м (с. Телей-Диринг), 561 м (с. Чурапча), 530 м (с. Арылах). Целенаправленных геотермических исследований территории в силу технических трудностей подготовки и оборудования скважин ранее не проводилось.

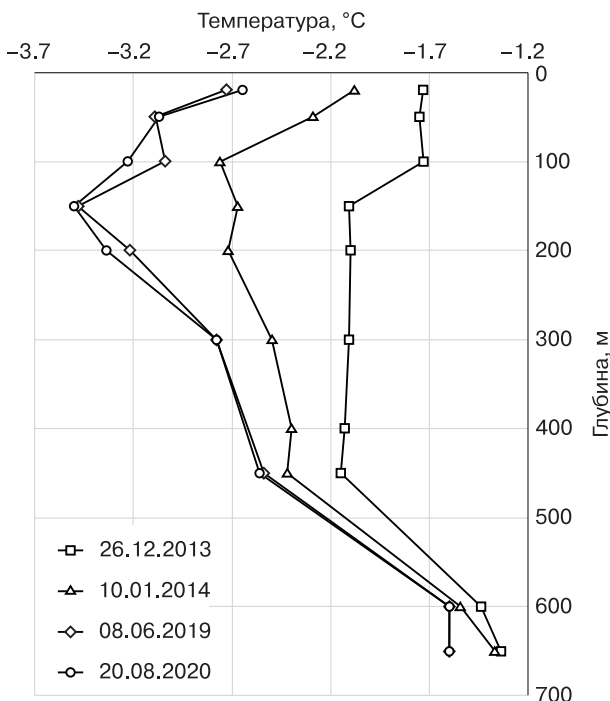


Рис. 1. Распределение температуры пород по стволу скважины 2.

Местоположение см. на рис. 3.

Цель работы – уточнить глубину залегания подошвы ММТ и более полно охарактеризовать природные условия формирования и изменения температуры горных пород.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Геотермические исследования. В ходе бурения происходит нарушение теплового поля пород, которое впоследствии восстанавливается до естественного состояния. Особенно долго восстанавливается температура мерзлых толщ. Даже через 4–5 месяцев после окончания бурения температурные кривые по буровым скважинам (термограммы) характеризовались наличием безградиентных зон (рис. 1).

При определении мощности ММТ использовался метод температурных замеров в стволе выстоявшейся скважины. Для этого скважина была оборудована стационарной геотермической установкой с 10 датчиками на базе полупроводниковых терморезисторов. В качестве регистрирующей аппаратуры при измерении сопротивлений терморезисторов использовались мультиметры марки MASTECH MY65. Подробное описание характеристик терморезисторов, подготовки геотермических установок и методик полевых исследований приведено в работе [Балобаев и др., 1985].

Нижняя граница мерзлых толщ горных пород находилась по данным замеров температуры в буровой скважине путем экстраполяции измеренной температуры до изотермы 0°C . При этом учитывались особенности строения и геотермические параметры разрезов [Железняк, 1999].

Теплофизические исследования. Для определения теплофизических свойств пород было отобрано 17 образцов из керна скважины 2. Теплофизическое изучение проводилось при комнатной температуре. Перед опытом образцы увлажнялись в эксикаторе. Тем самым создавались условия подмерзлотной толщи, где горные породы находятся, как правило, в состоянии полного водонасыщения. Поскольку образцы имели значительную плотность, их влажность даже при избыточном увлажнении была ничтожной. Поэтому теплофизическая информация, полученная для положительно-температурных горных пород, относилась и к их отрицательно-температурным аналогам.

Измерения тепло- и температуропроводности горных пород проведены с помощью установки Thermal Conductivity Scanning (TCS) (рис. 2) с погрешностью определения значений теплофизических свойств 3 % (при доверительной вероятности 0.95). В этой установке реализован предложенный Ю.А. Поповым метод оптического сканирования пород [Попов и др., 1983; Попов et al., 1999,

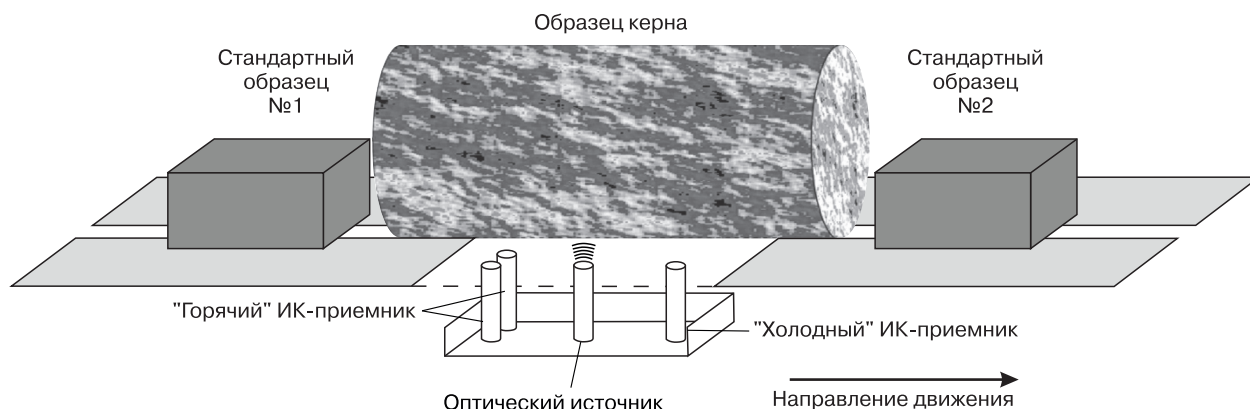


Рис. 2. Принципиальная схема реализации метода оптического сканирования пород для определения их теплофизических свойств.

2012]. В процессе работы TCS изучаемая проба нагревается с помощью светового пятна, которое перемещается вдоль плоской или цилиндрической поверхности образца бурового керна с постоянной скоростью.

Начальная температура и степень нагрева образца регистрируются приемниками инфракрасного (ИК) излучения. Поле зрения каждого из них перемещается вдоль той же поверхности образца с такой же скоростью, что и пятно нагрева. Исследуемый образец помещали в установку вместе с двумя стандартными образцами (эталоны) с известными значениями тепло- и температуропроводности. Теплофизические свойства образцов пород определены на основе сравнения уровней их нагрева с уровнем нагрева эталонных образцов.

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

При сканировании образцов источником оптического излучения и датчиками температуры регистрируется профиль теплопроводности. Это дает возможность определять как средние значения теплопроводности для всего образца, так и локальные ее значения в отдельных частях образца. Это позволяет дифференцировать породы с близкой теплопроводностью и различными структурно-текстурными характеристиками.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В 2012 и 2013 гг. Якутской поисково-съёмочной экспедицией АО «Якутскгеология» было выполнено бурение гидрогеологических скважин для обеспечения питьевого водоснабжения сел Чурапча и Дябыла (Ожулун) (рис. 3). Скважина 1

находится в 100 м от берега пруда в с. Чурапча, скважина 2 – в 200 м от озера термокарстового генезиса вблизи с. Дябыла. Абсолютные высоты устьев скважин составляют 181 и 172 м соответственно. Возле озера на участке с. Дябыла развиты байджежахи.

Проектом предусматривалось бурение этих скважин до глубины 600 м. В скв. 1 (рис. 4) были вскрыты четвертичные отложения, до глубины 12 м представленные суглинком, далее, до глубины 45 м, залегает песок с включениями гальки и гравия (до 5 % объема). Ниже четвертичных отложений, до глубины 566 м, залегают породы юрской системы: слабосцементированные мерзлые песчаники с прослоями алевролитов. В основании вскрытой части разреза юрских отложений находятся серые песчаники и конгломераты, ниже которых залегают известняки кембрийской системы.

В интервале глубин 561–569 м (светлые песчаники с линзами конгломератов) был зафиксирован водопиток в скважину, в результате которого уровень подземных вод установился на глубине 169.2 м. Скважина пройдена до глубины 625 м, после окончания бурения и каротажных работ в скважине были проведены геотермические измерения. По полученным данным отрицательные температуры пород отмечены до глубины 561 м, а их минимальные значения ($-1.3\text{ }^{\circ}\text{C}$) находятся в интервале 300–325 м. Резкое изменение градиента температуры пород в интервале 561–569 м обусловлено наличием водоносного горизонта, приуроченного к контакту песчаников юрской системы и известняков кембрийской системы. Судя по данным бурения, контактная зона песчаников и известняков – трещиноватая, водоносная, мощность ее составляет 7–8 м. Выше этого интервала залегают мерзлые породы, а ниже – плотные известняки, являющиеся водоупором.

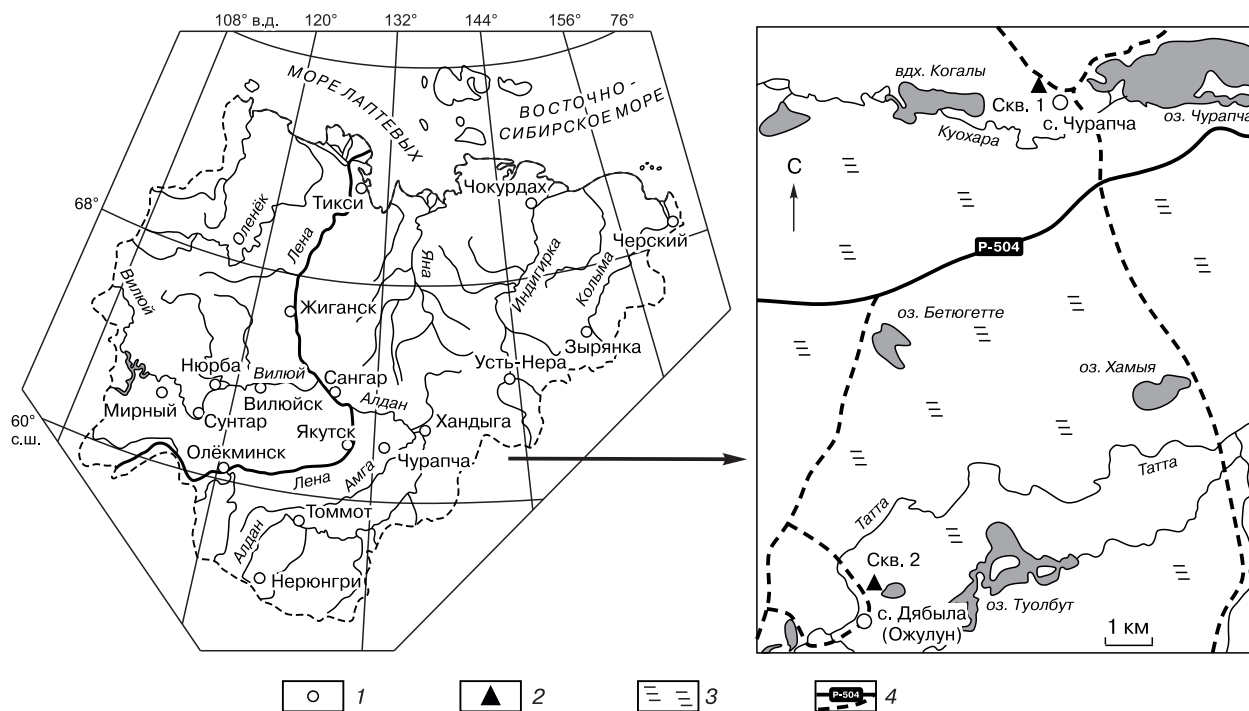


Рис. 3. Схема расположения скважин.

1 – населенные пункты; 2 – скважина; 3 – термокары; 4 – автодороги.

В 2013 г. в 9.5 км южнее скв. 1, на окраине с. Дябыла была пройдена гидрогеологическая скважина 2 проектной глубиной до 600 м (рис. 5). Четвертичные отложения представлены суглинками в верхних 12 метрах, ниже, до глубины 58.8 м – песками серыми с включениями гравия и гальки. Ниже четвертичных отложений залегают юрские отложения мощностью 394.2 м, которые до глубины 412.5 м представлены пачкой переслаивания песчаников кварц-полевошпатовых, серых, мелко- и среднезернистых, с прослоями алевролитов. В нижней части разреза юрских отложений залегают слои конгломератов с галькой метаморфических и магматических пород, сцементированных известковистыми песчаниками, с прослоями средне- и крупнозернистого окварцованного песчаника. Ниже 453 м залегают породы кембрийской системы, представленные преимущественно известняками и ожелезненными известняками с прослоями мергелей и доломитизированных известняков. Из типичных слоев, характеризующих толщу по разрезу, были отобраны образцы керна и по ним определены теплофизические свойства горных пород (см. таблицу).

В процессе бурения скв. 2 водопритоки не были отмечены. Геотермические измерения, проведенные сразу после окончания бурения и затем через 1 неделю, показали отрицательные значения температуры по стволу всей скважины, а на забое

(600 м) температура пород составила -1.3°C . Далее бурение скважины было продолжено до глубины 650 м, однако водопритоков в стволе не было отмечено. По окончании бурения геотермическими измерениями была установлена отрицательная температура -1.2°C на забое скважины.

На момент проведения первичных геотермических измерений температуры пород по стволу скважины не восстановились. Было принято решение оборудовать скважину стационарной геотермической установкой до глубины 650 м.

В период с 2013 по 2020 г. в скважине ежегодно проводились повторные измерения температуры. Так, через полтора года температурный режим в стволе скважины претерпел значительные изменения, а в последние годы температура пород на одинаковых интервалах глубины остается постоянной, что говорит о восстановлении теплового режима.

Температурная кривая по скв. 2 имеет выраженный нестационарный режим, связанный с потеплением климата и влиянием талика под расположенным поблизости озером. Минимальные температуры пород (-3.6°C) отмечаются на глубине 150 м, до этой глубины геотермический градиент имеет отрицательную величину ($-0.6^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$). Ниже наблюдается область с положительным температурным градиентом от 0.45 до $0.90^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$, который изменяется в зависимости от теплопро-

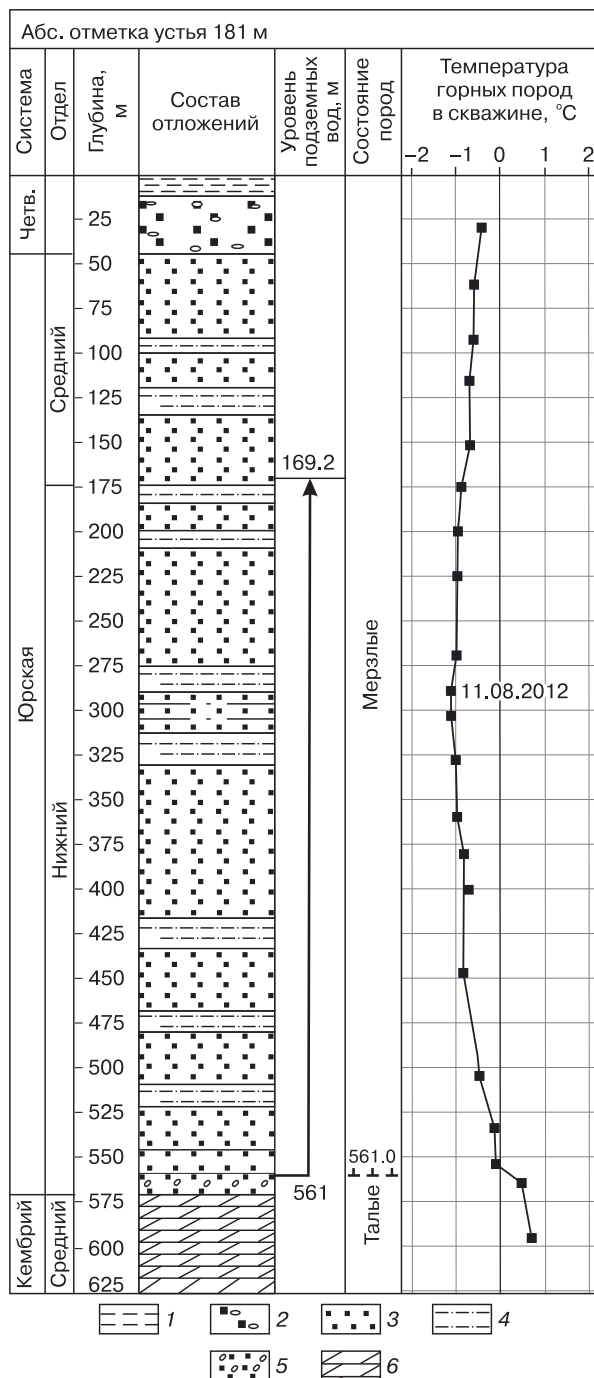


Рис. 4. Геологический разрез и распределение температуры пород в скв. 1 (с. Чурапча).

1 – суглинок; 2 – песок крупнозернистый с включениями гравия и гальки; 3 – песчаник; 4 – алевролит; 5 – конгломерат с прослоями песчаников; 6 – известняк.

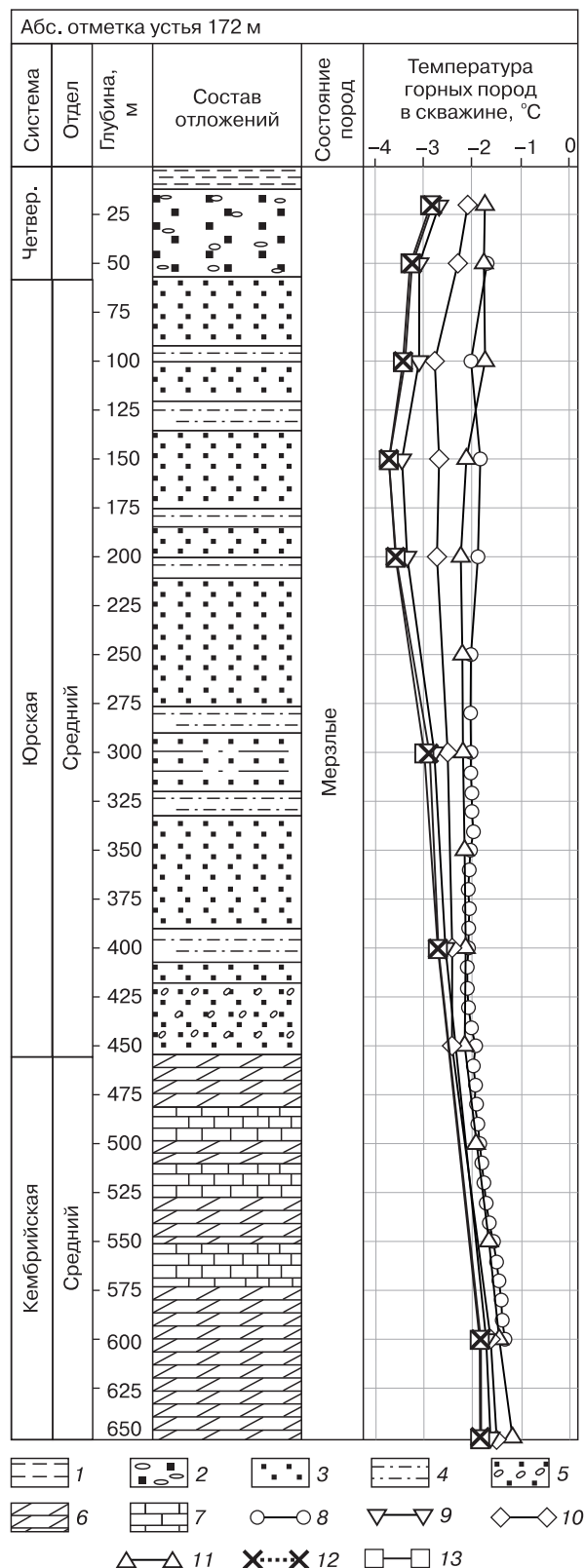


Рис. 5. Геологический разрез и распределение температуры пород в скв. 2 (с. Дябыла).

1 – суглинок; 2 – песок крупнозернистый с включениями гравия и гальки; 3 – песчаник; 4 – алевролит; 5 – конгломерат с прослоями песчаников; 6 – известняк; 7 – доломит. Даты замеров температуры: 8 – 13.12.2013; 9 – 26.12.2013; 10 – 10.01.2014; 11 – 02.07.2015; 12 – 20.06.2018; 13 – 20.08.2020.

**Теплофизические свойства пород
по скважине 2**

Глубина, м	Порода	λ , Вт/(м·К)	$a \cdot 10^{-6}$, м ² /с	c_p , кДж/(м ³ ·К)
466	Известняк серый	1.88	1.2	1567
486	Известняк светло-серый	2.05	0.93	2204
500	Известняк доломитизированный, светло-серый, массивный	2.14	1.4	1529
506	Известняк светло-серый, сливной (микрозернистый)	2.28	1.2	1900
522	Известняк с мергелем, миндалекаменная текстура	2.25	1.01	2228
534	Известняк ожелезненный	1.87	1.14	1640
559	Известняк мергелистый, темно-серый, микрозернистый	2.81	1.18	2381
570	Мергель темно-серый	1.43	0.66	2167
597	Известняк бурый с включениями серого дробленного известняка	2.07	1.19	1739
598	Известняк ожелезненный, серовато-бурый, микрозернистый	2.21	1.09	2028
605	Известняк ожелезненный, бурый	2.16	1.15	1878
615	Известняк волнисто-полосчатый, светло-серый	2.11	1.6	1319
630	Известняк ожелезненный, бурый, пятнистый	2.27	1.33	1707
633	Известняк ожелезненный, волнисто-полосчатый	2.23	1.23	1813
640	Известняк волнисто-полосчатый, буровато-серый, микрозернистый	2.31	1.21	1909
644	Известняк с волнистыми ожелезненными участками, микрозернистый	2.02	1.3	1554
650	Известняк, переслаивание бурого и светло-серого, микрокристаллический	2.34	1.09	2147

Примечание. λ – теплопроводность; a – температуропроводность; c_p – объемная теплоемкость.

водности горных пород. На основании шести геотермических измерений (2013–2020 гг.), с использованием метода двух и трех термограмм [Кутасов, 1976] залегание нулевой изотермы (мощности

ММТ) оценено в 750–780 м. Для этого участка установлена аномально высокая мощность ММТ в районе исследований.

Бурением в районе с. Дябыла вскрыты карбонатные толщи кембрийской системы, залегающие на глубине более 450 м, а в с. Чурапча – на глубинах более 575 м. Таким образом, прослеживается пологий уклон залегания кембрийских толщ от Якутского поднятия Алданской антеклизы в сторону Нижнеалданской впадины.

На основе результатов определения теплофизических свойств пород по разрезу и справочных данных установлено, что они в зоне сочленения кембрийских карбонатных и юрских силикатных отложений различаются незначительно. Следовательно, изменение градиента температуры пород может быть обусловлено только наличием трещин, а также существованием водоносных или льдонасыщенных горизонтов [Геологическая карта..., 2000].

Анализ морфологии кровли пород, подстилающих позднеплиоцен-четвертичные отложения Лено-Алданского междуречья [Камалетдинов, 1982], позволил установить, что современные неотектонические движения и эрозионные процессы незначительно влияли на вертикальные амплитуды геологических структур, что проявляется в строении четвертичных толщ и современном рельефе территории. Так как изменение базиса эрозии в период формирования ММТ также несущественно изменило рельеф, последний, по мнению авторов, не мог сильно влиять на глубину промерзания. Тем не менее разница глубины залегания подошвы ММТ в скважинах довольно значительна при относительно небольшой удаленности их друг от друга. Такую разницу температур и мощностей ММТ геоморфологическими или литологическими причинами объяснить сложно. В этой связи авторами проведены сопоставление и анализ положения подошвы ММТ и границ различных по составу разновозрастных отложений (рис. 6, 7).

По мнению авторов, положение подошвы ММТ обусловлено не столько сменой состава отложений на границе юрской и кембрийской систем, сколько иными причинами, связанными с наличием и циркуляцией подземных вод в трещиноватых породах, образовавшихся в процессе изменения геолого-тектонической и палеогеографической ситуаций. Существенное влияние на гидрогеотермические условия здесь оказало формирование зоны криогенной дезинтеграции, параметры и глубины которой на этом участке чехла Сибирского кратона зависят от геологического строения осадочных толщ и глубины залегания кристаллического фундамента в период их промерзания.

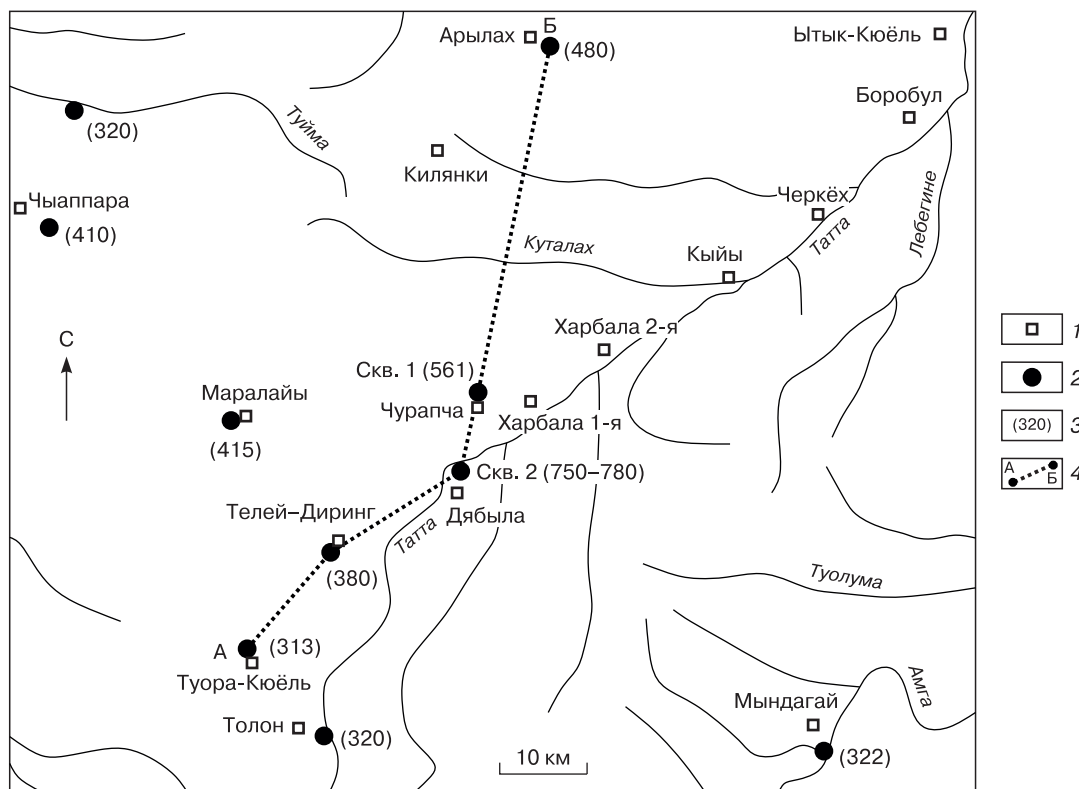


Рис. 6. Схема расположения скважин с данными по глубине залегания подошвы мерзлых толщ.

1 – населенные пункты; 2 – гидрогеологические скважины, в которых определена глубина подошвы мерзлых толщ; 3 – глубина подошвы мерзлых толщ; 4 – линия геолого-геокриологического разреза А–Б (см. рис. 7).

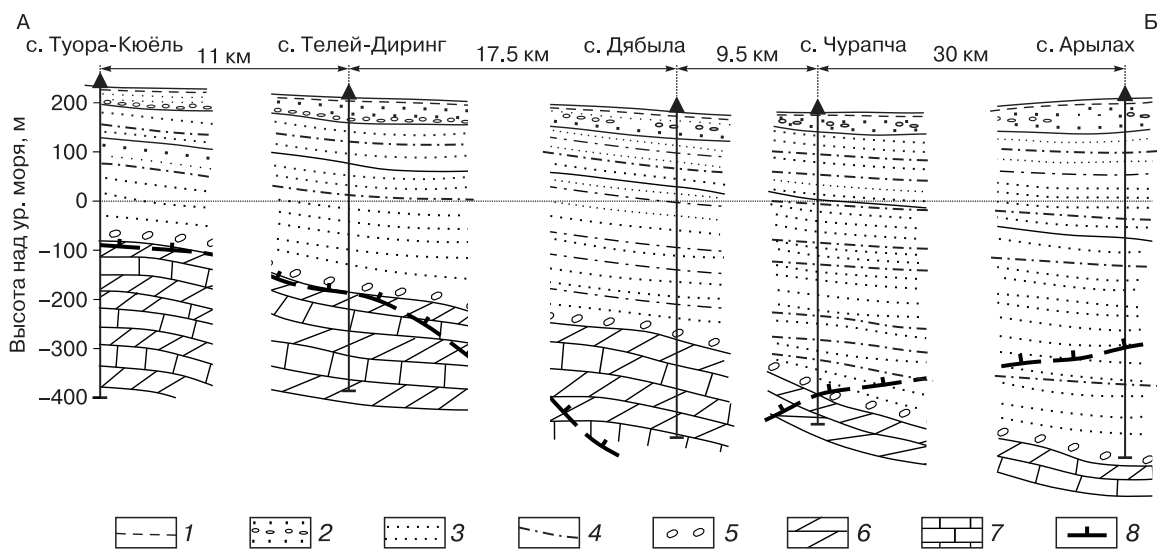


Рис. 7. Схематический геолого-геокриологический разрез по профилю А–Б (см. рис. 6).

1 – суглинки; 2 – пески мелко- и среднезернистые с включениями гравия и гальки; 3 – песчаники крупнозернистые; 4 – алевролиты; 5 – конгломераты; 6 – известняки; 7 – доломиты; 8 – подошва толщ пород с отрицательной температурой.

ВЫВОДЫ

1. Впервые для Центрально-Якутского региона, в пределах восточного крыла Якутского поднятия, в области сочленения Усть-Алданской впадины и Алданской антеклизы, получены геотермические данные до глубины 650 м. Изменение температуры пород с глубиной показывает стационарный режим мерзлой толщи с областью отрицательного геотермического градиента до глубины 150 м.

2. Геотермическими измерениями в районе с. Чурапча установлена аномальная для территории мощность многолетнемерзлой толщи, которая оценивается в 750–780 м.

3. Из анализа геолого-геотермических данных следует, что глубина залегания подошвы ММТ обусловлена не сменой состава на границе юрских и кембрийских отложений, а иными причинами, связанными с наличием и циркуляцией подземных вод в трещиноватых породах, образовавшихся в процессе геолого-тектонической и палеогеографической ситуации, и с существенным влиянием здесь сформированной зоны криогенной дезинтеграции.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ АААА- А20-120111690010-2 “Тепловое поле и криогенная толща Северо-Востока России. Особенности”).

Литература

- Балобаев В.Т.** Руководство по применению полупроводниковых терморезисторов для геокриологических измерений / В.Т. Балобаев, В.Н. Володько, В.Н. Девяткин и др. Якутск, ИМЗ СО АН СССР, 1985, 48 с.
- Балобаев В.Т., Шепелев В.В.** Космопланетарные климатические циклы и их роль в развитии биосферы Земли // Докл. РАН, 2001, т. 379, № 2, с. 247–251.
- Геодинамическая** карта Якутии и сопредельных территорий м-ба 1:1 500 000 / Л.М. Парфенов. Якутск, ГУБК, 1992, 12 л.
- Геокриологическая** карта СССР, м-б 1:2 500 000 / Отв. ред. Э.Д. Ершов, К.А. Кондратьева. Винница, Карт. предприятие, 1997, 16 л.
- Геологическая** карта Якутии м-ба 1:500 000, Центрально-Якутский блок / Под ред. В.А. Камалетдинова, В.С. Гриненко, Ю.Л. Сластенов и др. Якутск, ЯГПСЭ, 2000, 8 л.
- Железняк М.Н.** Некоторые аспекты проведения геокриологических исследований при выработке рационального варианта размещения инженерных сооружений и освоении месторождений полезных ископаемых // Крайний Север: Проблемы экологии. М., Ресурс-Инфо, 1999, с. 129–159.
- Иванов М.С.** Криогенное строение четвертичных отложений Лено-Алданской впадины. Новосибирск, Наука, 1984, 126 с.
- Камалетдинов В.А.** Рельеф цоколя и строение четвертичного покрова Лено-Амгинского междуречья // Геология кайнозоя Якутии. Якутск, Изд-во СО АН СССР, 1982, с. 94–103.

Катасонов Е.М. Криолитология Центральной Якутии: Путеводитель / Е.М. Катасонов, М.С. Иванов. Якутск, ИМЗ СО АН СССР, 1973, 37 с.

Котляков В.М., Лорнус К. Четыре климатических цикла по данным ледяного керна из глубокой скважины на станции “Восток” в Антарктиде // Изв. РАН, сер. геогр., 2000, вып. 1, с. 7–19.

Кутасов И.М. Термическая характеристика скважин в районах многолетнемерзлых пород. М., Недра, 1976, 119 с.

Попов Ю.А. Достижения в области геотермических исследований нефтегазовых месторождений / Ю.А. Попов, В. Пименов, В. Тертычный. М., Моск. гос. геологоразв. акад., 1983, 216 с.

Шепелев В.В. Мерзлотно-гидрогеологические условия Восточной Сибири / В.В. Шепелев, О.Н. Толстухин, В.М. Пигузова и др. Новосибирск, Наука, 1984, 192 с.

Popov Y.A., Pribnow D.F.C., Sass J.H. et al. Characterization of rock thermal conductivity by high-resolution optical scanning. Geothermics, Elsevier Science Ltd., 1999, p. 253–276.

Popov Y., Bayuk I., Parshin A., Miklashevskiy D. et al. New methods and instruments for determination of reservoir thermal properties // Thirty-Seventh Workshop on Geothermal Reservoir Engineering (Stanford, California, January 30–February 1, 2012). Stanford, Stanford University, 2012, p. 1122–1132.

References

- Balobaev V.T., Volod'ko V.N., Devyatkin V.N. et al. Rukovodstvo po primeneniyu poluprovodnikovyyh termorezistorov dlya geokriologicheskikh izmereniy [Application guide for semiconductor thermistors for geocryological measurements]. Yakutsk, MPI SB AS USSR, 1985, 48 p. (in Russian).
- Balobaev V.T., Shepelev V.V. Cosmoplanetary climatic cycles and their role in the evolution of the Earth's biosphere. Doklady Akademii nauk [Reports of the Academy of Sciences], 2001, vol. 379, No. 2, p. 247–251 (in Russian).
- Geodinamicheskaya karta Yakutii i sopredel'nyh territorij mashtaba 1:1 500 000 [Geodynamic map of Yakutia and adjacent territories on a scale of 1:1 500 000] / L.M. Parfenov. Yakutia, GUBK, 1994, 12 sh. (in Russian).
- Geokriologicheskaya karta SSSR mashtaba 1:2 500 000 [Geocryological map of the USSR on a scale of 1:2,500,000]. E.D. Ershov, K.A. Kondratyev (Eds.). Vinnitsa, Kart. predpriyatie, 1997, 12 sh. (in Russian).
- Geologicheskaya karta Yakutii mashtaba 1:500 000, Central'no-Yakutskij blok [Geological map of Yakutia on a scale of 1:500,000, Central Yakutsk block]. V.A. Kamal'dinov, V.S. Grinenko, Yu.L. Slastenov et al. (Eds.). Yakutsk, YaGPSE, 2000, 8 sh. (in Russian).
- Zhelezniak M.N. Some aspects of geocryological research in the development of a rational option for the placement of engineering structures and the development of mineral deposits. In: Krajnij Sever: Problemy ekologii, Resurs-Info [Far North: Problems of ecology]. Moscow, Resource-Info, 1999, p. 129–159 (in Russian).
- Ivanov M.S. Kriogennoe stroenie chetvertichnyh otlozhenij Leno-Aldanskoj vpadiny [Cryogenic structure of the Quaternary deposits of the Lena-Aldan depression]. Novosibirsk, Nauka, 1984, 126 p. (in Russian).
- Kamal'dinov V.A. The relief of the basement and the structure of the Quaternary cover of the Lena-Amga interfluvium. In: Geology of the Cenozoic of Yakutia. Yakutsk, Publishing house of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences, 1982, p. 94–103 (in Russian).

- Katasonov E.M., Ivanov M.S. Kriolitologiya Central'noj YAKUTII: Putevoditel' [Cryolithology of Central Yakutia: A Guide]. Yakutsk, MPI SB AS USSR, 1973, 37 p. (in Russian).
- Kotlyakov V.M., Lorius K. Four climatic cycles based on ice core data from a deep well at Vostok station in Antarctica. Izvestiya RAN Ser. geogr. [News RAS. Geography series], 2000, issue. 1, p. 7–19 (in Russian).
- Kutasov I.M. Termicheskaya harakteristika skvazhin v rajonah mnogoletnemyorzlyh porod [Thermal characteristics of wells in areas of permafrost rocks]. Moscow, Nedra, 1976, 119 p. (in Russian).
- Popov Yu.A., Pimenov V., Tertychny V. Dostizheniya v oblasti geotermicheskikh issledovanij neftegazovyh mestorozhdenij [Achievements in the field of geothermal research of oil and gas fields]. Moscow, Moscow State Geological Exploration Academy, 1983, 216 p. (in Russian).
- Shepelev V.V., Tolstikhin O.N., Piguzova V.M. et al. Merzlotno-gidrogeologicheskie usloviya Vostochnoj Sibiri [Permafrost-hydrogeological conditions of Eastern Siberia]. Novosibirsk, Nauka, 1984, 192 p. (in Russian).
- Popov Y.A., Pribnow D.F.C., Sass J.H. et al. Characterization of rock thermal conductivity by high-resolution optical scanning. Geothermics, Elsevier Science Ltd., 1999, p. 253–276.
- Popov Y., Bayuk I., Parshin A. et al. New methods and instruments for determination of reservoir thermal properties. In: Thirty-Seventh Workshop on Geothermal Reservoir Engineering (Stanford, California, January 30–February 1, 2012). Stanford, Stanford University, 2021, p. 1122–1132.

*Поступила в редакцию 1 июля 2021 г.,
после доработки – 27 января 2022 г.,
принята к публикации 6 апреля 2022 г.*