

Геокриологические условия Токариканского и Гувилгринского грабенов (Южная Якутия)

Р. Г. Сысолятин✉, М. Н. Железняк

Институт мерзлотоведения СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

✉robertseesaw@gmail.com

Аннотация

В статье публикуются результаты геокриологических исследований на территории Токариканского и Гувилгринского грабенов Алданского щита. Начиная с 1996 г. в ходе экспедиционных исследований получен фактический материал, позволяющий определить температурный режим, мощность и характер распространения многолетнемерзлых пород, а также впервые описать геокриологические условия труднодоступного региона. Режимными и разовыми измерениями установлено, что наиболее низкие температуры (до $-3,4^{\circ}\text{C}$) характерны для маревых ландшафтов, наиболее высокие ($-0,5^{\circ}\text{C}$) для хорошо дренируемых и водораздельных участков. По результатам измерений в глубоких скважинах, обработки информации о процессе проходки глубоких геологоразведочных скважин и анализа данных о теплофизических свойствах горных пород впервые оценена мощность многолетнемерзлой толщи, которая варьирует в диапазоне от 40 до 280 м. Составленные схематические мерзлотно-геологические разрезы и геокриологические карты территории могут использоваться для технико-экономического обоснования при разработке планов промышленного освоения территории.

Ключевые слова: температура горных пород, Токариканский грабен, Гувилгринский грабен, мощность многолетнемерзлой толщи, теплопроводность пород

Финансирование. Работа выполнена в рамках бюджетного проекта ИМЗ СО РАН «Тепловое поле и криогенная толща Северо-Востока России. Особенности формирования и динамика» (номер проекта АААА-А20-120122290035-5).

Для цитирования: Сысолятин Р.Г., Железняк М.Н. Геокриологические условия Токариканского и Гувилгринского грабенов (Южная Якутия). *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(2):261–274. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-2-261-274>

Original article

Geocryological conditions of the Tokarikan and Guvilgra grabens (South Yakutia)

R. G. Sysolyatin✉, M. N. Zheleznyak

Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

✉robertseesaw@gmail.com

Abstract

This article presents the results of geocryological studies of the Tokarikan and Guvilgra grabens of the Aldan Shield. Expedition research on the hard-to-rich region since 1996 has allowed us to determine the temperature regime, thickness, and nature of permafrost rock distribution and characterize its geocryological conditions for the first time. We have established that the lowest temperatures (up to -3.4°C) are characteristic of peatmoss bog landscapes, whereas the highest (-0.5°C) are for well-drained and watershed areas. The results of the measurements in deep wells, information on the process of drilling deep exploration wells, and the analysis of data on the thermophysical properties of rocks allowed us to estimate a permafrost thickness capacity that varied in the range of 40–260 m. The presented schematic permafrost and geological cross-sections and geocryological condition maps can be used to plan the industrial development of the territory.

Keywords: ground temperature, Tokarikan graben, Guvilgra graben, permafrost thickness, Rock thermal conductivity

Funding. This study was carried out within the budgeted project of the Melnikov Permafrost Institute: “North-East of Russia thermal field and permafrost. Formation features and dynamics” (number АААА-А20-120122290035-5).

For citation: Sysolyatin R.G., Zheleznyak M.N. Geocryological conditions of the Tokarikan and Guvilgra grabens (South Yakutia). *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(2):261–274. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-2-261-274>

Введение

Мезозойская угольная формация Гонамского бассейна представлена Токариканским и Гувилгринским грабенами, а также Ытымджинской впадиной. Последняя до недавнего времени в геокриологическом отношении являлась «белым пятном» и не имела характеристики геокриологических условий, подкрепленной фактическим материалом, а первые имели лишь единичные упоминания в литературе [1,2].

Практически все структуры Алданского щита, выполненные мезозойскими отложениями, обладают потенциалом для промышленного освоения угольных месторождений [3]. В связи с этим понимание особенностей залегания, распространения, мощности и динамики изменений температурного режима многолетнемерзлых пород является важным условием для рационального, безопасного, рентабельного освоения месторождений полезных ископаемых.

Удаленность от основных мест проживания населения, а также труднодоступность исследуемой территории обусловили крайне низкую степень изученности природных условий. В 1960-х годах на территории Токариканского и Гувилгринского грабенов проводилась геологическая съемка, а в 1986–1999 гг. – детальные геологоразведочные работы по оценке перспективности угледобычи. Однако, специальных работ по оценке геокриологических условий в эти периоды не проводилось, а информация о последних работах не нашла отражение в последней редакции государственной геологической карты [4]. Геокриологическая характеристика этих структур приводилась по аналогии с Чульманской впадиной [5]. Впервые получить информацию о параметрах мерзлой толщи удалось в 1996 и 1999 гг. при проведении сотрудниками ИМЗ СО РАН и ЯГУ мерзлотно-геотермических экспедиционных работ на территории Токариканского и Гувилгринского грабенов. Уже первые полученные данные указали на различие геокриологических условий структур Гонамского бассейна от Чульманской впадины.

На основании анализа опубликованных, фондовых и вновь полученных данных нами выявлены особенности распространения многолетнемерзлых пород, получены фактические дан-

ные о мощности и температуре мерзлой толщи, охарактеризованы теплофизические свойства горных пород центральной части территории Южно-Якутского угольного бассейна.

Материалы и методы исследований

Возможность выполнения геотермических исследований на территории исследуемых грабенов появилась вследствие выполнения ЮЯГРЭ геологоразведочных работ для расширения и уточнения запасов Южно-Якутского угольного бассейна на территории Гонамского угленосного района. Материалы, положенные в основу настоящей публикации, получены в результате инициативных экспедиций сотрудников лаборатории геотермии Института мерзлотоведения СО РАН с 1996 по 2019 г., с использованием следующих полевых и аналитических методов:

1. Геотермические измерения в скважинах с восстановившимся после бурения температурным режимом.
2. Режимные температурные наблюдения в слое годовых теплооборотов и в слое сезонного оттаивания.
3. Анализ материалов стандартного термокалотажа.
4. Обработка информации о глубине вскрытия и установившемся уровне подземных вод, интервалах потери промывочной жидкости в процессе бурения скважин, разбуривания ледяных пробок в скважинах после длительного простоя.
5. Лабораторные определения теплофизических свойств горных пород.
6. Расчет эффективной теплопроводности литологических комплексов.
7. Пространственное моделирование изменения теплового потока и залегания подошвы мерзлых пород.

Широкое применение в рамках данной работы косвенных и аналитических методов обусловлено ограниченным количеством имеющейся информации и значительной площадью (более 4200 км²) исследуемой территории.

Методика проведения геотермических измерений с помощью терморезисторных датчиков широко применяется в различных областях науки, хорошо известна и на данный момент остается основным методом получения информации о

температуре горных пород. Подробно специфика проведения геотермических измерений описана в работе В.Т. Балобаева с соавт. [6]. Точность измерений используемой аппаратуры при соблюдении требований лежит в пределах $\pm 0,05$ °С.

Режимные наблюдения за температурой пород проводились с помощью автоматической измерительной аппаратуры (логгер) фирмы «OnSet Нобо» в слое сезонного оттаивания и в слое годовых теплооборотов. Заявленная производителем точность измерений варьирует в пределах $\pm 0,25$ °С в диапазоне температур от -40 до 100 °С. Преимущество использования логгеров заключается в возможности автономного получения детальной информации о температурном режиме среды.

Расчет *мощности мерзлой толщи* проводился с допущением квазистационарного распределения температур с глубины 30–40 м и ниже. Выражение, описывающее данную зависимость, широко используется и в геотермии [7]:

$$Z = T \frac{\lambda}{q} + h,$$

где Z – расчетная мощность ММТ, м; T – температура на глубине 30–40 м, °С; λ – эффективная теплопроводность пород, Вт/м·°С; q – плотность внутриземного теплового потока Вт/м²; h – подосва годовых колебаний температуры пород, м.

Распределение *теплового потока* во многом определяется рельефом и для территории структур этот параметр рассчитан по выражению

$$q = q_0 \cdot \cos \alpha,$$

где q_0 – исходная величина внутриземного теплового потока для района, Вт/(м·°С); $\cos \alpha$ – косинус угла наклона поверхности [8].

Для определения *эффективной теплопроводности* литологических комплексов использовались эталонные значения теплопроводности для образцов, слагающих разрез, а также процентное соотношение пород в составе каждого литологического комплекса. Расчет проводился по выражению, предложенному Р.И. Гаврильевым [9]:

$$\lambda_{эфф} = \frac{I}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{h_i}{\lambda_i} \right)}, \quad (1)$$

где λ_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.

Комплекс *косвенных сведений* о наличии и мощности мерзлых пород на территории грабенов был получен из буровых журналов и отчетов о геологоразведочных работах. Согласно приводимой в буровых журналах и фондовой литературе информации, разбуривание ледяных пробок происходило почти во всех скважинах (ок. 71 скв.), а интервал глубин повторной проходки составил от 25 до 200 м. Информация о *термокаротаже* скважин позволила оценить градиент изменения температур пород и положение границы мерзлых/талых пород [10, 11].

Основным подходом для картирования геокриологических условий (мощности, температуры и сплошности мерзлых пород) стало использование *метода ключевых участков* по полученной мерзлотно-геотермической информации и дешифрированию состава растительности по спутниковым снимкам с привязкой полевых описаний видового состава. Согласно проведенным маршрутным описаниям, видовой состав растительности Токариканского и Гувилгринского грабенов достаточно скуден. Характеристика температурного режима проведена по результатам разовых и режимных измерений температур в скважинах, приуроченных к выделяемым ландшафтам. Подробно *методика пространственного моделирования* на примере Ытымджинской впадины представлена в работе Sysolyatin R. [12].

Краткая характеристика природных условий района исследований

Токариканский и Гувилгринский грабены расположены в центральной части Алданского щита, имеют субширотную ориентированность и схожую геометрию с шириной в осевой части 30–50 км и протяженностью около 80–120 км (рис. 1). Границы структур четко определяются по взбросовым тектоническим нарушениям, оконтуривающим грабены с севера и юга. В их пределах наблюдается пологоувалистый рельеф с уклонами склонов до 10°. Пологовывуклые плоские водоразделы здесь имеют ограниченное распространение и полностью покрыты лесом. Грабены разделяет горный хребет Алданского массива с абсолютными отметками вершин до 1800 м.

По рельефу центральная и восточная части Токариканского грабена напоминают слабохолмистую равнину с отдельными невысокими (50–100 м) округлыми вершинами и пологими, за-

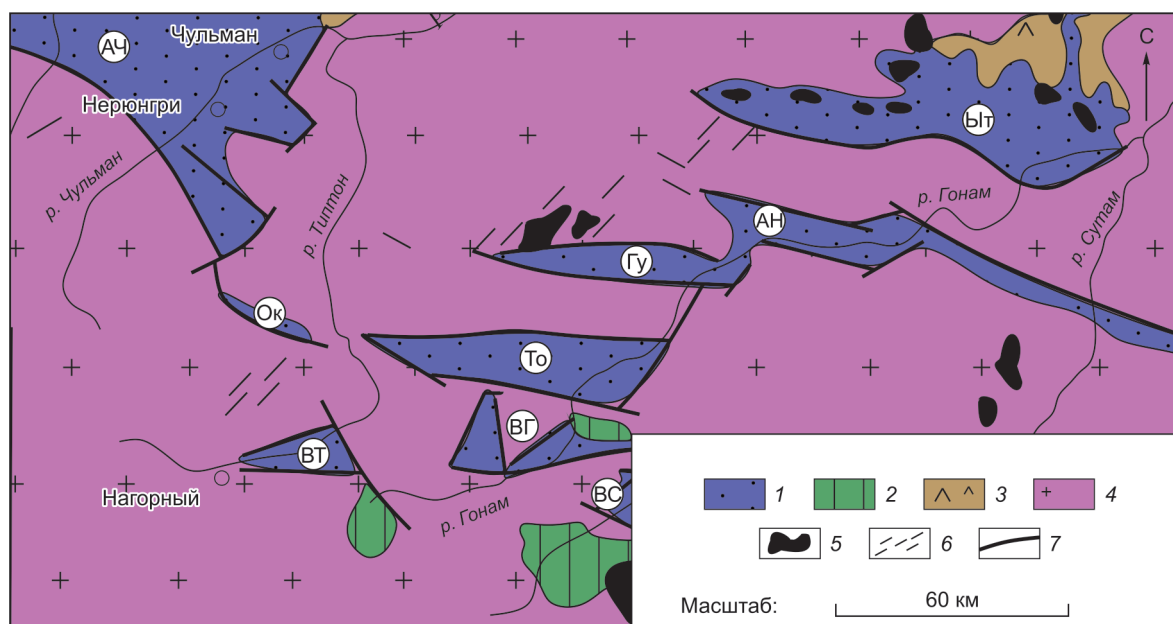


Рис. 1. Схематическая геологическая карта центральной части Алданского щита [13].

1 – геологические структуры, выполненные мезозойскими отложениями; 2 – нижнемеловые эффузивно-туфогенные образования (карауловская свита); 3 – терригенно-карбонатные отложения верхнего протерозоя и нижнего кембрия; 4 – архейские кристаллические породы фундамента; 5 – позднемезозойские интрузии; 6 – позднемезозойские дайки; 7 – разломы. Мезозойские структуры: впадины – Алдано-Чульманская (АЧ), Ытымджинская (ЫТ); грабены – Токарикский (То), Гувилгринский (Гу), Окурданский (Ох), Верхне-Тимптонский (ВТ), Верхне-Гонамский (ВГ), Верхне-Сутамский (ВС), Атугей-Нуямский (АН)

Fig. 1. Schematic geological map of the central part of the Aldan Shield [13].

1 – geological structures made by Mesozoic deposits; 2 – Lower Cretaceous effusive-tufogenic formations (Karaulov Formation); 3 – Upper Proterozoic and Lower Cambrian terrigenous-carbonate deposits; 4 – Archean crystalline basement rocks; 5 – Late Mesozoic intrusions; 6 – Late Mesozoic dikes; 7 – faults.

Mesozoic structures: depressions – Aldan-Chulman (АЧ), Ytymdzhinsky (ЫТ); grabens – Tokarikansky (То), Guvilgrinsky (Гу), Okurdansky (Ох), Upper-Timpton (ВТ), Upper-Gonamsky (ВГ), Upper-Sutamsky (ВС), Atugei-Nuyamsky (АН)

росшими лесом склонами. Основная площадь грабена характеризуется абсолютными отметками 820–870 м с увеличением высот в южном направлении до 900–930 м. Долины рек и ручьев слабо врезаны, плохо выражены, русла сильно меандрируют (рис. 2).

Гувилгринский грабен расположен севернее Токарикского и разделяет среднегорные хребты Гонамского угленосного района (рис. 3). Абсолютные отметки поверхности на большей части территории не превышают 900 м. Рельеф территории холмистый, увалистый с перепадами 20–30 м, поверхность сплошь заболочена, лишь местами покрыта лесом.

На фоне относительно пологого рельефа грабенов выделяются холмистые вершины, сложенные более прочными конгломератами и песчаниками. Локально имеющиеся западины, достигающие 3–4 м глубины, заболочены или заняты озерами.

Встречающиеся мерзлотные формы (булгунихи, полигональные грунты, солифлюкционные террасы и оплывины) свидетельствуют о протекании криогенных экзогенных процессов. Речные долины в пределах грабенов не имеют четких очертаний и сливаются с их холмисто-увалистой поверхностью. Реки имеют неглубокие русла, меандрируя среди болот и старичных озер.

В связи с суровыми климатическими условиями, бедными почвами и наличием многолетней мерзлоты растительный мир района довольно скуден и однообразен. На водораздельных поверхностях наблюдается типичная для севера растительность: карликовая березка, густой кедровый стланник на пологих склонах водоразделов, редкие лиственницы, перемежающиеся с кустарником, сосна средней крупности. Пойменные и первые надпойменные террасы в большинстве случаев характеризуются сильной степенью заболоченности. Резко различающийся фитоценоз

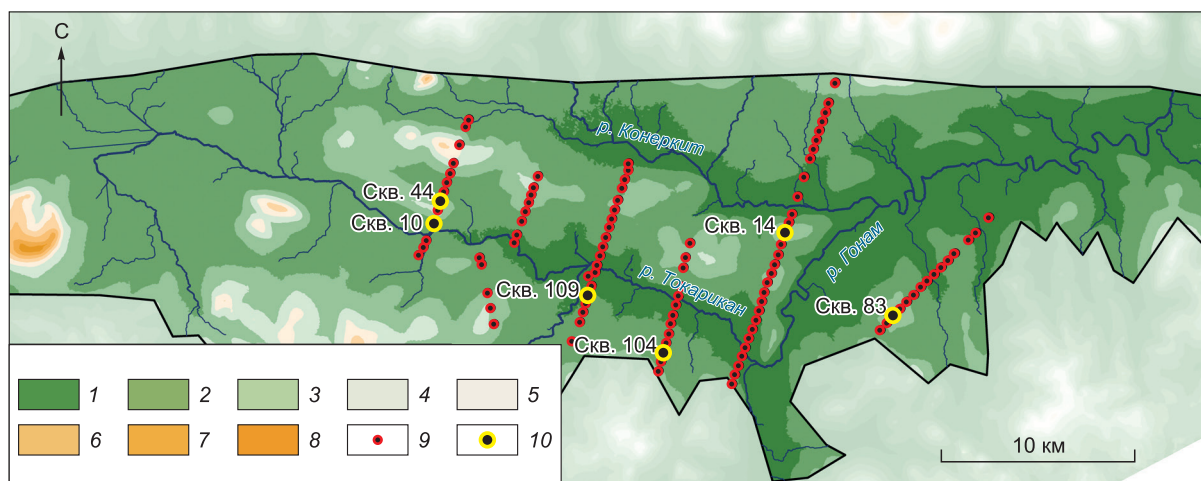


Рис. 2. Орографическая схема Токарикского грабена, расположение буровых профилей и термометрических скважин. 1–8 – абс. отметки (1 – менее 800 м; 2 – от 800 до 850 м; 3 – от 850 до 900 м; 4 – от 900 до 950 м; 5 – от 950 до 1000 м; 6 – от 1000 до 1050 м; 7 – от 1050 до 1100 м; 8 – более 1100 м), 9 – скважины разведочного бурения, 10 – места проведения геотермических измерений в скважинах

Fig. 2. Tokarikan graben surface topography, boreholes path and point of geothermal measurements. 1–8 – altitude (1 – less than 800 m; 2 – from 800 to 850 m; 3 – from 850 to 900 m; 4 – from 900 to 950 m; 5 – from 950 to 1000 m; 6 – from 1000 to 1050 m; 7 – from 1050 to 1100 m; 8 – up to 1100 m), 9 – geology prospecting boreholes, 10 – location of the boreholes where geothermal measurements were carried out

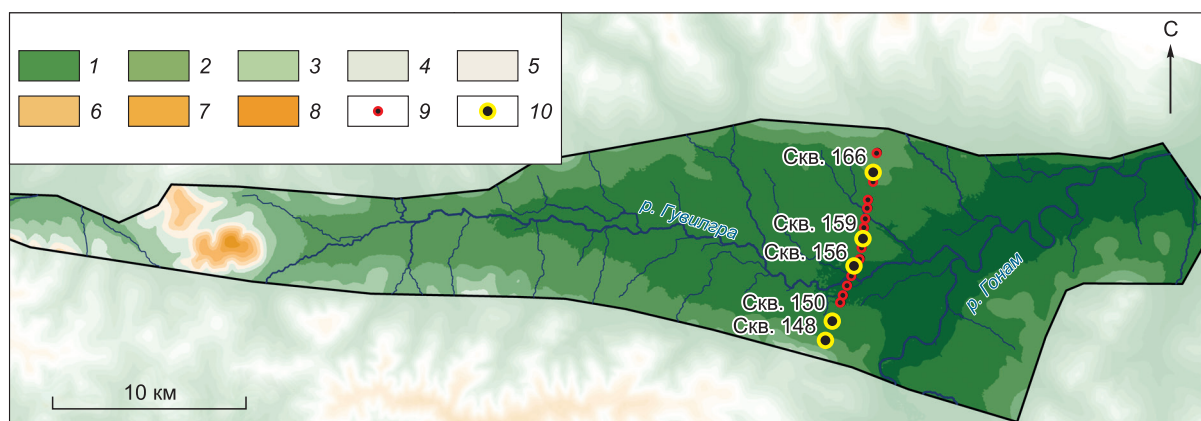


Рис. 3. Орографическая схема Гувилгринской впадины, расположение буровых профилей и термометрических скважин. 1–8 – абс. отметки (1 – менее 750 м; 2 – от 750 до 800 м; 3 – от 800 до 850 м; 4 – от 850 до 900 м; 5 – от 900 до 950 м; 6 – от 950 до 1000 м; 7 – от 1000 до 1100 м; 8 – более 1100 м), 9 – скважины разведочного бурения, 10 – места проведения геотермических измерений в скважинах

Fig. 3. Guvilgra graben surface topography, boreholes path and point of geothermal measurements. 1–8 – altitude (1 – less than 750 m; 2 – from 750 to 800 m; 3 – from 800 to 850 m; 4 – from 850 to 900 m; 5 – from 900 to 950 m; 6 – from 950 to 1000 m; 7 – from 1000 to 1100 m; 8 – up to 1100 m), 9 – geology prospecting boreholes, 10 – location of the boreholes where geothermal measurements were carried out

представлен на пойменных островах-останцах р. Гонам с теплолюбивым видовым составом деревьев (тополь душистый, ива-чозения, ель сибирская) высотой до 30 м.

В геологическом отношении грабены выполнены последовательным переслаиванием юрских песчаников, аргиллитов и алевролитов. Угленос-

ность отдельных свит достигает 8–9 % [13]. Отличительными признаками являются: преимущественно песчанистый состав с большой мощностью пачек и развитием в отложениях горизонтальной и пологоволнистой слоистости; незначительные по мощности, с хорошей выдержанностью простирания глинисто-алевролитовые пачки. Ве-

Таблица 1

**Вещественный состав юрских литологических комплексов (%)
для грабенов Гонимского бассейна и их теплопроводность**

Table 1

**Composition and effective thermal conductivity of Mesozoic bedrock complex
of the Tokarikan and Guvilgra grabens**

Породы	Тектоническая структура и свита							Эталонная теплопроводность пород в мерзлом состоянии, Вт/(м·К)
	Токариканский грабен				Гувилгринский грабен			
	J _{1uh}	J _{2dr}	J _{3kb}	J _{3br}	J _{1uh}	J _{2dr}	J _{3kb}	
Угли	0,3	1,1	2,8	3,2	—	2,2	2,3	0,9—1,1
Аргиллиты	0,4	1,0	0,3	0,4	0,3	0,5	0,7	2,0
Алевролиты мелкозернистые	10,1	24,3	12,9	14,0	6,5	20,0	17,8	2,40
Алевролиты крупнозернистые	10,2	15,6	12,0	16,2	6,5	18,2	13,0	
Песчаники мелкозернистые	25,1	39,8	34,0	41,6	32,3	39,8	26,1	2,95
Песчаники среднезернистые	34,9	17,0	35,0	20,8	42,9	13,2	35,5	2,99
Песчаники крупнозернистые	12,0	1,2	2,8	3,3	8,8	6,1	4,6	3,2
Гравелиты	3,0	—	0,2	0,5	1,2	—	—	н/д
Конгломераты	4,0	—	—	—	1,5	—	—	2,02 (в талом)
Расчетная эффективная кондуктивная теплопроводность свиты, Вт/(м·К)	2,78	2,65	2,67	2,63	2,88	2,62	2,66	

вещественный состав основных свит приведен в табл. 1.

В пределах рассматриваемых структур режимных метеонаблюдений не проводилось. Ближайшие стационарные метеостанции расположены в 100 км на запад (м/с Чульман) и в 230 км на восток (м/с Токо). Для региона характерно:

1. Постепенное увеличение суровости климата в восточном направлении, в основном выражающееся в понижении среднегодовой температуры [2].

2. Широкое развитие зимних орографических инверсий температур приземного воздуха [14].

3. Повышение среднемесячной (до 2,7 °С) и среднегодовой (до 1,6 °С) температуры воздуха за последние 50 лет.

Основные климатические параметры приведены по трем ближайшим метеостанциям (табл. 2).

Температура многолетнемерзлых пород

В пределах исследуемой территории сотрудниками лаборатории геотермии ИМЗ СО РАН из более чем 70 обследованных скважин разовые геотермические измерения удалось провести в 10 скважинах до глубины от 6 до 68 м (рис. 4). Установлено, что температуры пород на глубине годовых теплооборотов (20–30 м) варьируют от

–2,5 до –1,2 °С. На глубинах 15 м они изменяются от –1,7 до –1,2 °С; 10 м – от –2,4 до –1,7; 7 м – от –3,0 до –1,8; 5 м – от –3,4 до –0,3 °С.

Температуры пород на пологих склонах северной экспозиции (см. рис. 4, скважины 109, 148, 150) характеризуются минимальными значениями, а к верхней части склона южной экспозиции (скважины 44, 156, 166) приурочены максимальные значения температур, до –0,5 °С. Надпойменные террасы чаще всего заболочены, температура пород здесь варьирует от –1,8 до –1,4 °С (скважины 10, 156). Мерзлые породы на плоских водоразделах (скважины 83, 14) имеют температуру от –2,1 до –1,1 °С. Максимальная глубина проведения геометрических измерений в выстоявших после бурения скважинах составила 56 м (для Токариканского грабена) и 68 м (для Гувилгринского грабена), где температура соответственно составила –1,1 и –1,4 °С соответственно. Для Гувилгринского грабена величина геотермического градиента по данным термокаротажа варьирует от 1,12 до 2,55 °С/100 м, что подтверждают прямые измерения в скв. 148, где градиент в диапазоне глубин 30–68 м составил 1,6 °С/100 м.

В целом температура пород в Гувилгринском грабене ниже, чем в Токариканском. Это обуслов-

Таблица 2

Некоторые метеорологические параметры по метеостанциям региона за 1971–2020 гг.

Table 2

Climate condition by weather stations (1971–2020)

Параметр		Чульман	Нагорный	Токо
Абс. отметка, м		858	842	825
Элемент рельефа		Плоский водораздел	Северный склон	Надпойменная терраса
Температура воздуха, °С	Средняя годовая	–6,9	–7,0	–10,3
	Абс. минимум (дата)	–53,1 (10.01.1979)	–52,6 (12.01.1994)	–61,1 (21.01.1996)
	Абс. максимум (дата)	33,8 (18.07.2011)	34,5 (26.05.2017)	34,6 (29.07.2001)
Влажность воздуха, %		73	72	75
Средняя скорость ветра, м/с		2,6	2,0	0,7
Облачность общая, ср. балл		7,5	6,5	6,2
Среднее количество осадков за год, мм		581	605	450
Количество дней со снежным покровом		202–247	171–242	186–245
Максимальная высота снежного покрова за год, см		27–121	10–198	32–100
Средняя максимальная высота снежного покрова, см		55	42	60
Плотность снега в течение года, г/см ³		0,12–0,22	0,15–0,25	0,14–0,26
Средняя плотность снега в лесу при наибольшей декадной высоте, г/см ³		0,17	0,19	0,19

лено более интенсивной заболоченностью территории, более северным ее положением и, вероятно, более суровыми климатическими условиями. В силу специфики теплообмена для маревых ландшафтов, когда мох-сфагнум подстилается льдистыми торфяными отложениями, в Гувилгринском грабене формируются наиболее низкие температуры пород, со среднегодовой температурой до $-3,4^{\circ}\text{C}$ в отдельных случаях.

Мощность многолетнемерзлой толщи

Из-за отсутствия на территории исследований геотермических измерений в скважинах до глубины нулевой изотермы применялся комплекс аналитических и косвенных методов определения мощности многолетнемерзлой толщи (ММТ).

Для Токарикского грабена установлено, что мощность ММТ в большей части варьирует от 120 до 210 м (рис. 5). При этом на водоразделах с абсолютными отметками 900–930 м подошва ММТ залегает на глубинах от 120 до 160 м и определяется условиями теплообмена на поверхности и теплофизическими свойствами разреза. В значительно более широком диапазоне (от 60 до 210 м) мощность ММТ отмечается на маревых

участках. На склонах мощность ММТ, как правило, не превышает 180–200 м для северных экспозиций, сокращаясь до 70–100 м на дренированных склонах южной экспозиции и низкогорных водоразделах. Талики сквозного типа могут быть развиты под озерами глубиной от 2,0 м и шириной 200 м и более, а также в долинах рек Токарик, Гувилгра, Гонам. Под небольшими мелкими озерами развиты несквозные талики. В обрамлении грабена прогнозируется уменьшение мощности ММТ, обусловленное близостью высокотемпературных водоносных горизонтов в метаморфических, кристаллических образованиях архей-раннепротерозойского фундамента.

Для Гувилгринского грабена мощность ММТ на подавляющей части территории варьирует от 150 до 230–250 м (рис. 6), а в отдельных случаях может достигать 260–280 м. Максимальная глубина промерзания характерна именно для центральной части впадины, где на площади развития мощной толщи (до 2,5 м) биогенных отложений распространены низкотемпературные многолетнемерзлые породы. По направлению к бортам

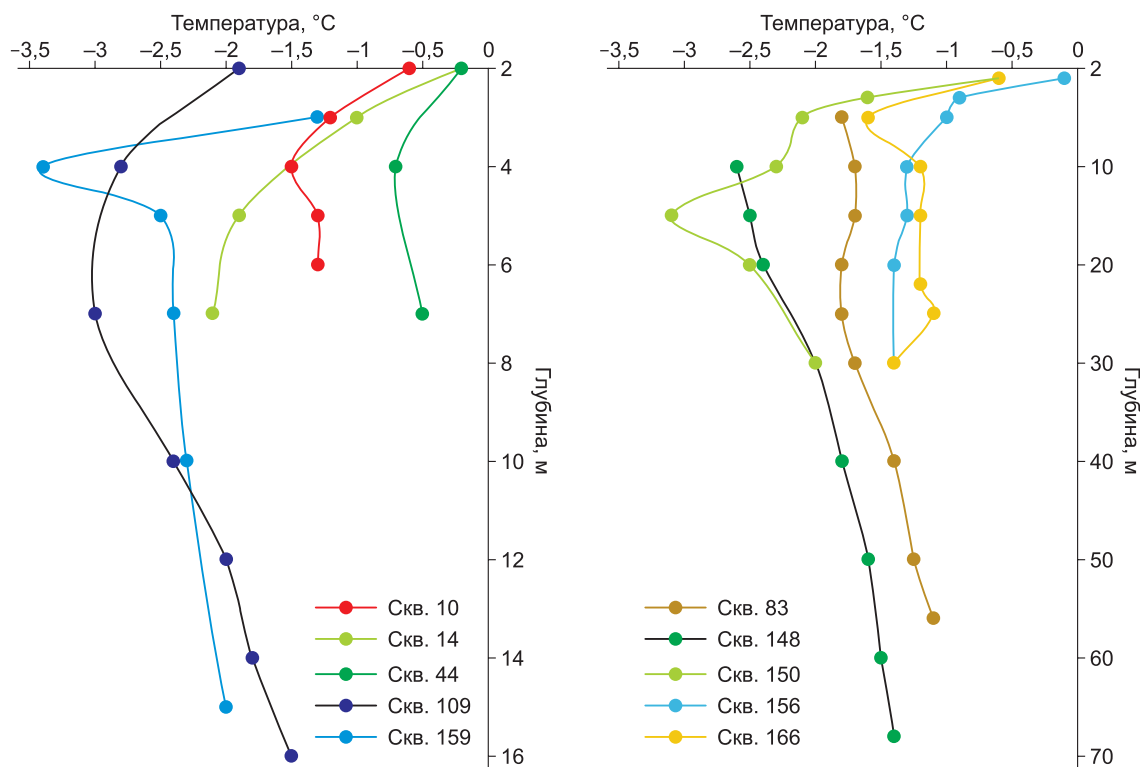


Рис. 4. Температура пород в Токарикском (скв. 10–109) и Гувилгринском (скв. 148–166) грабенах на середину августа. Положение скважин в рельефе приведено в тексте

Fig. 4. Permafrost temperatures in the Tokarikan (BH 10–109) and the Guvigra (BH 148–166) grabens in the middle of August. Site locations are described in the text

впадины мощность ММТ постепенно уменьшается, а температура пород повышается.

Наличие выходящих на поверхность песчано-гравийно-щебенистых отложений в прирусловых зонах, как правило, не закрепленных растительностью в пределах долины р. Гонам, с большой вероятностью свидетельствует о талом состоянии аллювиальной толщи и близком залегании подстилающих коренных пород.

Для Гувилгринского грабена характерен высокий уровень залегания подземных вод. В ходе обследования бурового профиля наблюдались изливающиеся скважины, в зимнее время формирующие небольшие наледы.

Обсуждение результатов

На основе имеющихся данных было выполнено мерзлотно-ландшафтное районирование и пространственное моделирование температуры и мощности ММТ для территории Токарикского и Гувилгринского грабенов. Составлены схематические карты распространения и мощности многолетнемерзлых пород (рис. 7, 8).

Для грабенов Гонамского бассейна характерен сплошной тип распространения ММП с локальным наличием сквозных и несквозных таликов. Формирование геокриологической обстановки в этих межгорных структурах находится под воздействием схожих геолого-структурных, орографических, микроклиматических и гидрогеологических факторов.

Наиболее мягкими геокриологическими условиями, иногда с неглубоким залеганием подошвы ММТ и высокими отрицательными температурами характеризуется Токарикский грабен. Достаточно однообразный в геоморфологическом отношении Гувилгринский грабен не обладает пестротой геокриологических условий. Мощность ММТ здесь колеблется в узких пределах. Различия геокриологических условий между грабенами в первую очередь обусловлены географическим положением, степенью расчлененности рельефа и ареалом развития маревого ландшафта.

Выше было отмечено, что попытки характеристики геокриологических условий территории

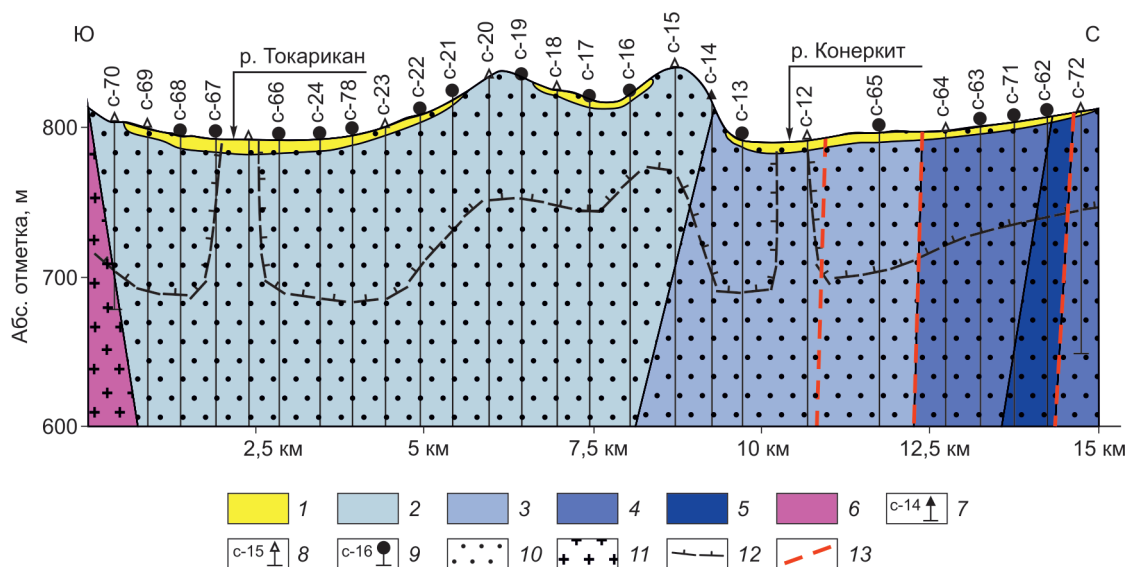


Рис. 5. Мерзлотно-геологический разрез через центральную часть Токарикского грабена.

1 – четвертичные отложения; 2 – беркайтская свита (J_3br); 3 – кабактинская свита (J_3kb); 4 – дурайская свита (J_2dr); 5 – юхтинская свита (J_1uh); 6 – архейские породы; 7 – скважины с геотермическими измерениями; 8 – скважины с термокаротажной информацией; 9 – скважины с информацией об уровне подземных вод или интервале разбуривания ледяных пробок; 10 – осадочные горные породы (песчаники, алевролиты); 11 – кристаллические горные породы; 12 – нижняя граница многолетнемерзлой толщи; 13 – тектонические нарушения

Fig. 5. Permafrost cross-section through central part of the Tokarikan graben.

1 – Quaternary deposits; 2 – berkakit series (J_3br); 3 – kabakta series (J_3kb); 4 – durai series (J_2dr); 5 – yukhta series (J_1uh); 6 – Archean rocks; 7 – measured boreholes; 8 – logging boreholes; 9 – boreholes with ground water level or ice plug interval information; 10 – sediments rocks (sandstones, siltstones); 11 – metamorphic and ingenious rocks; 12 – base of permafrost; 13 – tectonic fault

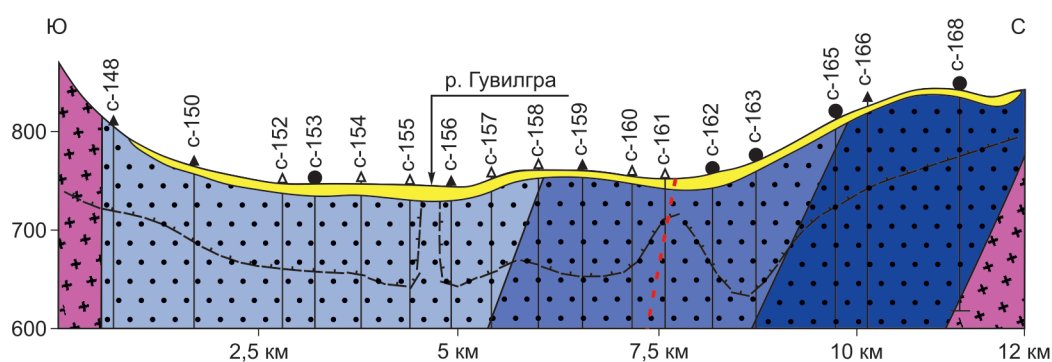


Рис. 6. Мерзлотно-геологический разрез через центральную часть Гувилгринского грабена. Усл. обозн. см. на рис. 5

Fig. 6. Permafrost cross section through central part of the Guvigra graben. See symbols in Fig. 5

структур Гонамского бассейна на основе закономерностей, установленных в Алдано-Чульманской впадине, предпринимались неоднократно [5, 15, 16]. Следует отметить, что до 1996 г. на этот район не имелось фактических данных о параметрах мощности ММТ и температуре горных пород. Появившиеся в 1970-х годах ряд мерзлотных карт [17], охватывающих рассматриваемую территорию, основывались на аналогии геокриологических условий, установленных в

Чульманской впадине. В качестве главных аргументов приводились следующие факты (по С.Ф. Хруцкому) [15]):

1. Общность тектонической позиции. Все структуры развиты параллельно широтному Южно-Якутскому глубинному разлому и сопряжены с ним крупным разломом регионального характера.

2. По морфологии в основном – это широкие асимметричные депрессии, ограниченные

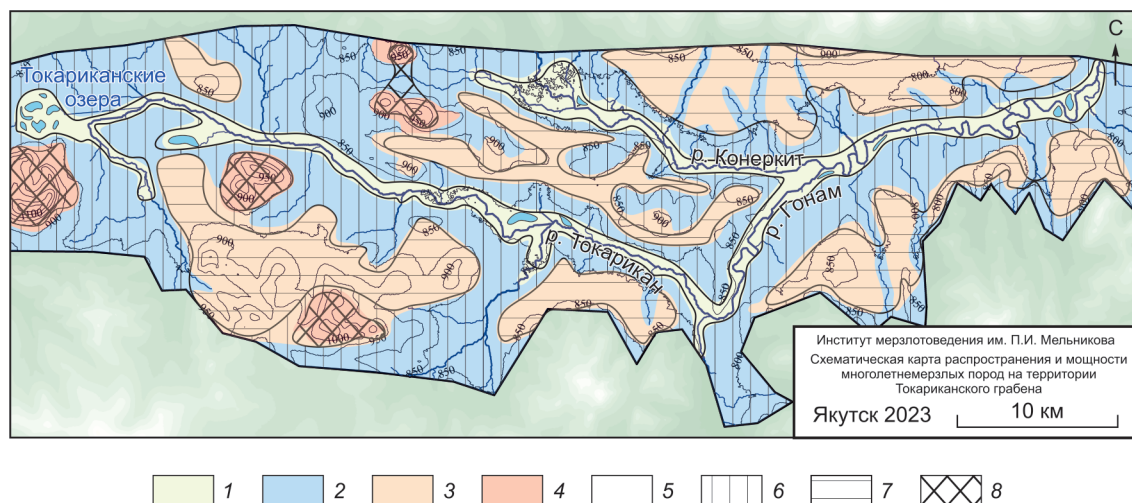


Рис. 7. Схематическая геокриологическая карта Токариканского грабена. Тип местности (1–4): 1 – долинно-западинный; 2 – зандрово-равнинный; 3 – плоскогогорный; 4 – горно-привершинный; Распространение и мощность ММП: 5 – сплошное, с наличием сквозных и несквозных таликов, мощность ММП до 100 м; 6 – сплошное, мощность ММП от 50 до 150 м; 7 – сплошное, мощность ММП от 100 до 200 м; 8 – сплошное, мощность ММП более 200 м

Fig. 7. Tokarikan graben permafrost condition. Landscape (1–4): 1 – lowlands; 2 – outwash plains; 3 – flat watershed area; 4 – mountains; Extent and thickness of permafrost: 5 – continuous, with taliks, permafrost thickness less 100 m; 6 – continuous, permafrost thickness from 50 to 150 m; 7 – continuous, permafrost thickness from 100 to 200 m; 8 – continuous, permafrost thickness up to 200 m

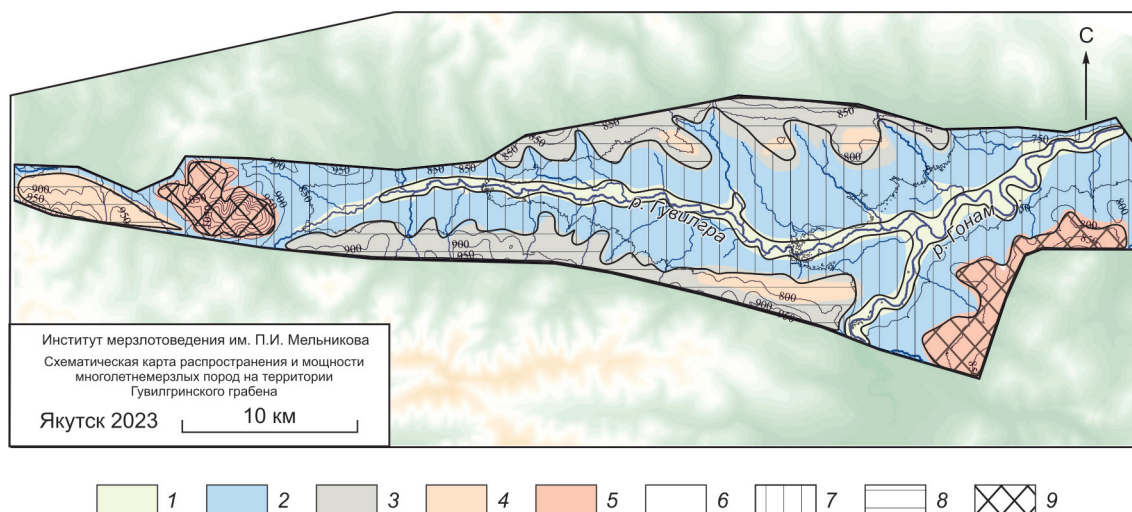


Рис. 8. Схематическая геокриологическая карта Гувилгринского грабена. Тип местности (1–5): 1 – долинно-западинный; 2 – зандрово-равнинный; 3 – горно-склонный; 4 – плоскогогорный; 5 – горно-привершинный; Распространение и мощность ММП: 6 – сплошное, с наличием сквозных и несквозных таликов, мощность ММП до 150 м; 7 – сплошное, мощность ММП от 100 до 200 м; 8 – сплошное, мощность ММП от 200 до 250 м; 9 – сплошное, мощность ММП более 250 м

Fig. 8. Guvilgra graben permafrost condition. Landscape (1–5): 1 – lowlands; 2 – outwash plains; 3 – gentle slopes; 4 – flat watershed area; 5 – mountains; Extent and thickness of permafrost: 6 – continuous, with taliks, permafrost thickness less 150 m; 7 – continuous, permafrost thickness from 100 to 200 m; 8 – continuous, permafrost thickness from 200 to 250 m; 9 – continuous, permafrost thickness up to 250 m

с юга крутыми надвигами или взбросами. Каждая структура в достаточной мере переработана современной речной сетью.

3. Структуры выполнены литологически однотипными мезозойскими отложениями, мощность которых возрастает с запада на восток.

4. Приуроченность депрессий к одной климатической зоне. Характер рельефа благоприятствует развитию температурных инверсий – основной причине формирования специфических геокриологических условий Алдано-Чульманской впадины.

Вышеуказанные аргументы действительно во многом отождествляют природные и орографические условия мезозойских структур Алданского щита. Однако, как показали проведенные нами исследования, особенности распространения ММП и параметры ММТ имеют существенные различия.

Представленные результаты позволяют сделать вывод, что имеющиеся представления о геокриологических условиях Токариканского и Гувилгринского грабенов и ряда других мелких мезозойских структур (см. рис. 1) Алданского бассейна требуют существенной корректировки.

На рис. 9 приведено изменение температуры горных пород с глубиной для наиболее типичного для впадин элемента рельефа – выположенного водораздела. По характеру температурных кривых подтверждается наиболее яркое различие между Алдано-Чульманской впадиной и грабенами Гонимского бассейна – наличие ММП в пределах этих элементов рельефа. Это различие обусловлено главным образом нарастающей суровостью климатических условий в восточном направлении и особенностями снегонакопления (см. табл. 2).

В процессе выполнения исследований нами рассчитаны теплофизические параметры пяти юрских литологических комплексов, формирующих основу мезозойской угольной формации в грабенах. Определение эффективной теплопроводности описывается выражением (1) (см. табл. 1). Итоговые расчетные значения эффективной теплопроводности между различными свитами варьируют от 2,62 до 2,88 Вт/(м · К). Наибольшее содержание пластов углей в составе кабактинской свиты (J_3kb) находит отражение в минимальной эффективной теплопроводности относительно других юрских толщ.

На территории Алданского щита располагается около 20 структур, выполненных породами мезозойского возраста [13]. Детально изучены геокриологические условия Алдано-Чульманской впадины [18, 19], установлены основные особенности распространения ММП в Токинской впадине [1, 20], получены сведения о параметрах

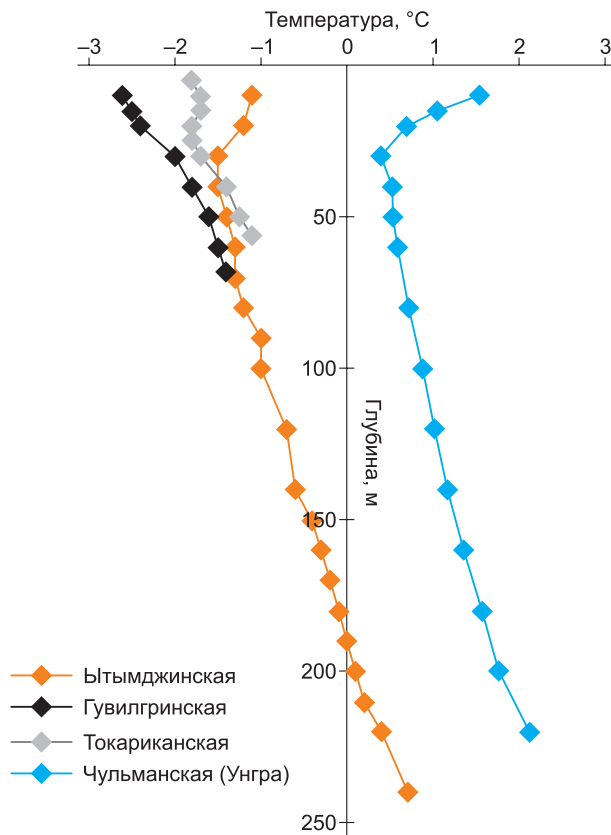


Рис. 9. Температура пород на водораздельных ландшафтах для мезозойских структур Алданского щита

Fig. 9. Temperature profile for watershed sites within mesozoic depression of the Aldan shield

мерзлой толщи Ытымджинской впадины [2, 12]. Таким образом, на текущий момент имеется геокриологическая характеристика наиболее крупных структур мезозойской угольной формации Алданского щита.

На основании анализа полученных сведений о геокриологических условиях нами дана сравнительная характеристика, отражающая основные геокриологические параметры мезозойских структур Алданского щита (табл. 3). Представленные в таблице признаки наглядно отображают своеобразие природных условий на территории мезозойских структур, однако комплекс факторов, формирующих данные условия, требует более подробного изучения и уточнения.

Выводы

1. В отличие от Алдано-Чульманской впадины для грабенов Гонимского бассейна характерен сплошной тип распространения ММП, что вносит изменения в представление региональ-

Сравнение геокриологических признаков крупнейших мезозойских депрессий Алданского щита

Table 3

Permafrost features comparison of mesozoic depressions of the Aldan shield

Геокриологический признак	Алдано-Чульманская впадина	Структуры Гонамского бассейна	Токинская впадина
Тип промерзания	Прерывистый, местами массивно-островной	Сплошной. Талики распространены локально	Сплошной, талики приурочены к крупным водотокам и флювиогляциальным отложениям
Природный ландшафт	Преобладание пологих, выпуклых водораздельных пространств	Преобладание маревого ландшафта	Сочетание среднегорного и платообразного рельефа
Температура ММП	Преобладают высокотемпературные ММП	Температура пород изменяется от $-3,4$ до $-0,5$ °C	Широкий диапазон температур. Имеют развитие низкотемпературные ММП
Мощность ММТ	До 150 м, редко до 200 м	Преимущественно от 80 до 250 м, возможно до 300 м	Широкий диапазон, от 20 до 260 м
Экзогенные криогенные явления	Имеют повсеместное и очень разнообразное развитие	Развиты локально и в ограниченном количестве. Изучены слабо	Имеют повсеместное и очень разнообразное развитие
Растительность	Богатое разнообразие, от массивов светлохвойных пород до лиственных редин	Фитоценозы типичны и скудны	Широкое разнообразие

ных особенностей формирования геокриологических условий юго-востока Сибирской платформы.

2. Теплофизические свойства основных литологических комплексов Токариканского и Гувилгринского грабенов характеризуются небольшим диапазоном изменений, так, коэффициент эффективной теплопроводности юрских свит варьирует от 2,62 до 2,88 Вт/(м · К), что обусловлено однообразным минеральным составом литологических комплексов.

3. Для Токариканского грабена температура ММП изменяется от $-3,0$ до $-0,5$ °C. Мощность ММТ варьирует от 60 до 210 м, достигая максимума в нижних частях склонов и надпойменных террасах и выклиниваясь на бортах впадины и невысоких локальных водоразделах. Для впадины характерны выходы подземных вод, к которым приурочены обособленные талики.

4. Геокриологические условия Гувилгринского грабена обусловлены широким развитием маревого типа ландшафта. Температура ММП на глубине 15 м колеблется от $-3,1$ до $-1,2$ °C. По-

дошва ММТ залегает в пределах 120–250 м от поверхности, сокращаясь к бортам впадины.

Список литературы / References

1. Железняк М.Н. *Геотемпературное поле и криолитозона Юго-Востока Сибирской платформы*. Новосибирск: Наука; 2005. 227 с.
Zheleznyak M.N. *Geotemperature field and cryolithozone of South-East Siberian Platform*. Novosibirsk: Nauka; 2005. (In Russ.)
2. Сысолятин Р.Г., Железняк М.Н. Термический режим криолитозоны Ытымджинской впадины Алданского щита. *Криосфера Земли*. 2021;XXV(6):28–40. <https://doi.org/10.15372/KZ20210603>
Sysolyatin R.G., Zheleznyak M.N. Thermal regime of cryolithozone at Ytymdzha depression, Aldan shield. *Earth's Cryosphere*. 2021;XXV(6):23–33.
3. *Угольная база России. Том VI (Сводный, заключительный). Основные закономерности углеобразования и размещения угленосности на территории России*. Под ред. В.Ф. Череповского. М.: ООО «Геоинформмарк»; 2004. 779 с.
Russia Coal Base. Volume VI. Cherepovsky V.F. (ed.). Moscow: Geoinformmark; 2004. (In Russ.)
4. Радьков А.В. и др. *Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб*

1:1 000 000 (третье поколение). Серия Алдано-Забайкальская. Лист О-52 – Томмот. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ; 2016. 276 с.

Radkov A.V. et al. *State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:1,000,000 (third generation). Aldan-Zabaikalskaya series. Sheet O-52 – Tommot*. Explanatory note. St. Petersburg: Cartographic Factory of VSEGEI; 2016. (In Russ.)

5. Инженерная геология СССР. Т.3. Восточная Сибирь. Комаров И.С. (ред.). М.: Изд-во МГУ; 1978. 529 с.

Engineering Geology of the USSR. Volume 3. Eastern Siberia. Komarov I.S. (ed.). Moscow: Moscow State University Press; 1978. (In Russ.)

6. Балобаев В.Т. и др. *Руководство по применению полупроводниковых терморезисторов для геокриологических измерений*. Якутск: ИМЗ СО АН СССР; 1985. 48 с.

Balobaev V.T. et al. *Guidelines for the use of semiconductor thermistors for geocryological measurements*. Yakutsk: Permafrost Institute of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences; 1985. (In Russ.)

7. Guglielmin M., Balks M. R., Adlam, L. S., Baio F. Permafrost Thermal Regime from Two 30-m Deep Boreholes in Southern Victoria Land, Antarctica. *Permafrost and Periglacial Processes*. 2011;22(2):129–139. <https://doi.org/10.1002/ppp.715>

8. Балобаев В.Т., Левченко А.И. Геотермические особенности и мерзлая зона хр. Сунтар Хаята (на примере Нежданинского месторождения). *Геотеплофизические исследования в Сибири*. Павлов А.В. (ред.). Новосибирск: Наука; 1978:129–142.

Geothermal features and frozen zone Suntar Hayata (on the example of the Nezhdaninsky deposit). *Geoteplophysical research in Siberia*. Pavlov A.V. (ed.). Novosibirsk: Nauka; 1978:129–142. (In Russ.)

9. Гаврильев Р.И. Метод определения теплофизических свойств почв и горных пород в квазистационарном режиме нагрева. *Проблемы гидротермики мерзлых почв*. Саввинов Д.Д. (ред.). Новосибирск: Наука; 1988:66–72.

Gavriliev R.I. Method for determination of thermophysical properties of soils and rocks in quasistationary heating mode. *Hydrothermal problems of frozen soils*. Savvinov D.D. (ed.). Novosibirsk: Nauka; 1988:66–72. (In Russ.)

10. Lachenbruch A.H., Sass J.H., Marshall B.V., Moses T.H. Permafrost, heat flow, and the geothermal regime at Prudhoe Bay, Alaska. *Journal of Geophysical Research*. 1982;87(B11):9301–9316, <https://doi.org/10.1029/JB087iB11p09301>

11. 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; 1999:57–59.

Zheleznyak M.N. Some aspects of geocryological studies in the development of a rational variant of placement of engineering structures and the development of mineral deposits. *The Extreme North: Problems of Ecology*. Moscow: Resource-Info; 1999:57–59 (In Russ.)

12. Sysolyatin R. Characteristics of the Siberian coal basins permafrost: An example of Ytymdja depression. *Science of The Total Environment*. 2022;816:151494. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151494>

13. Желинский В.М. *Мезозойская угленосная формация Южной Якутии*. Н.: Наука; 1980. 111 с.

Zhelinsky V.M. *Mesozoic coal formation of South Yakutia*. Novosibirsk: Nauka; 1980. (In Russ.)

14. Алексеев В.Р., Философов Г.Н. Орографическая температурная инверсия воздуха в Восточной Сибири и ее роль в формировании многолетнемерзлых горных пород. *Тепловой и водный режим некоторых районов Сибири*. Л.: Наука; 1970:102–107.

Alekseyev V. R., Filosofov G.N. Orographic air temperature inversion in Eastern Siberia and its role in formation of permafrost rocks. *Thermal and water regime of some Siberian regions*. Leningrad: Nauka; 1970:102–107. (In Russ.)

15. Хруцкий С.Ф. К истории формирования многолетнемерзлых пород и подземных льдов в грабенах Типтоно-Гонамского бассейна. *Мерзлотные исследования*. 1968;8:81–89.

Khrutsky S.F. On the history of formation of permafrost and ground ice in the Tipton-Gonam basin grabens. In: Kudryavtsev V.N. (ed.) *Permafrost Investigations*. Moscow: 1968;8:81–89. (In Russ.)

16. *Геокриология СССР. Средняя Сибирь*. Под ред. Э.Д. Ершова М.: Недра; 1989. 413 с.

Geocryology of the USSR. Middle Siberia. Ershov E.D. (ed.). Moscow: Nedra, 1989. (In Russ.)

17. *Байкало-Амурская железнодорожная магистраль: геокриологическая карта*. М.: ГУГК; 1979. 1 к. (2 л.)

Baikal-Amur railway: geocryological map. Moscow: GUGK; 1979. (In Russ.)

18. Белокрылов И.Д., Ефимов А.И. *Многолетнемерзлые породы зоны железорудных и угольных месторождений Южной Якутии*. М.: Издательство АН СССР; 1960. 74 с.

Belokrylov I.D., Efimov A.I. *Permafrost rocks of the zone of iron-ore and coal deposits of South Yakutia*. Moscow: USSR Academy of Sciences Publishing House; 1960. (In Russ.)

19. *Южная Якутия: Мерзлотно-гидрогеол. и инж.-геол. условия Алданского горнопром. р-на*. Под ред. В. А. Кудрявцева. М.: Издательство МГУ; 1975. 444 с.

Southern Yakutia. Permafrost, hydrogeological, engineering and geological conditions of the Aldan mining industry region. Kudryavtsev V.A. (ed.). Moscow: Moscow University Press; 1975. (In Russ.)

20. Железняк М.Н., Любомиров А.С., Поздняков И.В. Геокриологические условия Токинской впадины. *Материалы Первой Конференции геокриологов России*, г. Москва, 03–05 июня 1996 г. М.: Издательство МГУ; 1996:522–528.

Zheleznyak M.N. et al. Geocryological conditions of the Toka Depression. *Proceedings of the First Conference of Russian Geocryologists*, Moscow, June 3-5, 1996. Moscow: Publishing House of Moscow State University; 1996:522–528. (In Russ.)

Об авторах

СЫСОЛЯТИН Роберт Гамлетович, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-2633-1919>, ResearcherID: W-9244-2018, Scopus AuthorID: 1085009, e-mail: robertseesaw@gmail.com

ЖЕЛЕЗНЯК Михаил Николаевич, член-корр. РАН, доктор геолого-минералогических наук, директор, <https://orcid.org/0000-0003-4124-6579>, ResearcherID: J-2544-2018, Scopus AuthorID: 70158, e-mail: fe1956@mail.ru

About the authors

SYSOLYATIN, Robert Gamletovich, Junior Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-2633-1919>, ResearcherID: W-9244-2018, Scopus AuthorID: 1085009, e-mail: robertseesaw@gmail.com

ZHELEZNYAK, Mikhail Nikolaevich, Corresponding member of the RAS, Dr. Sci. (Geol.-Mineral.), Director, <https://orcid.org/0000-0003-4124-6579>, ResearcherID: J-2544-2018, Scopus AuthorID: 70158, e-mail: fe1956@mail.ru

Поступила в редакцию / Submitted 22.03.2023

Поступила после рецензирования / Revised 18.04.2023

Принята к публикации / Accepted 27.06.2023