

## ГЕОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПОЛЯ И ТЕРМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В КРИОСФЕРЕ

УДК 551.345:550.361

DOI: 10.15372/KZ20210603

ТЕРМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ КРИОЛИТОЗОНЫ  
ЫТЫМДЖИНСКОЙ ВПАДИНЫ АЛДАНСКОГО ШИТА

Р.Г. Сысолятин, М.Н. Железняк

*Институт мерзлотоведения имени П.И. Мельникова СО РАН,  
677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия; robertseesaw@gmail.com, fe1956@mail.ru*

Представлены результаты геокриологических исследований в Ытымджинской впадине Алданского щита. С 1999 по 2001 г. в центральной части впадины был пробурен ряд геологоразведочных скважин, что позволило впервые получить информацию о геотемпературном поле, теплофизических свойствах горных пород и мощности многолетнемерзлой толщи. Приводятся многолетние ряды режимных наблюдений температурного режима деятельного слоя, полученные на заболоченной пойменной террасе, надпойменной террасе и склоне южной экспозиции. Температура пород на глубине 1 м варьирует от 4.8 до –11.7 °С при среднегодовой температуре от –1.0 до –4.9 °С. Результатом работ стал субдолготный мерзлотно-геотермический разрез по центральной части Ытымджинской впадины, в пределах которого мощность многолетнемерзлых пород изменяется от 106 до 251 м.

**Ключевые слова:** температура горных пород, геотермический градиент, мощность толщи мерзлых пород, Ытымджинская впадина.

THERMAL REGIME OF CRYOLITHOZONE  
AT YTYMDZHA DEPRESSION, ALDAN SHIELD

R.G. Sysolyatin, M.N. Zheleznyak

*Melnikov Permafrost Institute SB RAS,  
Merzlotnaya str. 36, Yakutsk, 677010, Russia; robertseesaw@gmail.com, fe1956@mail.ru*

The results of geocryological studies in the Ytymdzha depression of the Aldan Shield have been presented. From 1999 to 2001, several exploration wells were drilled in the central part of the depression, which made it possible for the first time to obtain the information on the geotemperature field, the thermophysical properties of rocks and the thickness of the permafrost stratum. The long-term series of monitoring of the temperature regime of the active layer obtained for the bogged floodplain terrace, the upland terrace, and the slope of the southern exposure have been adduced. The temperature of rocks at a depth of 1 m varies from 4.8 to –11.7 °C, with average annual temperature ranging from –1.0 to –4.9 °C. The work has resulted in the sublongitudinal permafrost-geothermal section along the central part of the Ytymdzha depression, within which the thickness of permafrost varies from 106 to 251 m.

**Key words:** ground temperature, geothermal gradient, permafrost thickness, Ytymdzha depression.

## ВВЕДЕНИЕ

Трансформные, субширотные впадины Алданского щита (Чульманская, Токарикская, Гувилгринская, Ытымджинская и Токинская), представленные мезозойскими отложениями, являются основными источниками угля для промышленного освоения. В настоящее время активно ведется разработка месторождений на участках в Чульманской впадине (Нерюнгринский, Кабактинский, Денисовский ГОК и др.) и в Токинской впадине (Эльгинский ГОК), однако, по данным геологоразведочных работ [Угольная база..., 2004], все впадины мезозойского возраста перспективны для добычи угля.

Угленосные районы Южной Якутии в плане изученности геокриологических условий крайне неоднородны. Восточная часть Чульманской впадины и западная часть Токинской впадины, благодаря разработке угольных месторождений и обилию фактического материала, являются одними из самых изученных областей современного распространения криолитозоны [Белокрылов, Ефимов, 1960; Южная Якутия, 1975; Железняк и др., 1996].

В то же время располагающиеся между ними Ытымджинская, Гувилгринская, Токарикская впадины и ряд более мелких структур не изучены в геокриологическом отношении и их картирова-

ние выполнено по аналогии с Чульманской впадиной [Геокриология СССР, 1989]. Влияние температурной инверсии приземного воздуха описывается как доминирующий фактор, определяющий прерывистое распространение ММП в пределах Чульманской впадины [Белокрылов, Ефимов, 1960; Алексеев, Философов, 1970], в то время как для Токинской впадины характерна высотная поясность геокриологических условий [Железняк и др., 1996; Железняк, 2005]. Практически для всей территории Южной Якутии (за пределами районов промышленного освоения месторождений) характер и глубина промерзания, а также температурный режим криолитозоны изучены фрагментарно.

На примере Ытымджинской впадины рассмотрены отличия геокриологических условий от схожих по строению и условиям развития более крупных структур, впервые представлены данные о температурном режиме многолетнемерзлой толщи (ММТ). Изучение особенностей распространения криогенной толщи и выявление факторов, определяющих формирование температурного режима горных пород, имеют научно-практическую значимость. В случае Южно-Якутского угольного бассейна (конкретно Ытымджинской впадины) это обусловлено наличием потенциально пригодных к промышленному освоению крупных угольных горизонтов [Желинский и др., 1976; Угольная база..., 2004].

Актуальность исследований также связана с влиянием геокриологических условий на сохранение газоносности угольных бассейнов и их ролью при эмиссии парниковых газов [Гресов и др., 2014].

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Настоящая работа основана на результатах полевых мерзлотно-геотермических исследований, проведенных с 2001 по 2019 г. сотрудниками лаборатории геотермии Института мерзлотоведения (ИМЗ) СО РАН. Возможность выполнения первых геотермических измерений в регионе появилась благодаря геологоразведочным работам ОАО «Южякутгеология» (1999–2001 гг.), состоявшим в

бурении разведочных скважин глубиной 500 м в центральной части Ытымджинской впадины.

В процессе работ сотрудники «Южякутгеологии» предприняли попытку определить положение нижней границы ММТ по косвенным признакам (появление воды в скважине, потеря бурового раствора, разбуривание ледяных пробок и т. д.). В фондовых материалах приводится краткая характеристика мерзлотных условий, согласно которой мощность ММТ изменяется от 30 до 140 м. Начиная с 2001 г. сотрудниками ИМЗ СО РАН были проведены работы по точечному термометрическому каротажу скважин непосредственно после бурения, позднее (2006, 2013, 2016 гг.) проведены геотермические измерения в выстоявшихся стволах скважин. В результате геотермические измерения были выполнены в шести скважинах до максимальной глубины 240 м. Терморезисторные установки, которые применялись для определения температуры, изготовлены и оттарированы в лаборатории геотермии ИМЗ СО РАН, точность измерений до 0.05 °С [Балобаев и др., 1985а].

Всего в пределах Ытымджинской впадины различными методами (расчеты, прямые измерения, анализ термокаротажа и др.) положение нижней границы ММТ было определено в 12 скважинах. В шести скважинах прямые геотермические измерения проведены после продолжительного периода восстановления термического состояния пород после бурения. Также для построения мерзлотно-геотермического разреза использовались данные геотермических исследований и особенностей распространения ММТ близрасположенных Гувилгринской, Токарикканской, Токинской впадин [Железняк, 2005].

Расчет параметров глубокого промерзания невозможен без информации о теплофизических свойствах пород, слагающих разрез. Характерной особенностью впадин мезозойского возраста является выдержанность стратиграфического состава отложений [Желинский, 1980]. Единичные определения теплофизических свойств горных пород (дурайская и кабактинская свиты), выполненные для Ытымджинской впадины (6 образцов), пока-

Таблица 1. Распределение основных типов пород (%) в Ытымджинской впадине по данным бурения и их теплопроводность

Свита	Песчаники			Алевриты	Угли	Теплопроводность эффективная, Вт/(м·°С)
	мелко-зернистые	средне-зернистые	крупно-зернистые			
Кабактинская	27	38	4	25	4	1.7–1.9
Дурайская	43	9	5	40	2.5	1.9–2.1
Участок	Теплопроводность эталонная*, Вт/(м·°С)					
Чульмакан	2.99 (12)			–	0.9–1.1	
Эльга	2.57 (4)			2.57 (1)	–	

\* Теплопроводность пород в мерзлом состоянии по Р.И. Гаврилову. В скобках – количество образцов.

зали высокую сходимость результатов с образцами из Чульманской и Токинской впадин [Гаврилев, 2013]. На основе схожего генезиса образования мезозойских впадин теплопроводность пород Ытымджинской впадины принималась аналогичной вышеприведенным впадинам (табл. 1). Эталонная теплопроводность отдельных образцов имеет повышенные значения относительно эффективной теплопроводности всей толщи по причине наличия трещиноватости и неоднородности строения пачки горных пород. Это объясняется наличием трещиноватости, неоднородности разреза и различием в структуре и текстуре на стратиграфических границах. Эффективная теплопроводность исследуемых горизонтов определяется вещественным составом, а по результатам определенных установлена схожесть значений с юрскими свитами Вилюйской синеклизы [Семенов и др., 2018]. Из-за преобладания мелкозернистого песчаника мы предполагаем, что дурайская свита характеризуется большим значением эффективной теплопроводности. Распределение пород по составу (в процентах) приводится по данным разведочного бурения (см. табл. 1).

Для определения термического режима слоя сезонного оттаивания в 2013 г. были оборудованы три наблюдательных площадки на наиболее типичных для Ытымджинской впадины ландшафтах (заболоченная пойменная терраса, надпойменная терраса, склон южной экспозиции). При этом были использованы логгерные станции НОВО U-22 и НОВО U-23 с датчиками ТМС50-ND, которые широко применяются при проведении геотермического мониторинга [Константинов и др., 2011]. Датчики располагались в пластиковой трубке диаметром 20 мм, заглублены в копуши. Растительность на поверхности участка не удалялась и претерпела минимально возможные нарушения. Непрерывный ряд наблюдений удалось выполнить на двух участках из трех из-за вмешательства диких животных, а также из-за труднодоступности участков для ежегодного обслуживания.

В 2019 г. на первой надпойменной террасе был установлен автоматический почвенно-измерительный комплекс АПИК-008. Он представляет собой портативную метеостанцию с широкими возможностями мониторинга метеорологических параметров, но в данной статье приводятся лишь осредненные значения температуры воздуха.

#### **КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИРОДНЫХ УСЛОВИЙ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ**

Ытымджинская впадина располагается в центральной части Алданского щита (рис. 1). Границы впадины определяют по местам контакта мезозойских и архейских пород. С юга впадину обрамляет Гонамский хребет и хр. Колтан-Джур с

максимальными высотными отметками до 1848 и 1831 м соответственно. С севера Ытымджинская впадина ограничена площадью распространения протерозойских пород Алданского нагорья (рис. 2). Флексурные перегибы на фоне спокойного моноклинального залегания пластов свидетельствуют о блоковом строении фундамента, что характерно для всей серии мезозойских впадин [Имаев и др., 2000]. Из-за блоковой структуры распределения фундамента строение и состав чехла могут резко меняться в пределах небольшой площади [Желинский, 1980].

Ытымджинская впадина представляет собой региональную субширотную депрессию с размерами 130 × 30 км. Совокупная мощность мезозойских отложений достигает 1100 м, что установлено геофизическими работами и подтверждено данными бурения [Руквич, 2018]. Мощность четвертичных отложений установлена в диапазоне 5–15 м и уменьшается с увеличением абсолютной отметки. По данным геологической съемки масштаба 1:200 000, четвертичные отложения представлены преимущественно аллювиальными, делювиально-солифлюкционными и озерно-болотными образованиями. В геоморфологическом отношении впадина характеризуется холмистым рельефом средней расчлененности со средними превышениями водоразделов над долинами 200–300 м. В центральной части впадины режимные наблюдения температур пород в слое годовых теплооборотов проводились на следующих участках:

1. Заболоченная пойменная терраса (торфяные болота, мари) с угнетенным лиственничным лесом или его отсутствием; преобладающий диапазон высот для данного ландшафта 550–650 м (рис. 3, а).

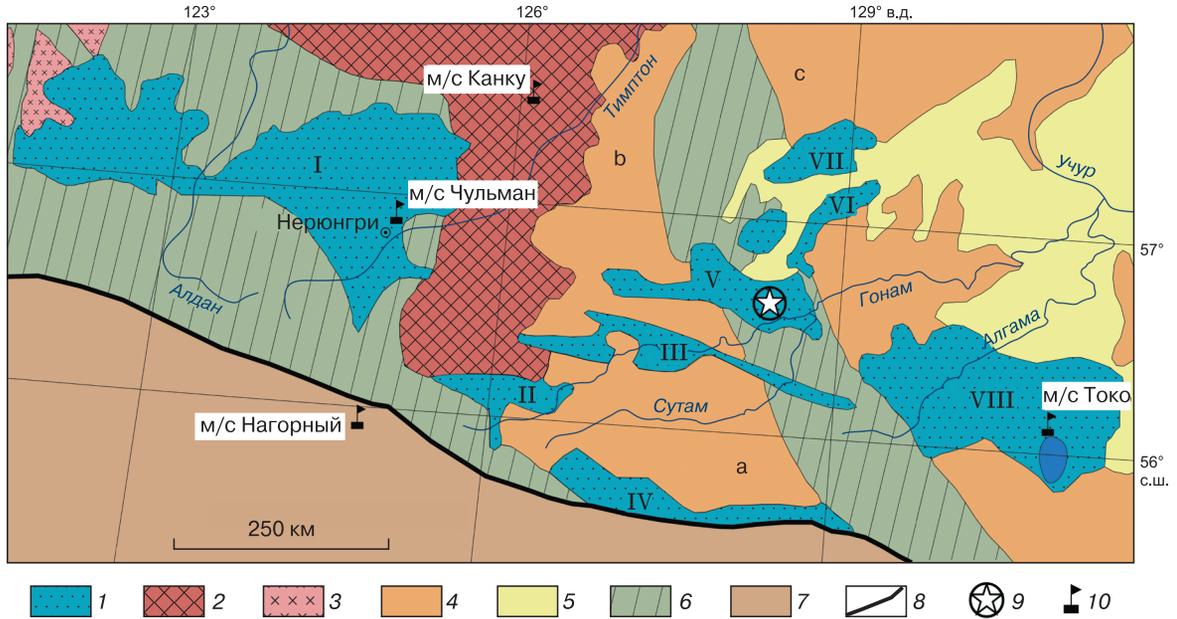
2. Надпойменная эрозионная терраса с сосново-лиственничным лесом и багульниково-лишайниковым покровом с редкими березами, ольхой; диапазон высот 600–700 м (рис. 3, б).

3. Склон южной экспозиции с делювиальными дресвяно-супесчаными отложениями и растительностью из лиственницы, ольхи и сосны с разнотравно-голубично-багульниковым покровом; диапазон высот 700–1000 м (рис. 3, в).

Влажность рыхлых отложений слоя сезонного оттаивания не определялась и приводится согласно данным монографии [Южная Якутия, 1975, с. 86].

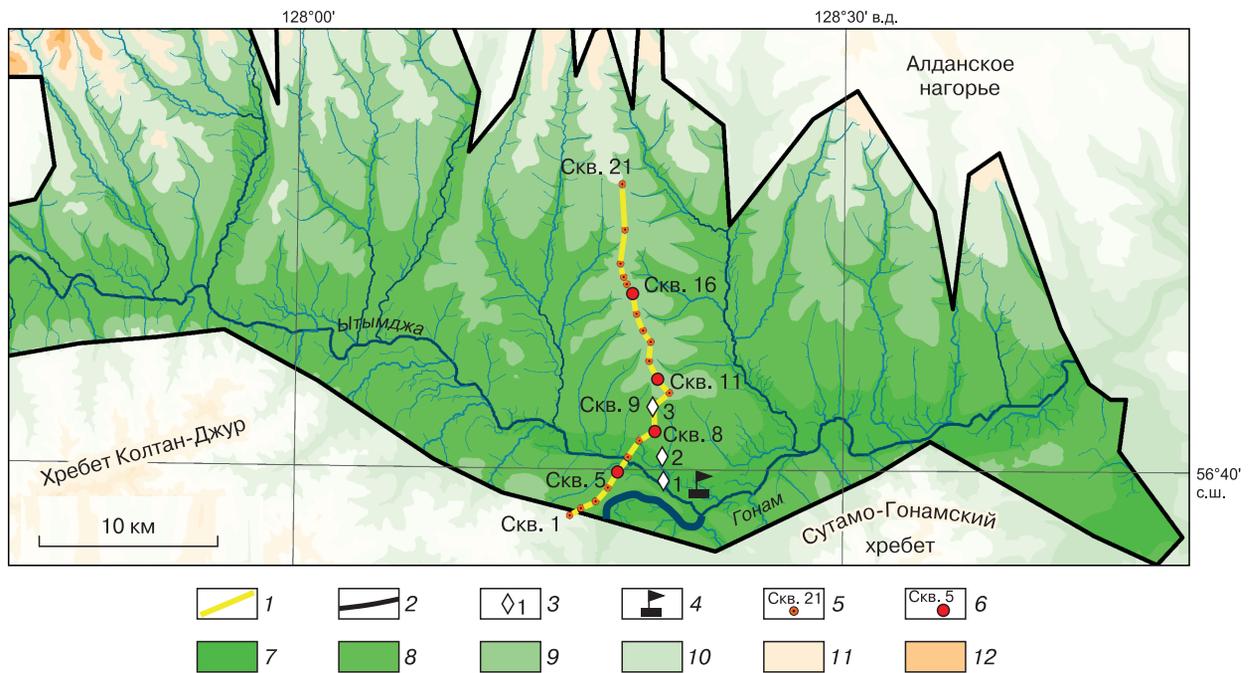
Геокриологические экзогенные процессы проявляются в виде солифлюкции, морозной сортировки, образования структурных грунтов, наледообразования, курумообразования и пучения грунтов.

По результатам годичных наблюдений, температура воздуха в Ытымджинской впадине за период с 01.08.2019 по 31.07.2020 г. составила –7.0 °С, что является промежуточным значени-



**Рис. 1. Основные структуры центральной части Алданского щита.**

1 – наложенные впадины с породами мезозойского возраста (I – Чульманская, II – Токарикская, III – Гувилгринская и Атугей-Нуямская, IV – Верхне-Сутамская, V – Ытымджинская, VI – Гынамо-Семджинская, VII – Куранах-Гынымская, VIII – Токинская); 2–5 – супертеррейны: 2 – Нимнырский, гранулит-ортогнейсы (V–Є); 3 – Западно-Алданский, гранит-зеленокаменный (V–Є); 4 – Сутамский (а), Сеймский (b), Учурский (с), гранулит-парагнейсы (V–Є); 5 – венд-кембрийский платформенный чехол; 6 – зоны тектонического меланжа; 7 – Становая складчатая система; 8 – Становой разлом; 9 – место проведения работ; 10 – ближайшие метеостанции.



**Рис. 2. Схема участка проведения работ в восточной части Ытымджинской впадины.**

1 – буровой профиль; 2 – граница Ытымджинской впадины; 3 – участки геотемпературного мониторинга и их номера; 4 – расположение АПИК; 5 – глубокие геологоразведочные скважины; 6 – скважины с геотермическими измерениями; 7–12 – абс. отметка поверхности, м: 7 – менее 600; 8 – 600–800; 9 – 800–1000; 10 – 1000–1200; 11 – 1200–1400; 12 – 1400–1600.



**Рис. 3. Участки проведения температурного мониторинга:**

*a* – пойменная терраса; *б* – надпойменная терраса; *в* – склон южной экспозиции, скв. 9. Фото Р.Г. Сысолятина.

**Таблица 2. Основные климатические параметры по метеостанциям региона за период 01.08.2019–31.07.2020**

Метеостанция	Абс. отметка, м	Температура воздуха, °С				Сумма зимних температур*, °С·месяц
		средняя	максимальная	минимальная	Амплитуда	
Ытымджа (АПИК-008)	568	-7.0	35.0	-49.0	84.0	-134.3
Чульман	858	-5.2	32.7	-41.4	74.1	-110.4
Токо	825	-8.5	32.3	-50.6	82.9	-137.0
Нагорный	842	-5.4	32.0	-38.0	70.0	-110.0
Канку	1218	-7.3	30.1	-40.9	71.0	-129.7

\* Октябрь–апрель.

ем относительно метеостанций в Чульманской (-5.2 °С) и Токинской (-8.5 °С) впадинах (табл. 2). Это согласуется с западным переносом воздушных масс, при котором в восточном направлении отмечается увеличение суровости климатических условий. Наблюдаемое в Чульманской впадине инверсионное распределение температуры воздуха [Алексеев, Философов, 1970] может устанавливаться как в схожей по рельефу Ытымджинской впадине, так и в восточной части Токинской впадины. Расположенные в локальных понижениях метеостанция (м/с) Токо и АПИК-008 в Ытымджинской впадине характеризуются

минимальными среднегодовыми значениями и максимальными годовыми амплитудами колебаний температуры воздуха.

#### ТЕМПЕРАТУРА В СЛОЕ СЕЗОННОГО ОТТАИВАНИЯ ПОРОД

Температурный режим слоя сезонного оттаивания в Ытымджинской впадине приводится по участкам на заболоченной пойменной террасе, дренированной надпойменной террасе и склоне южной экспозиции на глубине 1 м (рис. 4). Минимальные значения среднегодовой температуры

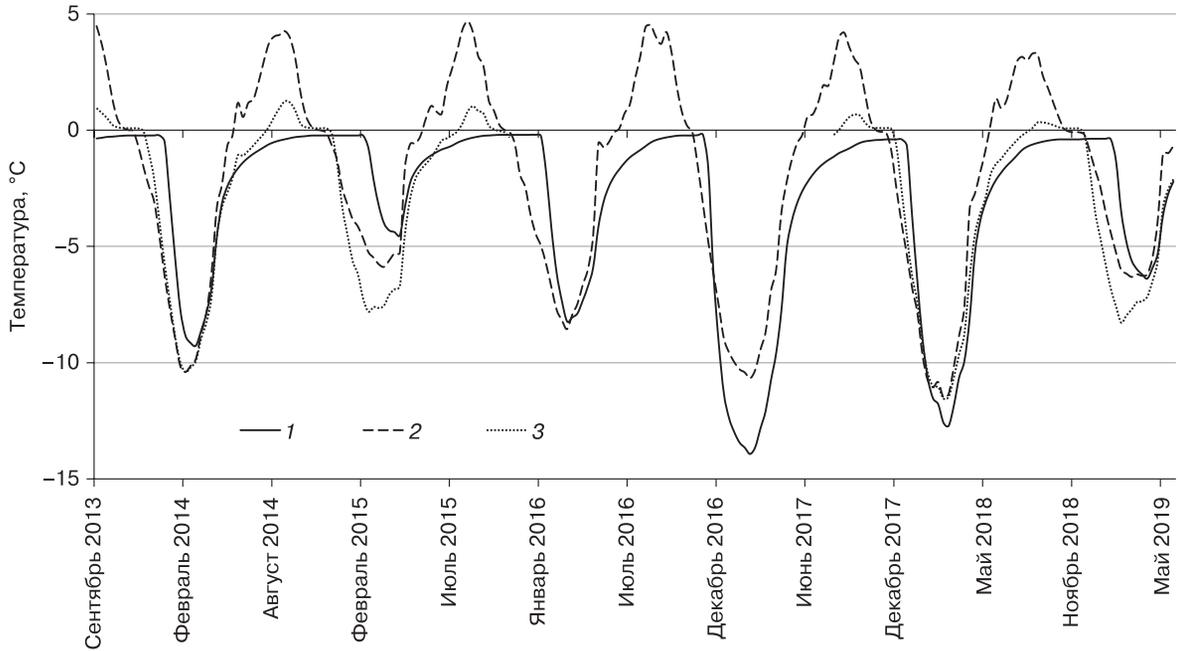


Рис. 4. Изменение среднедекадной температуры пород на глубине 1 м.

1 – пойменная терраса; 2 – надпойменная терраса; 3 – склон южной экспозиции.

отмечены на пойменной террасе и варьируют от  $-1.2^{\circ}\text{C}$  (2015 г.) до  $-4.9^{\circ}\text{C}$  (2017 г.). В течение периода наблюдений температура пород на глубине 1 м не превышала  $-0.1^{\circ}\text{C}$ , минимально опускаясь до  $-14^{\circ}\text{C}$  (февраль 2015 г.). Тепловая инерция участков с влажностью, превышающей 60 %, довольно высока, минимальные значения температуры отмечаются в феврале–марте, максимальные – в декабре.

В сравнении с сильно увлажненными участками более дренированные ландшафты значительно отличаются по температурному режиму. Среднегодовая температура от  $-1.0^{\circ}\text{C}$  (2015 г.) до  $-2.7^{\circ}\text{C}$  (2017 г.) и максимальные значения температуры в слое сезонного оттаивания, достигающие  $4.8^{\circ}\text{C}$  (август 2015 г.), выделяют террасы с сосново-лиственничным лесом и обилием кустарника как наиболее теплые участки.

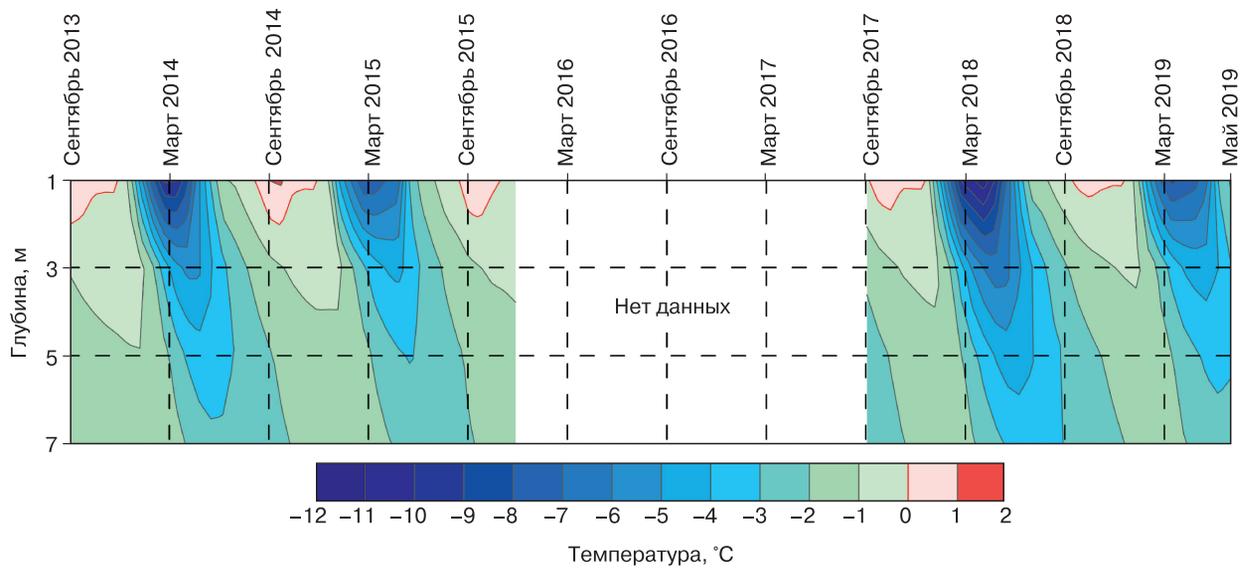


Рис. 5. Изменение температур горных пород в слое годовых теплооборотов по скважине 9.

Температура пород в слое сезонного оттаивания на склоне южной экспозиции измерялась с перерывом с января 2015 г. по июнь 2016 г., а в мае 2019 г. измерительная аппаратура была уничтожена лесным пожаром. На участке наблюдений породы не прогревались выше  $+1.3\text{ }^{\circ}\text{C}$  (01.09.2014), при этом порой охлаждаясь до  $-11.7\text{ }^{\circ}\text{C}$  (март 2018 г.). Среднегодовые значения температуры пород изменялись от  $-3.0\text{ }^{\circ}\text{C}$  (2014 г.) до  $-3.9\text{ }^{\circ}\text{C}$  (2018 г.).

Глубина сезонного оттаивания для пойменной террасы не превышает 1 м, что согласуется с расчетными данными. Для склона южной экспозиции при интерполяции методом Кригинга (рис. 5) сезонное оттаивание пород может достигать глубин 2.1–2.2 м, что превышает значения, приведенные в работе [Южная Якутия, 1975, с. 86]. На надпойменной террасе, на глубине 1 м положительная температура фиксируется с июня по середину ноября, на склоне южной экспозиции не более двух месяцев в году. На пойменной террасе слой сезонного оттаивания вовсе не превышает 1 м.

Устойчивой тенденции к изменению температуры в слое сезонного оттаивания не наблюдается. С 2014 по 2018 г. отмечалось понижение температуры на глубине 1 м до  $-10.3$  и  $-14.7\text{ }^{\circ}\text{C}$  на пойменной и надпойменной террасах соответственно. Однако температура пород в зимний период 2019 г. отличается одними из самых высоких значений за весь период наблюдений. Анализ процесса формирования температурного режима в слое

сезонного оттаивания пород требует более детального изучения всех влияющих факторов, что в нашем случае невозможно из-за отсутствия данных даже о снежном покрове. Последнее выделяется как основной фактор, определяющий температурный режим пород в Сибири [Шерстюков, 2008].

### ТЕМПЕРАТУРА ГЛУБОКИХ ГОРИЗОНТОВ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ТОЛЩ

В ходе геотермических измерений в скважинах 5, 8 и 16 удалось определить температуру пород до глубины 95, 35 и 240 м соответственно (табл. 3). Температура пород характеризуется квазистационарным режимом, однако ниже глубины 40 м по скважинам 5 и 16 наблюдается стационарное распределение (рис. 6). По величине геотермического градиента до глубин 20–40 м выделяется зона, в которой градиент отрицательный, ниже градиент принимает положительные значения в среднем от  $1.0$  до  $1.8\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$ . По фоновым данным, в скважинах с 7 по 13 выполнялись термокаротажные измерения и определялся геотермический градиент. Однако все эти измерения были проведены в талой (подмерзлотной) зоне, на 100–150 м ниже расчетной границы ММТ. Величина этого градиента применялась при расчете мощности ММТ (см. ниже). Для скважин, в которых каротаж не проводился, принималось усредненное значение геотермического градиента  $1.6\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$ .

На вышележающем водоразделе (скв. 16) минимальные значения температур пород ( $-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) за-

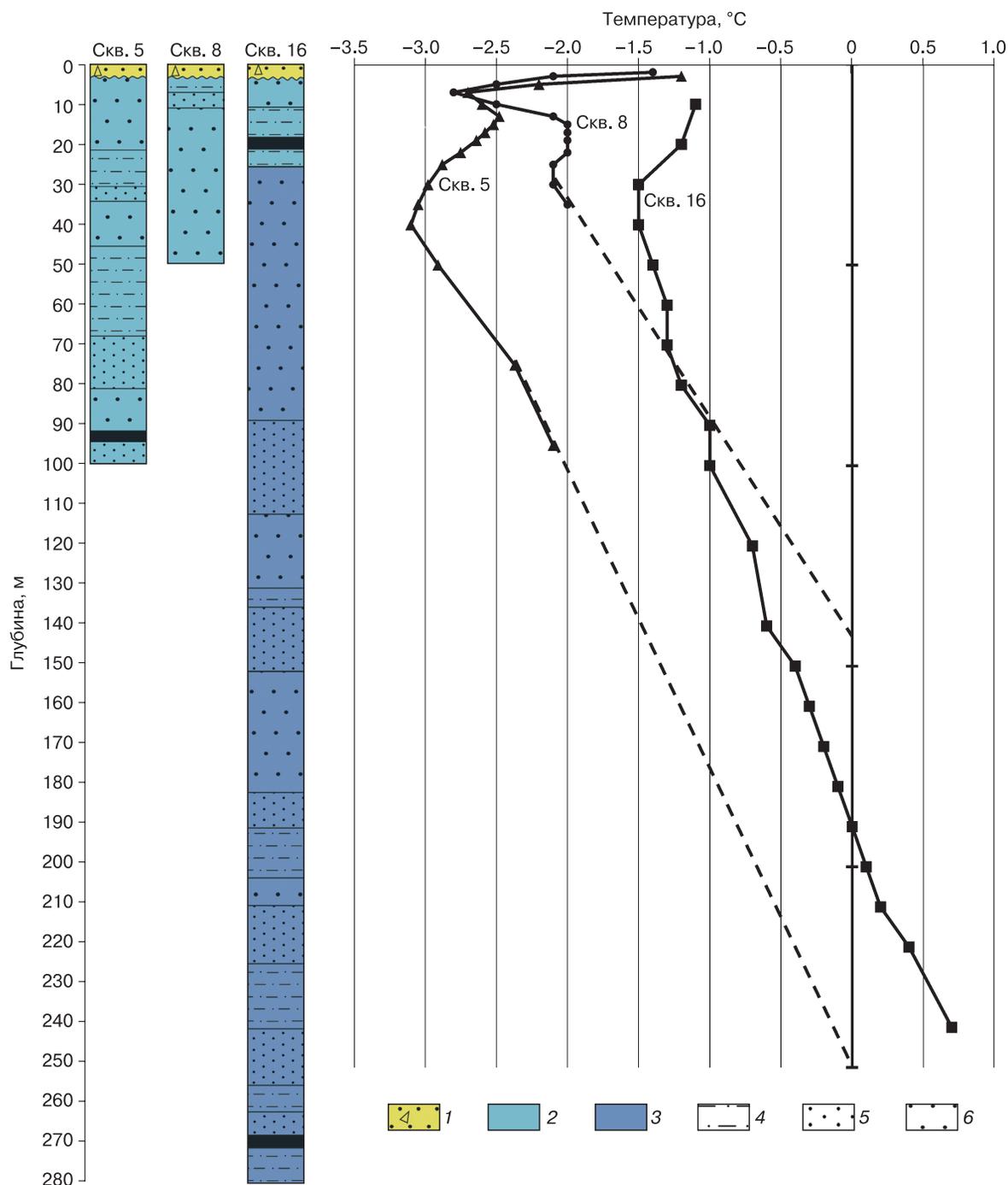
Таблица 3. Расположение скважин, их температурные параметры и расчетные значения мощности многолетнемерзлой толщи

Скважина	Абс. отм., м	Элемент рельефа	Экспозиция	Уклон, град	Температура* на гл. 40 м, $^{\circ}\text{C}$	Градиент температуры, $^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$		Теплопроводность эффективная, Вт/(м $\cdot$ °C)	Мощность ММТ*, м	Плотность теплового потока, Вт/м $^2$	Мощность ММТ, м		
						средний	по каротажу				по формуле (1)	по градиенту каротажа	по градиенту*
5	670	Склон	Северная	25	<b>-3.1</b>	<b>1.8</b>	1.6	1.8	251	0.021	308	234	212
6	580	Пойма	Нет	0	-1.9	1.45	1.6	1.8	173	0.023	189	159	171
7	590	Терраса	»	0	-1.8	1.45	<b>1.1</b>	1.8	183	0.023	181	204	164
8	720	Склон	Южная	25	<b>-2.1**</b>	1.45	<b>1.83</b>	1.8	187	0.021	221	155	185
9	750	»	»	10	-2	1.45	<b>1.26</b>	1.8	192	0.023	199	199	178
10	815	»	»	15	-1.7	1.45	<b>1.98</b>	1.8	154	0.022	178	126	157
11	840	Водораздел	»	15	-1.1	1.45	<b>3.26</b>	1.8	106	0.022	129	74	116
12	870	»	»	10	-1.2	1.45	<b>1.29</b>	1.8	130	0.023	135	133	123
13	930	»	»	15	-1.3	1.45	<b>1.45</b>	1.8	135	0.022	145	130	130
14	950	»	»	5	-1.4	1.45	1.6	1.8	138	0.023	150	128	137
15	900	»	Северная	10	-1.5	1.45	1.6	1.8	145	0.023	159	134	143
16	880	»	»	15	<b>-1.5</b>	<b>1.1</b>	1.6	2.0	<b>190</b>	0.022	175	134	176

Примечание. Жирным шрифтом выделены измеренные (действительные) значения.

\* Измеренный или расчетный показатель.

\*\* Температура с глубины 35 м.



**Рис. 6. Изменение температуры пород в глубоких скважинах.**

1 – четвертичные отложения; 2 – кабактинская свита ( $J_3kb$ ); 3 – дурайская свита ( $J_2dr$ ); 4 – алевролиты; 5 – мелкозернистый песчаник; 6 – среднезернистый песчаник. Штриховая линия соответствует увеличению температуры по градиенту.

фиксированы на глубине 35–40 м, т. е. ниже глубины годовых теплооборотов, указанной в [Южная Якутия, 1975, с. 75]. До нижней границы ММТ, зафиксированной на глубине 190 м, наблюдается повышение температуры со средним гради-

ентом  $1.0\text{ }^\circ\text{C}/100\text{ м}$ . В талых породах температурный градиент возрастает до  $1.4\text{ }^\circ\text{C}/100\text{ м}$ , и на глубине 240 м температура достигает значения  $+0.7\text{ }^\circ\text{C}$ . Средняя плотность теплового потока в мерзлой зоне составила  $0.020\text{ Вт}/\text{м}^2$ , в талой (под-

Таблица 4. Температурные и теплофизические параметры горных пород по скважине 16

Диапазон глубин, м	Разница температур горных пород, °С	Градиент*, °С/м	Теплопроводность пород, Вт/(м·°С)	Плотность теплового потока**, Вт/м <sup>2</sup>
40–50	0.10	0.010	2	0.020
50–60	0.10	0.010	2	0.020
60–70	0.00	0.000	2	0.000
70–80	0.10	0.010	2	0.020
80–90	0.20	0.020	2	0.040
90–100	0.00	0.000	2.1	0.000
100–120	0.30	0.015	2.1	0.032
120–140	0.10	0.005	2	0.010
140–150	0.20	0.020	2	0.040
150–160	0.10	0.010	1.9	0.019
160–170	0.10	0.010	2	0.020
170–180	0.10	0.010	2.2	0.022
180–190	0.10	0.010	2	0.020
190–200	0.10	0.010	2	0.020
200–210	0.10	0.010	2	0.020
210–220	0.20	0.020	2	0.040
220–240	0.30	0.015	2	0.030

\* Среднее значение 0.011.

\*\* Среднее значение: 0.02 в мерзлой толще, 0.028 в талых породах, 0.022 общее.

мерзлотной) равна 0.028 Вт/м<sup>2</sup>, общее значение по 200-метровой толще составляет 0.022 Вт/м<sup>2</sup> (табл. 4). Теплопроводность в каждом конкретном диапазоне глубин оценивалась по составу и однородности представленных пород.

В пределах крутого склона северной экспозиции скв. 5 из-за близости к обрывистому склону

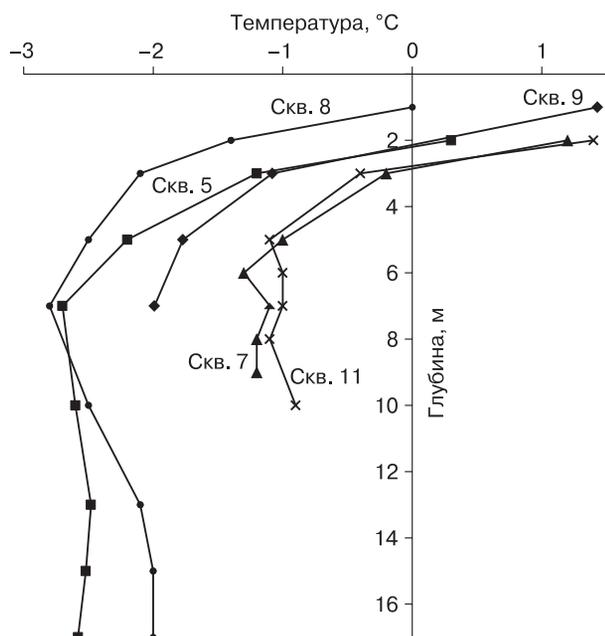


Рис. 7. Температура пород в слое годовых теплооборотов на 10.08.2006 г.

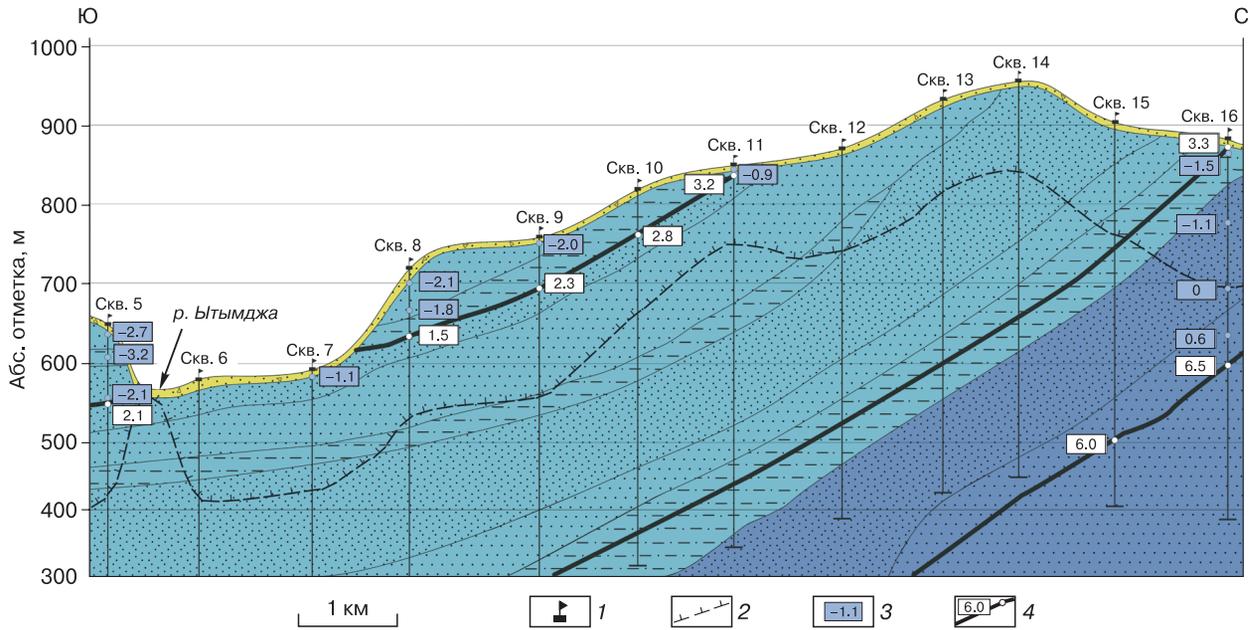
испытывает влияние бокового промерзания, поэтому на глубине 40 м температура пород опускается до  $-3.1$  °С. До максимально измеренной глубины 95 м, в непосредственной близости к крупному угольному горизонту, она возрастает с градиентом  $0.18$  °С/100 м и достигает  $-2.1$  °С.

В средней части склона южной экспозиции (скв. 8) минимальная температура ( $-2.1$  °С) зафиксирована на глубинах 30 и 35 м.

В скважинах 7, 9 и 11 удалось измерить температуру только в слое годовых теплооборотов, и на начало августа 2006 г. на максимально возможной для замера глубине она составляла  $-1.2$ ,  $-2.0$  и  $-0.9$  °С соответственно (рис. 7). Согласно характеру температурных кривых, полученных в глубоких скважинах (5, 8 и 16), минимальные значения температуры приурочены к глубине 35–40 м. Разница температур между глубинами 10 и 35–40 м может достигать от 0.1 до 0.5 °С, что помимо положения в рельефе может объясняться также реакцией на изменение климатических условий в регионе [Завадский, 2013]. Эта разница была учтена при расчете температур пород на глубине 40 м для составления мерзлотно-геотермического разреза и отражена на рис. 8 и в табл. 3.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

По результатам выполненных исследований был построен субдолготный мерзлотно-геотермический профиль по центральной части Ытымджинской впадины (см. рис. 8). При определении



**Рис. 8.** Субдолготный мерзлотно-геологический профиль по центральной части Ытымджинской впадины.

1 – местоположение и номер геологоразведочной скважины; 2 – нижняя граница ММТ по результатам прямых измерений и расчетов; 3 – температура пород в скважине, °С; 4 – крупный угольный горизонт и его мощность, м. Остальные усл. обозн. см. на рис. 6.

усредненного значения нижней границы ММТ (см. табл. 3) использовались расчеты:

- по градиенту температуры, полученному в ходе термокаротажных работ;
- по усредненному градиенту, полученному прямыми измерениями в мерзлой толще (скв. 5, 16);
- по выражению, отражающему стационарное распределение температур пород в мерзлой толще:

$$Z = T \frac{\lambda}{q} + 40, \quad (1)$$

где  $Z$  – расчетная мощность ММТ, м;  $T$  – температура на глубине 40 м, °С;  $\lambda$  – эффективная теплопроводность пород, Вт/(м·°С);  $q$  – плотность внутриземного теплового потока, Вт/м<sup>2</sup> [Карслоу, Егер, 1964].

Плотность теплового потока для каждой скважины определялась по формуле

$$q = q_0 \cos \alpha, \quad (2)$$

где  $q_0$  – исходная величина внутриземного теплового потока для района, Вт/(м·°С);  $\alpha$  – угол наклона поверхности.

В выражении (2) отображается влияние рельефа на плотность теплового потока на конкретном участке [Балобаев, Левченко, 1978]. Исходная величина внутриземного теплового потока в Ытым-

джинской впадине не определялась из-за отсутствия глубоких геотермических скважин. Измерение теплового потока в Чульманской и Токинской впадинах позволило установить повышенные значения внутриземного теплового потока относительно остальной части Алданского щита [Железняк, 2005]. Для расчета мощности ММТ в Ытымджинской впадине исходная величина внутриземного теплового потока  $q_0$  определена по скв. 16 и составляет 0.023 Вт/м<sup>2</sup> (см. табл. 4).

Эффективная теплопроводность толщи определялась по вещественному составу пород, процентному соотношению горных пород в свитах и на разрезе. Наибольшее влияние имеют мощные угольные горизонты, которые из-за низкой теплопроводности могут уменьшать эффективную теплопроводность всей толщи.

Результат, полученный при оценке и расчете мощности ММТ в местах расположения скважин, был выбран за опорные точки при проведении нижней границы глубокого промерзания (см. табл. 3). Приводимая на рис. 8 мощность ММТ имеет минимальные значения в пределах склона южной экспозиции (участок скв. 9–11). Данный участок принадлежит к склону южной экспозиции, а также имеет мощный угольный горизонт. Подобное воздействие угольных пластов на температурный режим пород отмечалось и ранее [Ба-

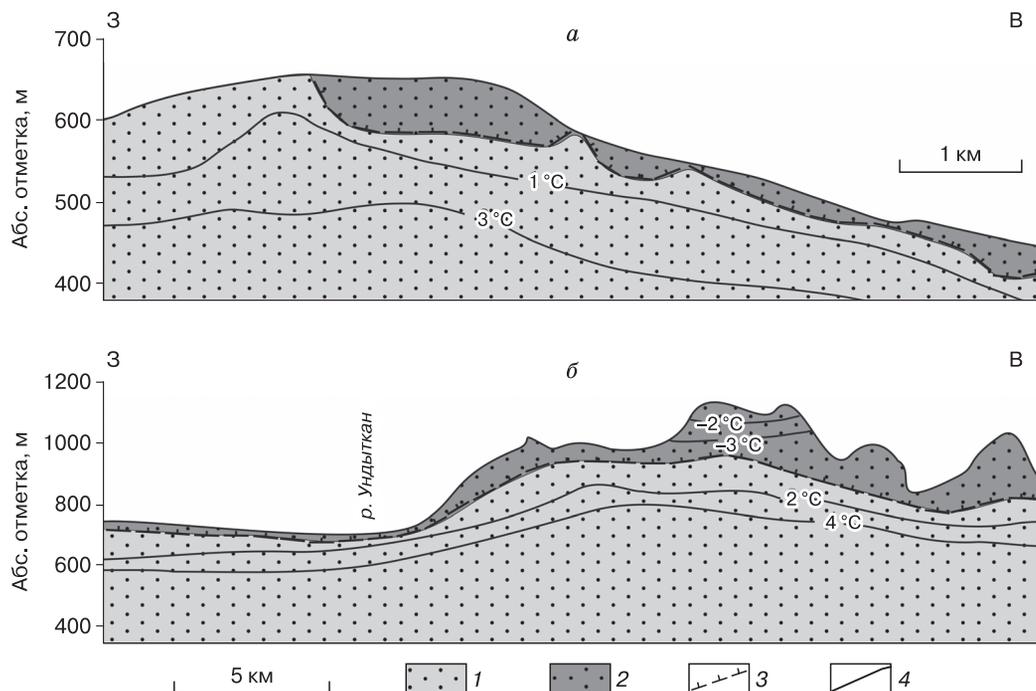


Рис. 9. Мерзлотно-геотермические разрезы на участках в Чульманской (а) и Токинской (б) впадинах [Железняк, 2005].

а – участок Унгра; б – участок Эльге; 1 – талые породы; 2 – мерзлые толщи; 3 – граница мерзлых толщ; 4 – изотермы.

лобаев и др., 19856; Гресов и др., 2014; Gao et al., 2017]. Максимальная мощность ММТ отмечается на крутом склоне северной экспозиции (участок скв. 5), что связано с инсоляционными особенностями и условиями теплообмена на поверхности.

Приводимое в фондовых материалах положение нижней границы ММТ в центральной части Ытымджинской впадины отличается от полученных авторами результатов на 50–100 м в сторону увеличения мощности ММТ. Особенно ярко это проявляется по скв. 16, где удалось провести инструментальные измерения до нижней границы ММТ. Здесь отличие достигает 100 м. По результатам измерений в скв. 5 также выявляется несоответствие положения действительной границы ММТ, однако достоверную величину несоответствия установить не удалось. По сравнению с Чульманской и Токинской впадинами рассматриваемый участок выделяется отсутствием талых зон (кроме возможных подрусовых таликов рек Ытымджа и Гонам) (рис. 9). На плоских водоразделах и склонах южной и западной экспозиции, где в Чульманской впадине выделяются талые зоны [Белокрылов, Ефимов, 1960; Южная Якутия, 1975], в Ытымджинской впадине наблюдается уменьшение мощности ММТ. Значительной дифференциации мощности ММТ (как в Токин-

ской впадине [Железняк, 2005]) не наблюдается, поскольку среднехолмистый рельеф Ытымджинской впадины не способствует существенно изменению положения нижней границы промерзания.

Температурная инверсия приземного воздуха [Алексеев, Философов, 1970], создающая особый тип промерзания, представленный в Чульманской впадине [Белокрылов, Ефимов, 1960], не зафиксирована. Однако повышенные значения мощности ММТ в пониженных участках (скв. 6, 7) указывают на возможное влияние концентрации холодных воздушных масс в долинах.

Из результатов исследований следует, что распространение многолетнемерзлых пород в Ытымджинской впадине носит сплошной характер (см. рис. 8). Тальми зонами в Ытымджинской впадине могут являться русла и русловые отмели рек Ытымджа и Гонам. К ним же приурочены острова чозении – регионального индикатора талых пород [Тыртиков, 1969]. Наледные поляны, приуроченные к притокам главных рек, могут локально формировать зоны прерывистого промерзания. Малое количество наледей в столь активной в тектоническом плане структуре говорит о тампонировании и залеченности большинства трещин, по которым может происходить разгрузка подземных вод [Фотиев, 1965].

## ВЫВОДЫ

1. Пойменные террасы отличаются наименьшей мощностью сезонноталого слоя, надпойменные террасы (и, вероятно, плоские водоразделы) – максимальной температурой пород.

2. Среднегодовая температура пород на глубине 1 м изменяется от  $-1.0$  до  $-4.9$  °С. Минимальными значениями характеризуются заболоченные пойменные террасы, а максимальными – надпойменные террасы, где в среднем за год температура пород повышается до  $4.0$  °С.

3. Минимальная температура пород ниже глубины годовых теплооборотов изменяется от  $-1.5$  до  $-3.1$  °С. Измеренный градиент в мерзлой толще в среднем равен  $1.45$  °С/100 м. Согласно единичному замеру, плотность теплового потока в мерзлой толще составила  $0.02$  Вт/м<sup>2</sup>, а в талой (подмерзлотной) зоне зафиксировано ее увеличение до  $0.028$  Вт/м<sup>2</sup>.

4. На основе выполненных буровых работ и мерзлотно-геотермических исследований установлено, что территория Ытымджинской впадины обладает самыми суровыми геокриологическими условиями из мезозойских впадин Алданского щита. Многолетнемерзлые толщи имеют сплошной характер распространения, а их мощность, по результатам расчетов, варьирует от 106 до 251 м.

5. На формирование мощности ММТ оказывают влияние рельеф и теплофизические характеристики пород. В центральной части Ытымджинской впадины минимальная глубина промерзания характерна для склона южной экспозиции с приуроченным к нему крупным угольным горизонтом.

*Благодарности. Авторы выражают благодарность Сергею Ивановичу Серикову за ценные советы и помощь при проведении полевых работ.*

*Работа выполнена в рамках бюджетного проекта АААА-А20-120111690010-2 “Тепловое поле и криогенная толща северо-востока России. Особенности формирования и динамика”.*

## Литература

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

**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, 1985а, 48 с.

**Балобаев В.Т., Девяткин В.Н., Гаврильев Р.И., Русаков В.Г.** О геотеплофизических исследованиях полезных ископаемых на Северо-Востоке // Геология и геологоразведка, 1985б, № 5, с. 36–37.

**Балобаев В.Т., Левченко А.И.** Геотермические особенности и мерзлая зона хр. Сунтар Хаята (на примере Неждандинского месторождения) // Геотеплофизические исследования в

Сибири / Под ред. А.В. Павлова. Новосибирск, Наука, 1978, с. 129–142.

**Белокрылов И.Д., Ефимов А.И.** Многолетнемерзлые породы зоны железорудных и угольных месторождений Южной Якутии. М., Изд-во АН СССР, 1960, 74 с.

**Гаврильев Р.И.** Каталог теплофизических свойств горных пород Северо-Востока России / Отв. ред. М.Н. Железняк, В.И. Жижин. Якутск, ИМЗ СО РАН, 2013, 172 с.

**Геокриология СССР.** Средняя Сибирь / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Изд-во Моск. ун-та, 1989, 413 с.

**Гресов А.И., Обжиров А.И., Яцук А.В.** Геоструктурные закономерности распределения мерзлоты в углегазоносных бассейнах Северо-Востока России // Криосфера Земли, 2014, т. XVIII, № 1, с. 3–11.

**Железняк М.Н.** Геотемпературное поле и криолитозона юго-востока Сибирской платформы. Новосибирск, Наука, 2005, 227 с.

**Железняк М.Н., Любомиров А.С., Поздняков И.В.** Геокриологические условия Токинской впадины // Материалы Первой конференции геокриологов России. М., Изд-во Моск. ун-та, 1996, кн. 1, с. 522–528.

**Желинский В.М.** Мезозойские отложения и генетические типы угольных пластов Южной Якутии / В.М. Желинский, В.Н. Коробицына, С.С. Каримова. Новосибирск, Наука, 1976, 124 с.

**Желинский В.М.** Мезозойская угленосная формация Южной Якутии. Новосибирск, Наука, 1980, 120 с.

**Завадский Ф.Р.** Динамика геокриологических и гидрологических условий Южной Якутии под влиянием изменений климата: Дис. ... канд. геол.-мин. наук. Якутск, 2013, 151 с.

**Имаев В.С.** Сейсмоструктурная Якутии / В.С. Имаев, Л.П. Имаева, Б.М. Козьмин. М., ГЕОС, 2000, 227 с.

**Карслоу Г.** Теплопроводность твердых тел / Г. Карслоу, Д.М. Егер. М., Наука, 1964, 487 с.

**Константинов П.Я., Федоров А.Н., Мачимура Т. и др.** Использование автоматических регистрирующих устройств (логгеров) для температурного мониторинга многолетнемерзлых грунтов // Криосфера Земли, 2011, т. XV, № 1, с. 23–32.

**Рукович А.В.** Геологическое строение и угленосность Ытымджинской впадины Гонамского угленосного района Южно-Якутского угольного бассейна // Успехи современ. естествознания, 2018, № 12, с. 200–205.

**Семенов В.П., Железняк М.Н., Кириллин А.Р., Жижин В.И.** Теплопроводность осадочных горных пород Лено-Виллюйской нефтегазоносной провинции // Криосфера Земли, 2018, т. XXII, № 5, с. 30–38.

**Тыртиков А.П.** Влияние растительного покрова на промерзание и протаивание грунтов. М., Изд-во Моск. ун-та, 1969, 192 с.

**Угольная база России** / Под ред. В.Ф. Череповского. М., Геоинформмарк, 2004, т. VI, с. 419–453.

**Фотиев С.М.** Подземные воды и мерзлые породы Южно-Якутского угольного бассейна. М., Наука, 1965, 230 с.

**Шерстюков А.Б.** Корреляция температуры почвогрунтов с температурой воздуха и высотой снежного покрова на территории России // Криосфера Земли, 2008, т. XII, № 1, с. 79–87.

**Южная Якутия** / Под ред. В.А. Кудрявцева. М., Изд-во Моск. ун-та, 1975, 443 с.

**Gao S., He R., Jin H. et al.** Thermal recovery process of a backfilled open-pit in permafrost area at the Gulian strip coal mine in Northeast China // J. Mountain Science, 2017, vol. 14, No. 11, p. 2212–2229.

## References

- Alekseyev V.R., Filosofov G.N. Orographic air temperature inversion in Eastern Siberia and its role in formation of permafrost rocks. Teplovoi i vodnyi rezhim nekotorykh raionov Sibiri [Thermal and Water Regime of Some Siberian Regions]. Leningrad, Nauka, 1970, p. 102–107 (in Russian).
- Balobaev V.T., Volod'ko B.V., Devyatkin V.N. et al. Rukovodstvo po primeneniyu poluprovodnikovyyh termorezistorov dlya geokriologicheskikh izmereniy [Handbook on the application of semiconductor thermocouple thermistors for geocryological measurements]. Yakutsk, IMZ SO AN SSSR, 1985a, 48 p. (in Russian).
- Balobaev V.T., Devyatkin V.N., Gavriliev R.I., Rusakov V.G. On geoteplophysical studies of minerals in the North-East. Geologiya i geologorazvedka [Geology and Geological Exploration], 1985b, No. 1, p. 36–37 (in Russian).
- Balobaev V.T., Levchenko A.I. Geothermal features and permafrost conditions of Suntar-Khayat Ridge (by Nezhdaninskoye gold deposit). In: Geoteplofizicheskie issledovaniya v Sibiri [Geothermophysics Researching in Siberia]. A.V. Pavlov (Ed.). Novosibirsk, Nauka, 1978, p. 129–142 (in Russian).
- Belokrylov I.D., Efimov A.I. Mnogoletnie porody zonu zhelezorudnykh i ugolnykh mestorozhdenii Yuzhnoi Yakutii [Permafrost rocks of the zone of iron-ore and coal deposits of South Yakutia]. Moscow, Izd-vo AN SSSR, 1960, 74 p. (in Russian).
- Gavril'ev R.I. Katalog teplofizicheskikh svoystv gornyyh porod Severo-Vostoka Rossii [A Catalogue of Thermal Physical Properties of Mountain Rocks of the North-East of Russia]. M.N. Zheleznyak, V.I. Zhizhin (Eds.). Yakutsk, IMZ SO RAN, 2013, 172 p. (in Russian).
- Geokriologiya SSSR. Srednyaya Sibir' [Geocryology of the USSR. Central Siberia]. E.D. Ershov (Ed.). Moscow, Moscow University Press, 1989, 413 p. (in Russian).
- Gresov A.I., Obzhirov A.I., Yatsuk A.V. Geostructural regularities of the distributions of permafrost in gas- and coal-bearing basins in the North-East of Russia. Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2014, vol. XVIII, No. 1, p. 3–11 (in Russian).
- Zheleznyak M.N. Geotemperaturnoe pole i kriolitizona yugovostoka Sibirskoi platformy [Geotemperature field and cryolithozone of South-East Siberian platform]. Novosibirsk, Nauka, 2005, 227 p. (in Russian).
- Zheleznyak M.N., Lyubomirov A.S., Pozdnyakov I.V. Geocryological conditions of the Toka Depression. In: Proc. of the First Conference of Russian Geocryologists. Moscow, Moscow University Press, 1996, book 1, p. 522–528 (in Russian).
- Zhelinsky V.M., Korobitsyna V.N., Karimova S.S. Mezozoiskie otlozheniya i geneticheskie tipy ugolnykh plastov Yuzhnoi Yakutii [Mesozoic deposits and genetic types of coal seams of South Yakutia]. Novosibirsk, Nauka, 1976, 124 p. (in Russian).
- Zhelinsky V.M. Mezozoiskaya uglenosnaya formacia Yuzhnoj Yakutii [Mesozoic Coal Formation of Southern Yakutia]. Novosibirsk, Nauka, 1980, 120 p. (in Russian).
- Zavadskij F.R. Dinamika geokriologicheskikh i gidrologicheskikh usloviy Yuzhnoj Yakutii pod vliyaniem izmenenij klimata [Evolution of geocryological and hydrological conditions in South Yakutia under the influence of climate change]: Diss. ... kand. geol.-min. nauk. Yakutsk, 2013, 151 p. (in Russian).
- Imaev V.S., Imaeva L.P., Koz'min B.M. Sejsmotektonika Yakutii [Seismotectonics of Yakutia]. Moscow, GEOS, 2000, 227 p. (in Russian).
- Carlsaw H.S., Jaeger J.C. Conduction of Heat in Solids. New York, Oxford University Press, 1959, 510 p.
- Konstantinov P.Ya., Fedorov A.N., Machimura T., Iwahana G., Yabuki H., Iijima Y., Costard F. Use of automated recorders (data loggers) in permafrost temperature monitoring. Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2011, vol. XV, No. 1, p. 23–32 (in Russian).
- Rukovich A.V. Geological structure and coal content of Ytymdzhinskaya depression of the Gonamsky coal-bearing region of the Southern Yakutia coal basin. Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya [Advances in Modern Natural Science], 2018, No. 12, p. 200–205 (in Russian).
- Semenov V.P., Zheleznyak M.N., Kirillin A.R., Zhizhin V.I. Thermal conductivity of sedimentary rocks in the Leno-Viluy oil-and-gas bearing province. Earth's Cryosphere, 2018, vol. XXII, No. 5, p. 26–34.
- Tyrtikov A.P. Vliyanie rastitelnogo pokrova na promerzanie i protaivanie gruntov [Influence of Vegetation Cover on Freezing and Thawing of Soils]. Moscow, Moscow University Press, 1969, 192 p. (in Russian).
- Ugol'naya baza Rossii [Coal Base of Russia]. V.F. Cherepovsky (Ed.). Moscow, Geoinformmark, 2004, vol. VI, p. 419–453 (in Russian).
- Fotiev S.M. Podzemnye vody i merzlye porody Yuzhno-Yakutskogo ugol'nogo bassejna [Groundwater and Permafrost of the South Yakutia Coal Basin]. Moscow, Moscow University Press, 1965, 230 p. (in Russian).
- Sherstyukov A.B. Correlation of soil temperature with air temperature and snow cover depth in Russia. Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2008, vol. XII, No. 1, p. 79–87 (in Russian).
- Yuzhnaya Yakutiya [Southern Yakutia]. V.A. Kudryavtsev (Ed.). Moscow, Moscow University Press, 1975, 443 p. (in Russian).
- Gao S., He R., Jin H. et al. Thermal recovery process of a back-filled open-pit in permafrost area at the Gulian strip coal mine in Northeast China. J. Mountain Science, 2017, vol. 14, No. 11, p. 2212–2229.

*Поступила в редакцию 28 февраля 2021 г.,  
после доработки – 15 июня 2021 г.,  
принята к публикации 7 сентября 2021 г.*