

ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗ

УДК: 551.345

DOI: 10.15372/KZ20240302

EDN: XJQOYL

ТЕМПЕРАТУРА МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД
ВЕРХНЕКОЛЫМСКОГО НАГОРЬЯ ПО ДАННЫМ
ТЕРМОМЕТРИЧЕСКИХ СКВАЖИН ЗА 2021–2022 ГОДЫО.М. Макарьева^{1,2,*}, Д.А. Абрамов³, А.А. Землянскова^{1,2}, А.А. Осташов², Н.В. Нестерова²¹ Северо-Восточный государственный университет, лаборатория мониторинга и прогноза изменений климата и окружающей среды, 685000, Магадан, ул. Портовая, 13, Россия² Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9, Россия³ Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, 625026, Тюмень, ул. Малыгина, 86, Россия

*Автор для контакта; e-mail: omakarieva@yandex.ru

Целью исследования является первичный анализ данных о температуре многолетнемерзлых пород Верхнеколымского нагорья, полученных по данным измерений в 10 термометрических скважинах, пробуренных и оборудованных авторами в 2021–2022 гг. Скважины глубиной до 15 м расположены на высотах от 618 до 1182 м в различных ландшафтных условиях. Среднегодовая температура пород на глубине нулевых годовых амплитуд колеблется в пределах от -0.1 до -3.8 °C. Глубина сезонного оттаивания составила 0.9–2.6 м. Глубина нулевых годовых амплитуд составила 11.5 и 13 м в двух скважинах. В двух скважинах, расположенных в таликовых зонах, глубина промерзания зафиксирована на 2.6 и 3.6 м. Температурный режим пород в пределах одного района существенно различается, находясь в сложной зависимости от высоты местности, элемента рельефа, состава отложений, характера растительности и других факторов. На основе полученных данных и опыта проведения работ планируется развитие сети режимных наблюдений в Магаданской области. На части рассмотренных скважин уже проведен годовой цикл наблюдений за температурой пород, снежным покровом, температурой воздуха и осадками. Несмотря на короткие ряды наблюдений, вследствие отсутствия сведений о состоянии мерзлых пород для рассматриваемой территории публикация данных актуальна и своевременна.

Ключевые слова: многолетнемерзлые породы, слой сезонного оттаивания–промерзания, температурный режим пород, Верхнеколымское нагорье, талики.

Ссылка для цитирования: Макарьева О.М., Абрамов Д.А., Землянскова А.А., Осташов А.А., Нестерова Н.В. Температура многолетнемерзлых пород Верхнеколымского нагорья по данным термометрических скважин за 2021–2022 годы // Криосфера Земли, 2024, т. XXVIII, № 3, с. 19–32. DOI: 10.15372/KZ20240302. EDN: XJQOYL.

PERMAFROST TEMPERATURE IN THE UPPER KOLYMA HIGHLAND ACCORDING
TO THE DATA OF THERMOMETRIC BOREHOLES 2021–2022O.M. Makarieva^{1,2,*}, D.A. Abramov³, A.A. Zemlianskova^{1,2}, A.A. Ostashov², N.V. Nesterova²¹ North-Eastern State University, Portovaya St. 13, Magadan, 685000 Russia² St. Petersburg State University, St. Petersburg, 199034 Russia³ Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Centre Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Malygina St. 86, Tyumen, 625026 Russia

*Corresponding author; e-mail: omakarieva@yandex.ru

This study is aimed at a preliminary analysis of ground temperature data from ten thermometric boreholes drilled and equipped by the authors in the Upper Kolyma Highland (Magadan region) in 2021–2022. The boreholes of up to 15 m in depth are located in characteristic landscapes (rocky talus, mountainous tundra, larch woodland, river valleys) of the highland at heights from 618 to 1182 m asl. Continuous monitoring of ground temperatures with a time step of 4 h was carried out. Data on the mean annual rock temperatures, seasonal thawing/freezing depths, and the depths of zero annual amplitude were obtained. The mean annual ground temperature varied from -0.1 to -3.8 °C. The depth of seasonal thawing ranged from 0.9 to 2.6 m. The depth of zero annual amplitudes was 11.5 and 13 m in two boreholes. Two boreholes located in talik zones recorded freezing depths of 2.6 and 3.6 m. Ground temperature regimes within the same region differed significantly depending on landscape

conditions: elevation, landform, composition of the rock, character of vegetation, and other factors. Based on the data obtained, it is planned to further develop the geocryological monitoring network in the Magadan region. For some of the boreholes, a full annual cycle of observations on ground and air temperatures, precipitation, and snow cover depth is available. As information on the state of permafrost in the territory under consideration is virtually absent, publication of the obtained data of relatively short-term observations is relevant and timely.

Keywords: frozen ground, seasonal thawing/freezing layer, ground temperature regime, the Upper-Kolyma Highland, talik.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из стратегически важных регионов в зоне распространения многолетнемерзлых пород (ММП) является Магаданская область (МО), которая по добыче россыпного золота и масштабам прогнозных ресурсов коренного золота занимает первое и второе места в России соответственно [Справка..., 2021]. За последние 50 лет на Северо-Востоке России (включая Чукотский полуостров, Магаданскую область, Восточную Якутию) значительно изменились природные условия, температура воздуха повысилась в среднем на 2.2 °C, происходит трансформация гидрологического режима, по данным метеорологических станций в бассейнах рек Яны и Индигирки повысилась температура пород [Makarieva et al., 2019].

Анализ данных наблюдений за температурой ММП в термометрических скважинах, расположенных в прибрежной части МО, показал, что наблюдается тренд повышения температуры пород и увеличение мощности деятельного слоя [Рожина, Гулый, 2021]. По данным станции Сусуман (континентальная часть МО), за период 1977–2013 гг. средняя годовая температура пород на глубинах 20, 40 и 80 см также повысилась – на 0.9, 1.1 и 0.8 °C соответственно [Zemlianskova et al., 2023].

Сведения о современном состоянии ММП на Северо-Востоке страны ограничены. Отрывочные данные о термическом режиме в двух скважинах, расположенных в пределах хр. Сунтар-Хаята, приведены в работе [Sysolyatin et al., 2023b]. С 2010 по 2015 г. наблюдалась тенденция к потеплению, а после она сменилась эквивалентным похолоданием до 2019 г. В 2022 г. пробурены и оборудованы три скважины глубиной 30 м в пределах горной криолитозоны Восточной Якутии, планируется сеть скважин вдоль Колымской трассы, соединяющей Якутск и Магадан [Sysolyatin et al., 2023a].

Для оценки состояния и температурного режима ММП, а также построения прогнозов и оценки степени геоэкологических рисков главной характеристикой является температура пород. Наиболее распространенный метод для прогнозирования изменения криолитозоны – проведение режимных наблюдений в термометрических скважинах. Тем не менее для криолитозоны России сеть наблюдений за фоновой температурой пород очень разрежена [Melnikov et al., 2022], ряды данных имеют разную продолжительность, а государственная сеть геоэкологического мониторинга

находится в стадии организации [Веркулич и др., 2021].

В Магаданской области активное изучение закономерностей распространения ММП и их температуры было начато с середины 40-х гг. прошлого века. Это было связано с необходимостью проектирования и обоснования строительства промышленных и гражданских сооружений. В 1936–1939 гг. впервые изучались процессы промерзания и протаивания пород на опытных участках дороги Ягодное–Берелех. Большую работу по изучению мерзлоты и связанных с ней процессов проделал коллектив мерзлотной станции Главсевморпути, а затем Института мерзлотоведения. В 1945 г. была организована Центральная мерзлотная станция Дальстроя, занимающаяся в том числе исследованием температурного режима пород на Аркаглинской мерзлотной станции до 1953 г. и в пос. Мянунджа с 1953 г. [Гидрогеология СССР, 1972].

Всего на территории Северо-Востока России к 1972 г. насчитывалось около 74 пунктов наблюдений за ММП на глубину до 330 м (например, рудник им. Лазо, шахта 5). В горной части Магаданской области наблюдения велись в более чем 20 скважинах.

На метеорологических станциях Гидрометеорологической службы также велись наблюдения за температурой пород до глубины 3.2 м с помощью вытяжных термометров. В 1966 г. на территории Магаданской области количество станций, на которых производились наблюдения за температурой почвы на глубинах ниже 80 см, было десять [Справочник..., 1966], в настоящее время – две, в городах Магадан и Сусуман (рис. 1).

Гидрометслужбе принадлежала Колымская водно-балансовая станция (КВБС), основанная в 1948 г. На ней с 1951 г. начались наблюдения за динамикой промерзания и протаивания пород с использованием мерзлотомеров конструкции Данилина. Полученные данные были репрезентативны для значительной территории криолитозоны горного Северо-Востока [Makarieva et al., 2018].

Одним из важных этапов изучения криолитозоны в МО стало бурение ряда глубоких термометрических скважин в Ольском (5 скважин) и Ягоднинском районах (1 скважина). Главным инициатором этих исследований был выдающийся мерзлотовед Г.З. Перлштейн [Алексеева и др.,

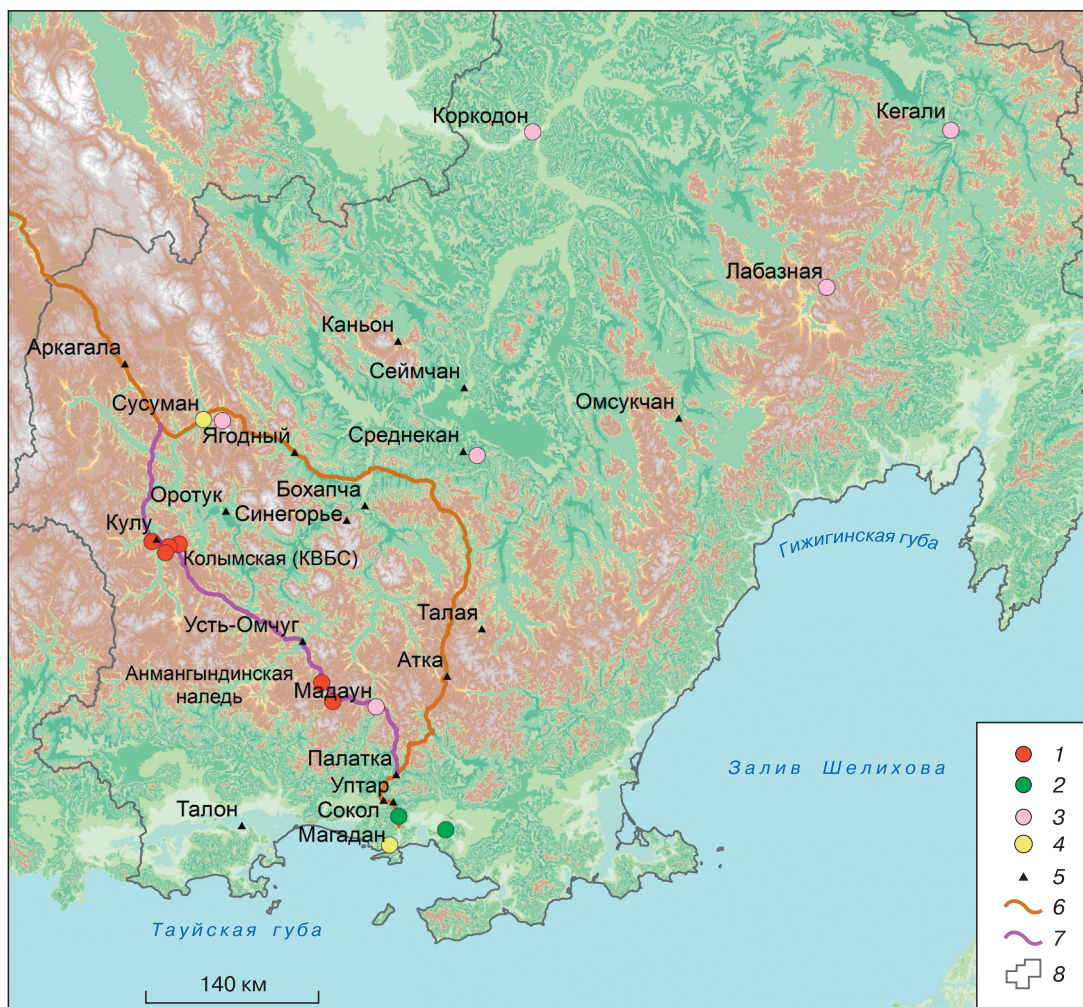


Рис. 1. Схема расположения скважин в Магаданской области.

1–5 – термометрические скважины различных организаций: 1 – скважины авторов (до 15 м), действуют с 2021 г.; 2 – ИМЗ СО РАН (до 14.5 м); 3 – Росгидромета (до 25 м), запланировано бурение до 2026 г.; 4 – действующие скважины Росгидромета (до 3.2 м); 5 – населенный пункт; 6 – трасса Колыма; 7 – Тенькинская трасса; 8 – граница Магаданской области.

2020]. Согласно данным общемировой базы данных о мерзлоте GTN-P, с 1973 по 1989 г. было пробурено шесть скважин, вскрывающих подошву многолетнемерзлых пород в регионе. В 1990 г. на территории Ольского района были пробурены еще две скважины глубиной более 200 м. С 2007 г. на них проводятся регулярные автоматические измерения температуры до глубины 14.5 м [<http://gtnpdatabase.org/boreholes>]. Данные по этим скважинам в свободном доступе отсутствуют.

После 1990-х гг. существенно сократилось финансирование научных исследований, в результате развитие сети наблюдений за ММП прекратилось.

В контексте развития экономики МО особенно важен вопрос об устойчивости существующей и проектируемой промышленной инфраструкту-

ры региона. Горнодобывающие предприятия региона расположены в его континентальной части, в зоне распространения сплошных ММП. В последние 20 лет отмечается активное увеличение площади горнодобывающих разработок в МО. По оценкам [Shikhov et al., 2023], к 2022 г. они составили не менее 726 км², а за последние 4–6 лет рост составил более 30 %. После закрытия в 1997 г. КВБС режимные наблюдения за геокриологическими условиями здесь отсутствуют. Фоновый мониторинг температуры пород в континентальной части МО (площадь около 400 000 км²) ведется на единственной метеорологической станции Сусуман (вытяжные термометры до глубины 0.8 м) (см. рис. 1).

В рамках развития государственной геокриологической сети мониторинга мерзлоты к 2025 г. в

МО планируется оборудовать до шести термометрических скважин глубиной до 25 м в пределах метеорологических станций, расположенных в населенных пунктах. Окончательное число скважин будет определено после проведения полевого обследования станций и признания их пригодными для установки оборудования. С учетом разнообразия природных условий такое количество пунктов мониторинга состояния ММП является недостаточным.

Целью исследования является анализ данных о распределении температуры ММП в различных ландшафтах Верхнеколымского нагорья в современных климатических условиях, полученных по материалам режимных наблюдений ММП в 10 термометрических скважинах глубиной от 5 до 15 м, пробуренных и оборудованных авторами в 2021–2022 гг. (см. рис. 1). Несмотря на короткие ряды анализируемых данных, в связи с практическим отсутствием современных сведений о состоянии ММП для рассматриваемой территории, считаем публикацию их актуальной и своевременной.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Территория исследования

Девять из десяти термометрических скважин (скв.) расположены в пределах Тенькинского муниципального округа МО: одна из них в долине р. Бускэчен (приток р. Бохапча, правый приток р. Колымы), четыре – в бассейне р. Анмангында (приток р. Детрин, правый приток р. Колымы), четыре – в бассейне р. Кулу. Еще одна скважина пробурена на границе Магаданской области и Республики Саха (Якутия) в районе метеорологической станции Делянкир (бассейн р. Индигирка).

В физико-географическом отношении Тенькинский район располагается в пределах Верхнеколымского нагорья на западе МО. Площадь района составляет 35,6 тыс. км². Рельеф горный, расчлененный многочисленными водотоками, характеризуется большими перепадами абсолютных высот – до сотен метров.

Территория исследования относится к Яно-Колымской складчатой области и сложена преимущественно глинистыми сланцами конца палеозоя–мезозоя [Афанасьев, 1968].

Климат района резкоконтинентальный, муссонный. Среднегодовая температура воздуха в районе исследований колеблется в пределах –8...–11 °С, количество осадков 300–400 мм. Район относится к инверсионному типу геофизиологической поясности с потолком инверсии 1100–1300 м. Средние месячные значения температуры воздуха отрицательны с октября по апрель включительно. В холодный период года выпадает около 30–40 % осадков. Снежный покров формируется к середине октября и разрушается в конце мая.

В последние 40 лет в регионе происходит выраженное изменение климата. Данные метеорологической станции (м/с) Усть-Омчуг показывают, что с периода 1981–2000 гг. среднегодовая температура воздуха повысилась на 0,9 °С (табл. 1). Наибольший рост температуры характерен для апреля–мая и октября–ноября. Среднеголетняя сумма осадков за 2001–2021 гг. больше предыдущего 20-летия (1981–2000 гг.) на 42 мм (или 13 %). В период установления снежного покрова (сентябрь–март), а также его разрушения (апрель–июнь) увеличилась средняя толщина снежного покрова – на 1–10 см, среднегодовое значение стало больше на 7 см.

Район относится к северной геофизиологической зоне со сплошным (90–95 % и более) распространением ММП. Мощность ММП составляет 50–200 м, в горных районах увеличиваясь до 150–400 м. В районе исследования распространены надмерзлотные воды сезонноталого слоя и гидрогенных несквозных таликов. Гидрогенные талики формируются в долинах средних водотоков и являются подрусловыми, реже – пойменными. Подмерзлотные воды приурочены к сквозным гидрогеоленным таликам, расположенным в зонах тектонической раздробленности пород, по которым происходит фильтрация вод под большим криогенным напором. Признаком, позволяющим выявить места их разгрузки, является наледообразование [Замолотчикова, Зуев, 1989].

Метеорологические условия периода наблюдений

На распределение температуры в верхнем горизонте горных пород непосредственно влияют конкретные погодные условия прошедшего года. Для анализа данных скважин бассейна р. Анмангында и скважины “Бускэчен” использовалась информация м/с Усть-Омчуг, для остальных – данные метеостанций Колымская и Делянкир.

С 01.10.2021 по 30.09.2022 г. среднегодовая температура воздуха, по данным м/с Усть-Омчуг, составила –8,3 °С, годовая сумма осадков 366 мм. Температура за гидрологический год оказалась на 0,9 °С выше среднего за последние 20 лет, наибольшее отклонение значений температуры воздуха пришлось на летний период, в июле 2022 г. – на 3,7 °С. В целом количество осадков за год было близко к норме, однако их величина в отдельные месяцы значительно отличалась от нее. Так, в октябре–декабре 2021 г. количество твердых осадков составило 105 мм при норме 64 мм (2001–2021 гг.). Июль 2022 г. был сухим (20 мм, при норме 56 мм в 2001–2021 гг.). По данным м/с Усть-Омчуг, средняя высота снежного покрова в апреле 2022 г. составила 26 см, максимальная (30 см) наблюдалась в январе. По данным снеговой подушки, установленной в районе сква-

Таблица 1. Климатическая характеристика района исследований

Станция	Абс. высота, м	Характеристика	Период	Месяцы												Год
				I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Усть-Омчуг	576	T	1981–2000	–33.7	–29.3	–22.2	–9.5	3.0	12.3	14.4	10.8	3.5	–9.7	–25.3	–35.8	–10.1
			2001–2021	–33.3	–30.2	–20.9	–9.1	3.9	11.9	15.2	11.9	4.2	–9.3	–22.9	–32.3	–9.2
		P	1981–2000	14	11	7	12	19	43	64	63	41	31	18	10	334
КВБС	850		2001–2021**	13	11	12	11	26	53	56	83	47	26	22	16	376
		H	1945–1980*	22	26	26	22	3	0	0	0	1	6	13	18	22
			2000–2022**	29	31	33	29	6	0	0	0	2	10	23	27	29
Кулу	650	T	1981–2000	–33.9	–29.7	–22.9	–10.9	1.7	11.6	13.7	9.7	1.6	–11.9	–26.5	–36.4	–11.1
			2001–2021	–34.9	–31.2	–21.2	–9.9	3.1	11.1	14.5	10.9	2.9	–11.2	–25.3	–34.1	–10.4
		P	1981–2000	13	12	10	11	21	54	74	77	44	26	23	15	380
Десянكير	801		2001–2021**	14	12	12	11	27	49	69	84	45	24	27	17	399
		H	2007–2022**	54	61	61	63	52	0	0	0	11	26	42	49	47
		T	1942–1980*	–37.0	–31.9	–23.4	–11.0	2.1	11.3	14.2	11.4	3.4	–12.7	–29.3	–36.5	–11.7
Кулу	650		1981–2006	–37.6	–32.1	–22.7	–10.1	3.0	12.3	14.9	10.8	3.1	–11.7	–27.9	–39.4	–11.6
		P	1942–1980*	15	13	7	9	20	47	65	51	37	22	19	20	325
			1981–2006	13	11	8	10	20	46	71	65	32	30	21	11	338
Десянكير	801		1942–1980*	36	42	42	42	12	0	0	0	2	9	20	29	26
		T	1981–2000	–44.8	–40.4	–31.7	–14.7	1.1	11.7	13.4	8.9	0.7	–16.9	–35.9	–46.9	–16.3
			2001–2021**	–45.0	–41.4	–29.0	–13.4	2.9	11.6	14.4	10.2	1.7	–15.0	–32.7	–44.2	–15.0
Десянكير	801	P	1981–2000	9	8	4	6	19	35	63	48	25	17	15	8	256
			2001–2021**	7	6	6	7	16	38	59	51	30	17	15	10	262
		H	2012–2021**	34	40	40	37	21	0	0	1	4	12	23	32	34

Примечание. T – среднегодовая температура воздуха, °C; P – среднее годовое количество осадков, мм; H – средняя месячная высота снежного покрова по постоянной рейке, см. Данные приведены по материалам метеорологических ежемесячников [Метеорологический ежемесячник, 1981–2006].

Другие источники: * [Научно-прикладной справочник..., 1990]; ** [http://www.pogodaiklimat.ru].

Таблица 2. Характеристики оборудованных скважин и результаты наблюдений за температурой пород и снежным покровом за период 2021–2022 гг.

Скважина	Глубина, м	Широта	Высота, м	Элемент рельефа	Тип местности или ландшафта	Растительные ассоциации	Состав отложений	Снежный покров, 2022 г.				$T_{\text{ср}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\xi}, ^\circ\text{C}$	$\xi, \text{ м}$	$H_0, \text{ м}$	Начало – окончание (указан месяц)			Период наблюдений*
								6–10 октября		21 декабря						оттаивания	промерзания		
								$H, \text{ см}$	$\rho, \text{ г/см}^3$	$H, \text{ см}$	$\rho, \text{ г/см}^3$								
Голыцы	15	61°50'	1182	Плоский водораздел	Горно-привершинный	Тундра горная каменистая с лишайно-лишайниковой с редкими кедрами	Глыбы, дресва (2 м), подстилаемые гранодиоритами	43	0.25	Н/д	Н/д	Н/д	Н/д	Н/д	Н/д	IX	IX	01.08.2022–01.05.2023; 01.10.2023–настоящее время	
Перевал Кулу	15	61°45'	1170	Плоский водораздел	Плоско-горно-привершинный	Тундра горная лишайниковая с редкими кедрами и лишайниками	Дресва (3 м), подстилая песчаную алевритовыми сланцами	33	0.20	Н/д	Н/д	Н/д	Н/д	Н/д	Н/д	IX	IX	01.08.2022–настоящее время	
Сопка	15	60°50'	1027	Плоский водораздел	Плоско-горно-привершинный	Лиственничное редколесье с лишайниковым и моховым покровом	Дресва (3 м), подстилая глинистыми сланцами	30	0.17	70	0.27	Н/д	Н/д	13	VI	IX	IX	01.10.2021–01.09.2022; 01.11.2022–настоящее время	
Бускзчен	15	60°40'	978	Надпойменная терраса р. Бускзчен	Горно-долинный	Лиственничное редколесье с лишайниковым и моховым покровом	Галечник с песчаным и супесчаным заполнителем (15 м)	26	0.15	Н/д	Н/д	Н/д	Н/д	Н/д	VI	IX	IX	Н/д	01.09.2022–01.06.2023; 01.09.2023–настоящее время
Верхний	14	61°50'	961	Надпойменная терраса	Горно-долинный	Лиственничное редколесье с отделимыми зарослями кедрового стланника с лишайниковым покровом	Песок с прослоями супеси (7 м), подстилая трещиноватыми гранодиоритами	41	0.18	Н/д	Н/д	Н/д	Н/д	Н/д	Н/д	IX	IX	X	01.08.2022–01.05.2023
Солонцовый	5	60°50'	803	Надпойменная терраса	Горно-долинный	Лиственничный лес с ерниками, дерном и островным моховым покровом	Супесь с включениями щебня (5 м)	19	0.12	Н/д	Н/д	Н/д	Н/д	Н/д	V	VIII	X	5	01.10.2021–01.02.2022; 01.06.2023–настоящее время
Делянкир	15	63°50'	801	Надпойменная терраса	Горно-долинный	Лиственничное редколесье с ивняками и лишайниково-моховым покровом	Галечник с супесчаным заполнителем (15 м)	Н/д	Н/д	Н/д	Н/д	Н/д	Н/д	Н/д	Н/д	IX	IX	X	01.10.2021–10.03.2022

Поселок Кулу	15	61°50'	618	Надпойменная терраса р. Кулу	Горно-долинный террасовый	Кустарнички голубики и ерники с моховым покровом	Галечник с песчаным заполнителем (15 м)	6	0.15	44	0.19	-0.1	Н/д	3.6	-	V	VIII	X	-	01.10.2021 – настоящее время
ПГП2	15	60°50'	712	Надпойменная терраса р. Анмангында	Горно-долинный террасовый	Лиственничные редины на лившиново-сфагновой мари с ерниками морозово-багульничково-осоковыми	Сутлинок с включениями гальки и щебня (15 м)	13	0.13	55	0.11	-1.8	-2.1	0.9	11.5	V	IX	X	X	01.10.2021 – настоящее время
Наледь	13	60°50'	744	Пойма	Горно-долинный террасовый	Кустарнички голубики и ерники с моховым покровом	Галечник с песчаным заполнителем (15 м)	6	0.15	44	0.19	-0.1	Н/д	3.6	-	V	VIII	X	-	01.10.2021 – настоящее время

Примечание. H – высота снежного покрова, см; ρ – плотность снежного покрова, г/см³. Н/д – данные не доступны.

* Информация о наличии данных по состоянию на январь 2024 г.

** Температура по единовременному замеру на глубине 15 м.

жин бассейна р. Анмангында (30 км от пос. Усть-Омчуг), максимальный запас воды в снежном покрове 24 марта 2022 г. составил 90 мм, а его наибольшая толщина, по данным снегомерной рейки, установленной рядом, была 58 см. Высота снежного покрова в горах в среднем оказалась на 20–30 см больше высоты в долинах, в отдельных местах до 1 м (табл. 2).

По данным м/с Колымская (КВБС), средняя температура воздуха за период 01.10.2021–30.09.2022 составила –9.2 °С, сумма осадков 410 мм, а максимальная высота снежного покрова 69 см.

Анализ данных м/с Делянكير показал, что за тот же период средняя температура воздуха была –14.5 °С, сумма осадков 240 мм, а максимальная высота снежного покрова 58 см, что на 11 см меньше, чем на станции Колымская.

Бурение и оборудование скважин

Бурение скважин проводилось в два этапа.

В конце августа 2021 г. были пробурены пять скважин глубиной от 5 до 15 м (табл. 2, рис. 2), четыре из них в бассейне р. Анмангында (Тенькинский городской округ МО) и одна скважина на границе Магаданской области и Республики Саха (Якутия) в непосредственной близости от метеорологической станции Делянكير. Бурение проводилось ударным способом с продувкой на установке УРБ 2А2М.

Второй этап бурения еще пяти скважин глубиной 15 м проведен в июле 2022 г. с отбором и описанием керна. Все скважины обсажены пластиковой трубой с внешним диаметром 32 мм, с внешней стороны засыпаны грунтом, а сверху изолированы от проникновения атмосферного воздуха и воды.

Для круглогодичного мониторинга температуры пород используется оборудование производства компании “Импеданс” (г. Москва) с автоматической записью данных каждые 4 часа. Рабочий диапазон температур составляет от –55 до +125 °С. Точность измерений составляет 0.1 °С в диапазоне от –3 до +3 °С; 0.2 °С в диапазонах от –10 до –3 °С и от +3 до +10 °С; 0.3 °С в диапазонах от –40 до –10 °С и от +10 до +85 °С.

Термометрическая коса оснащена 15 и 38 датчиками для скважин глубиной 5 и 15 м соответственно. Стандартная схема расположения датчиков выглядит следующим образом: от поверхности земли до глубины 0.5 м датчики расположены через 0.1 м, в интервале от 0.5 до 1.5 м – через 0.25 м, от 1.5 до 5 (15) м – через 0.5 м, дополнительный датчик установлен на глубине 4.75 (14.75) м. Скважина “Наледь” (глубина 13.1 м) находится в пределах наледной поляны р. Анмангында, на участке, где толщина льда может достигать 2 м, поэтому оголовок был сделан высотой 2.66 м. Из-за того, что длина термометрической косы составляет 16 м, на скважине “Наледь” для измерения температуры пород было задействовано только 28 из 38 датчиков, начиная с глубины 0.1 м.

Ландшафтные условия

В 2021–2022 гг. на стационаре Контактный (КВБС, 22.1 км²) и в бассейне р. Анмангында (376.0 км²) сотрудниками ИМЗ СО РАН совместно с авторами статьи на

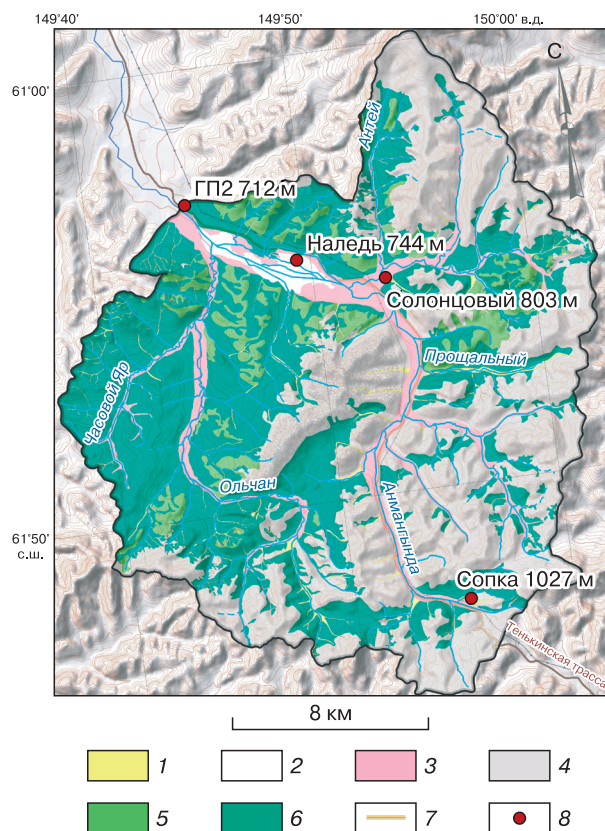


Рис. 2. Местоположение скважин на карте типов местности в бассейне р. Анмангында.

1–6 – типы местности: 1 – горно-долинный террасовый; 2 – наледь; 3 – горно-долинный; 4 – горно-привершинный; 5 – плоскогорно-привершинный; 6 – горно-склоновый; 7 – Тенькинская трасса; 8 – скважины, оборудованные в бассейне р. Анмангында.

основе дешифрирования космических снимков и полевых маршрутных съемок было проведено исследование и картирование мерзлотных ландшафтов. В качестве основных единиц были выбраны типы местности и типы растительности, относящиеся к типологическим комплексам, т. е. единицам ландшафтного (физико-географического) картографирования [Мильков, 1970]. Ведущими факторами в формировании типа местности являются рельеф и литологические особенности материнских пород, проявляющиеся на определенном, достаточно широком климатическом фоне [Васильев, 2022, 2023]. В настоящем исследовании для описания ландшафтных условий, в которых оборудованы скважины, используется терминология, принятая якутской школой мерзлотоведения и приведенная в работах [Васильев, 2022, 2023]. Современные работы подтвердили выводы предыдущих исследователей [Толстухин, 1974; Насыбулин, 1976] о том, что условия бассейна р. Анмангында

и Колымской водно-балансовой станции сходны и репрезентативны для горной территории Северо-Востока страны.

В бассейне р. Анмангында выделены горно-долинный террасовый, горно-долинный, горно-склоновый, горно-привершинный и плоскогорно-привершинный типы местности (см. рис. 2, табл. 2) [Васильев, 2023]. К растительным ассоциациям относятся лишайники, лиственничные редколесья, заросли кедрового стланика, чозениевые и тополевые леса, ивняк, разнотравье и др. Также выделен участок формирования гигантской наледи в долине р. Анмангында. На эту карту (см. рис. 2) нанесено местоположение четырех скважин, пробуренных в 2021 г.

Все скважины (кроме скв. “Делянки”) расположены вдоль Тенькинской трассы МО, расстояние по Тенькинской трассе между крайними скважинами составляет почти 250 км, их характеристики представлены в табл. 2 и на рис. 2.

Скважина “Тольцы” расположена в гольцовом поясе на высоте 1182 м в бассейне руч. Правый Итрикан (правый приток р. Кулу), в 25 м от бровки крутого (40–50°) склона высотой 20–30 м на поверхности с уклоном 3–4°, западной ориентации. Тип местности – горно-привершинный, представляющий собой тундру горную каменистую кассиопейно-лишайниковую с редкими кедровыми стланиками (рис. 3, а). Верхняя часть разреза (2 м) представляет собой крупнообломочный десертционный материал, сложенный глыбами гранодиоритов до глубины 15 м. В начале лета в данной местности образуется гольцовый лед [Банцкина, 2002].

Скважина “Перевал Кулу” (см. рис. 3, б) расположена на Кулинском перевале вблизи Тенькинской трассы (1170 м). Скважина “Сопка” (см. рис. 3, в) расположена в верховьях бассейна р. Анмангында (1027 м). Скважины находятся в лиственничном редколесье. Поверхность представлена лишайниками мощностью до 5 см. В геологическом отношении верхние три метра разреза представлены дресвой глинистых сланцев элювиально-делювиального генезиса.

Скважина “Бускэчен” (978 м) расположена в пределах надпойменной террасы р. Бускэчен в 30 м к западу от Тенькинской трассы, в 200 м от границы поймы реки. Растительность представлена лиственничным редколесьем, напочвенный покров – сфагнумом и лишайниками мощностью до 10–20 и 5 см соответственно (см. рис. 3, г). Горные породы представляют собой аллювий р. Бускэчен, состоящий из крупной окатанной гальки с песчаным и супесчаным заполнителем. В 325 м от скважины образуется наледь.

Скважина “Верхний” (961 м) расположена в долине ручья, притока р. Правый Итрикан, в 15 м

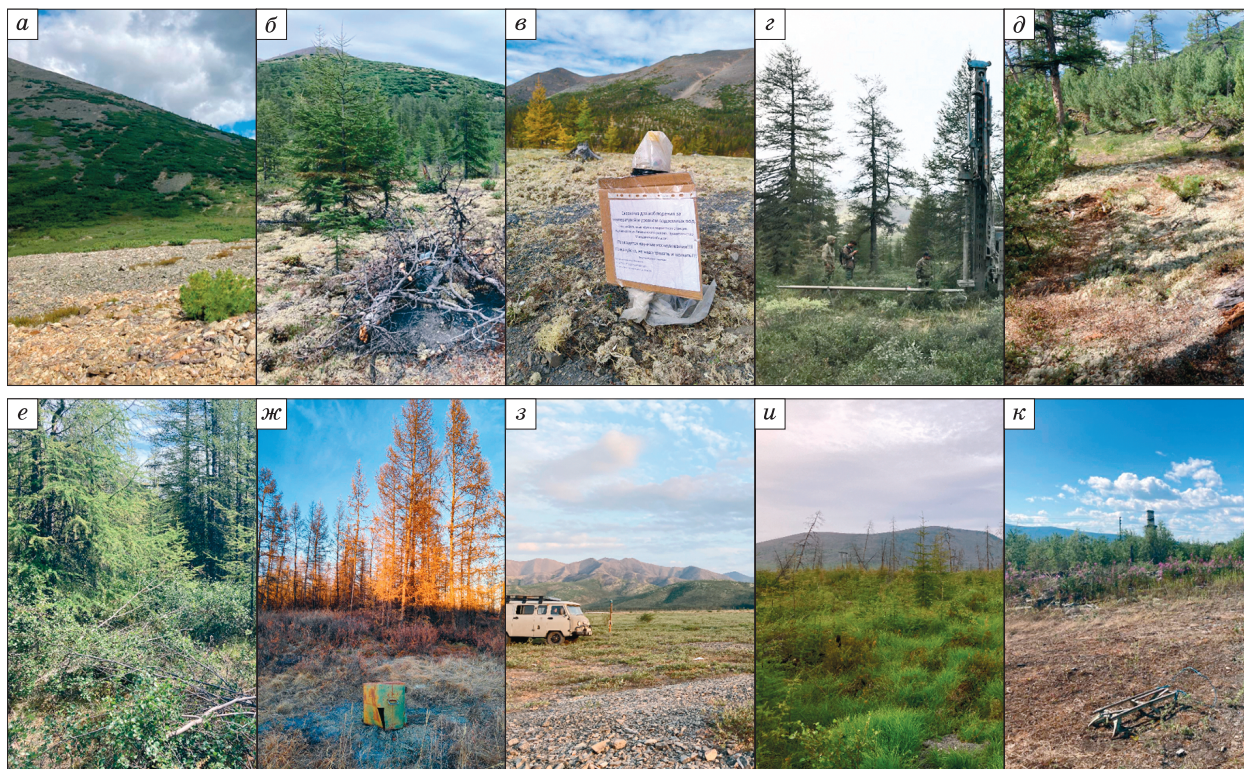


Рис. 3. Общий вид скважин:

а – Гольцы; б – Перевал Кулу; в – Сопка; г – Бускэчен; д – Верхний; е – Солонцовый; ж – Делянكير; з – Наледь; и – ГП2; к – Поселок Кулу.

от правого берега русла. Тип местности горно-долинный, растительная ассоциация – лиственничное редколесье с кедровым стлаником, лишайниковый напочвенный покров мощностью до 5 см (см. рис. 3, д). Верхняя часть разреза – песок с прослоями супеси и включениями гравия.

Скважина “Солонцовый” (803 м) расположена в 50 м к югу от русла руч. Солонцовый (правый приток р. Анмангында) в лиственничном лесу. Напочвенный покров представлен дерном со спорадическим распространением сфагнома мощностью до 20 см (см. рис. 3, е). Породы разреза представлены песком с прослоями супеси и суглинка водно-ледникового происхождения.

Скважина “Делянكير” (801 м, см. рис. 3, ж) расположена на первой надпойменной террасе р. Делянكير на границе Магаданской области и Республики Саха (Якутия) за пределами Верхнеколымского нагорья и отличается более северным расположением, относится к горно-долинному типу местности.

Скважина “Наледь” (744 м) расположена на наледной поляне, в 500 м от одной из основных проток р. Анмангында. Растительность представлена редкими кустарниками голубики и карлико-

вой ивы, а также зеленомошным покровом спорадического распространения (см. рис. 3, з). Мощность аллювия, представленного гравийно-галечниковыми отложениями с песчано-суглинистым заполнителем, по данным геофизических исследований, может достигать 12 м [Оленченко и др., 2023].

Скважина ГП2 (712 м) расположена на верхнеплейстоценовой надпойменной террасе р. Анмангында [Афанасьев, 1968], сложенной суглинком с включениями мелкой слабоокатанной гальки, мощность слоя 6–10 м, подстилаемым песчано-глинистыми сланцами. Растительность представляет собой угнетенное лиственничное редколесье с подростом из карликовой березы, кедрового стланика, злаковой растительностью с голубикой, сфагнумом (мощность до 15 см) и лишайниками (см. рис. 3, и).

Скважина “Поселок Кулу” (618 м) пробурена в пределах закрытого поселка Кулу и расположена на надпойменной террасе правого берега р. Кулу на расстоянии 720 м и в 30 м от остова дома. Поверхность практически лишена растительности (см. рис. 3, к), а верхняя часть разреза представлена супесью с включениями щебня и дресвы.

РЕЗУЛЬТАТЫ РЕЖИМНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

К настоящему моменту получены ряды данных о температуре пород за гидрологический год (01.10.2021–30.09.2022) по четырем из десяти скважин, а также распределение температуры пород по глубине к окончанию летнего сезона 2022 г. на пяти “новых” скважинах. За неполный год получены данные по скв. “Делянкир” (период 01.10.2021–15.03.2022).

Данные позволяют оценить характеристики ММП территории исследования, такие как среднегодовая температура пород (T_{cp}), глубина сезонного оттаивания и промерзания (ξ) и скорость сезонного оттаивания–промерзания, глубина нулевых годовых амплитуд H_0 (см. табл. 2).

Критерием для оценки глубины нулевых годовых амплитуд H_0 является неизменность среднемесячной температуры, определяемая интерполяцией значений, полученных датчиками с погрешностью от ± 0.1 до ± 0.2 м при температуре ниже -3.0 °С. Глубина сезонного оттаивания ξ определяется по наиболее низкому положению подошвы слоя с положительными температурами. Аналогично глубина сезонного промерзания ξ фиксируется по подошве слоя с отрицательными температурами в конце периода промерзания. Среднегодовая температура пород T_{cp} – температура пород на глубине нулевых годовых амплитуд H_0 либо температура на глубине 15 м в случае недостаточности данных для ряда скважин, T_{ξ} – среднегодовая температура пород на глубине подошвы сезонноталого слоя. В табл. 2 также представлены данные о характеристиках снежного покрова в октябре и декабре 2022 г., они позволяют предварительно оценить различия процессов снегонакопления для разных скважин.

Следует отметить, что все скважины оборудованы на абсолютных отметках ниже потолка инверсии среднегодовой температуры воздуха в данном районе, поэтому выявить высотную геофизиологическую поясность по полученным данным не представляется возможным.

Температура горных пород

Наиболее суровые геофизиологические условия наблюдаются в скважинах, расположенных в горно-привершинном и плоскогорно-привершинном типах местности на высоте более 1000 м (скв. “Гольцы”, “Перевал Кулу”, “Сопка”). Они отличаются низкой среднегодовой температурой пород (-3.8 , -2.4 , -3.2 °С соответственно), а также в сравнении с “долинными” скважинами – режимом снегонакопления. Снегонакопление в верховьях начинается раньше, снежный покров сходит позже, а его высота в среднем больше на 20 см по сравнению с местоположением скважин, расположенных в долинах. За счет метелевого переноса в

горах плотность снега может быть значительно (до 2 раз) больше, чем на участках, расположенных на более низких абсолютных высотах. Например, в декабре 2022 г. на скв. “Сопка” плотность снега была 0.27 г/см³ при высоте 70 см, тогда как на скв. ГП2 составила 0.11 г/см³ (высота снега 55 см) (см. табл. 2).

Скважины, расположенные в горно-долинном и горно-долинном террасовом типах местности на более низких абсолютных высотах и характеризующиеся наличием густой растительности, отличаются более высокой температурой пород.

Две из этих скважин расположены в таликах (скв. “Наледь” и “Солонцовый”). В скв. “Наледь” подрусловой талик мощностью 8.5 м обусловлен отепляющим влиянием поверхностных и подземных вод [Оленченко и др., 2023], тогда как образование талика в скв. “Солонцовый” на данном этапе объяснить трудно, учитывая малую глубину (5 м) скважины и недостаток метеорологических данных. Режим снегонакопления на скв. “Солонцовый” отличается от условий вблизи скважин ГП2 и “Наледь”. За счет естественной преграды в виде лиственничного леса снег не выдувается, его высота может достигать значений “горной” скважины “Сопка”. Также из-за затененности участка деревьями снежный покров разрушается на 10–15 сут позже, чем вблизи скважин ГП2 и “Наледь”. Предполагается, что наличие талика на скв. “Солонцовый” обусловлено фильтрацией грунтовых вод в отложениях водно-ледниковой террасы, занимающей всю долину ручья. С.А. Замолотчикова и И.А. Зуев [1989] называют это таликами предгорий. В работе [Sysolyatin et al., 2023b] представлены термометрические данные о подобном режиме талика в речной долине хр. Сунтар-Хаята с аналогичными ландшафтными условиями (густой лес).

В скважинах ГП2 (рис. 4, б) и “Поселок Кулу”, которые расположены на древних террасах рек с суглинистыми отложениями, среднегодовая температура пород составляет -1.8 и -2.5 °С соответственно, тогда как температура в более молодых отложениях, преимущественно галечниках с песчаным и супесчаным заполнителем, значительно выше и равна -0.6 °С (скважины “Верхний” и “Бускэчен”).

В скважинах ГП2 и “Сопка” наблюдаются противоположные по знаку градиенты в прикровельной части многолетнемерзлой толщи, однако только при дальнейших наблюдениях можно выявить характер изменений. В 2021–2022 гг. на скв. “Сопка” (см. рис. 4, а) градиент положительный, а на скв. ГП2 – отрицательный (см. табл. 2).

Скважина “Делянкир” расположена в Оймяконском нагорье на 2 – 3° широты севернее остальных скважин. Близость Полюса холода обуславливает значительно более низкую температуру пород -6.9 °С (см. рис. 4, д).

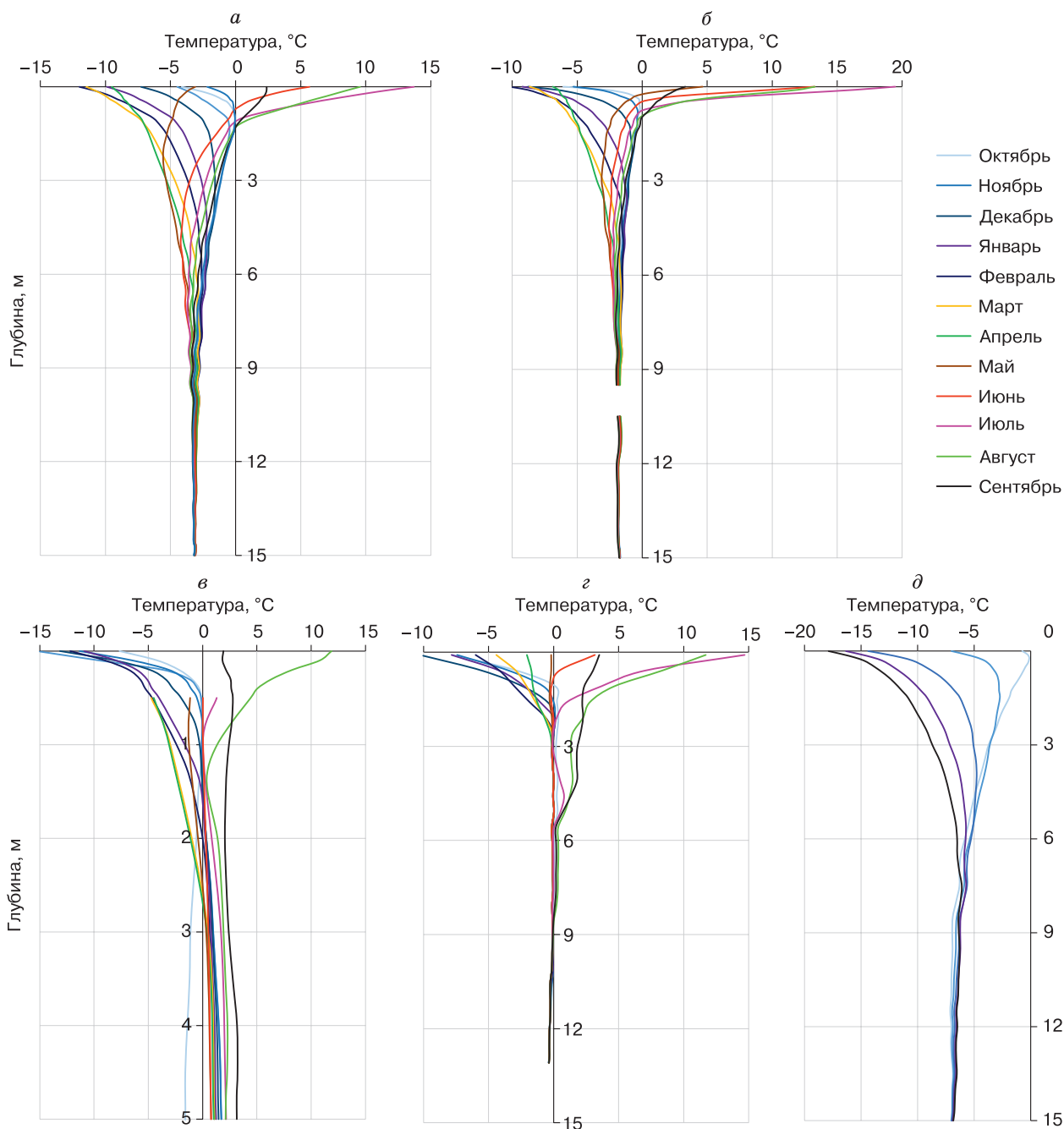


Рис. 4. Графики изменения температуры пород в скважинах “Сопка” (а), ГП2 (б), “Солонцовый” (в) и “Наледь” (г) за период 01.10.2021–30.09.2022, в скважине “Делянкир” (д) за 01.10.2021–28.02.2022.

Сезонное оттаивание и промерзание горных пород

Наименьшая глубина сезонного оттаивания пород наблюдается на слабодренированной поверхности скв. ГП2, где мощность сезонноталого слоя сокращается до 0.9 м благодаря заболоченности и высокой влажности пород.

В скв. “Поселок Кулу” вследствие практического отсутствия напочвенного покрова породы оттаивают на глубину 1.7 м. В скважинах “Бускэчен” и “Верхний” величина сезонного оттаивания 1.6 и 2.6 м соответственно связана с различиями в режиме снегонакопления. На скв. “Верхний” мощность снега в 1.5 раза больше, чем на скв. “Бускэчен”, а также к началу зимнего периода из-за мень-

шего содержания глинистых фракций в верховьях ручья, которые плохо фильтруют воду, породы быстро осушаются, из-за чего их влажность практически нулевая. Исследователи их называют сущеницами [Глотова, Готов, 2012].

Породы в скважинах “Гольцы”, “Перевал Кулу” и “Сопка” из-за хорошо фильтрующих крупнообломочных маловлажных отложений отличаются большой глубиной оттаивания (1.9, 1.3 и 1.3 м соответственно) и более поздним его началом, приходящимся на первую половину июня и обусловленным значительной высотой снежного покрова, тогда как в долинах оттаивание начинается уже во второй половине мая. Важную роль в сезонном оттаивании здесь играет инфильтрация летних осадков, способствующих переносу тепла. Породы в этих скважинах промерзают раньше других, что связано с нормальным высотным изменением температуры воздуха в сентябре и, следовательно, температуры пород. Промерзание происходит почти мгновенно с переходом температуры воздуха к отрицательным среднесуточным значениям, так как верхняя часть разреза представлена крупнообломочными породами, которые подвержены плотностной конвекции воздуха до заполнения пор снежным покровом.

На скважине “Наледь” промерзание начинается в октябре с поверхности земли и заканчивается в ноябре на глубине 3.6 м (см. рис. 4, з). Высокая температура мерзлоты (-0.4°C на глубине 13 м) формируется под обогревающим влиянием грунтовых вод [Оленченко и др., 2023].

В скважине “Солонцовый” фронт промерзания формируется с поверхности земли в октябре, сезонномерзлый слой максимальной мощности достигает в мае (ξ до 2.6 м), после чего протаивает до августа (см. рис. 4, в).

ВЫВОДЫ

В результате оборудования девяти термометрических скважин в характерных типах местности Верхнеколымского нагорья и одной скважины в районе м/с Делянكير (Оймяконское нагорье), в диапазоне высот от 618 до 1182 м, получены новые данные о среднегодовой температуре пород, глубине сезонного оттаивания–промерзания, а также глубине нулевых годовых амплитуд.

Результаты исследования соответствуют представлениям о регионе, описанным в [Замолотчикова, Зуев, 1989]. Температура пород, как указано в монографии, изменяется в основном от $+1$ до -4°C ниже верхнего пояса гор. В 2021–2022 гг. среднегодовая температура пород в различных типах местности составила от $+1.5$ до -3.8°C , глубина сезонного оттаивания – от 0.9 до 2.6 м, глубина сезонного промерзания в подрусловом талике и талике предгорья достигла 2.6 м. Вы-

явлены противоположные градиенты в прикровлевой части многолетнемерзлой толщи.

Температурный режим пород в пределах одного района существенно различается в разных типах местности. Это доказывает необходимость натурных наблюдений для региона, практически не обеспеченного такими данными. Дальнейшие режимные наблюдения за температурой пород и комплексом метеорологических характеристик, развитие сети мониторинга позволят более детально связать температурный режим пород с микро- и макроклиматом, а также выявить возможные тренды изменения геоэкологических условий региона в целом.

Благодарности. Авторы искренне благодарят главу Тенькинского муниципального округа Магаданской области Дениса Анатольевича Ревутского за помощь в проведении исследований и обеспечении работы научной группы на территории округа.

Оборудование и поддержание термометрических скважин в рабочем состоянии, а также ландшафтные исследования выполнены при поддержке Санкт-Петербургского государственного университета в рамках проекта “Комплексная оценка естественных и антропогенных факторов интенсификации водообменных процессов криолитозоны в условиях изменения климата”, анализ термометрических данных проведен в рамках проекта РНФ и правительства Магаданской области № 23-17-20011 “Оценка рисков опасных явлений для инфраструктуры Магаданской области, вызванных климатически и антропогенно обусловленной трансформацией многолетнемерзлых пород”.

Литература

- Алексеева О.И., Гулый С.А., Шепелев В.В. и др. Георгий Захарович Перлыштейн (05.10.1937–26.08.2020) // Криосфера Земли, 2020, т. XXIV, № 6, с. 57–58.
- Афанасьев В.И. Геологическая карта СССР масштаба 1:200 000 (первое поколение). Сер. Верхне-Колымская. Лист Р-55-XXX. Объяснит. записка. М., Недра, 1968, 65 с.
- Банцкина Т.В. Температурный режим и динамика льдистости крупнообломочных склоновых отложений без заполнителя в весенне-летнее время (на примере руч. Контактный) // Колыма, 2002, № 4, с. 9–13.
- Васильев А.И. Современное состояние ландшафтов Колымской водно-балансовой станции // Материалы Шестой конф. геоэкологов России “Мониторинг в криолитозоне” (Москва, 14–17 июня 2022 г.). М., КДУ, Добросвет, 2022, с. 151–156.
- Васильев А.И. Современное состояние ландшафтов водосборного бассейна реки Анмангында // Устойчивость природных и технических систем криолитозоны в условиях изменения климата: к 150-летию М.И. Сумгина: Материалы конф. (Якутск, 22–24 марта 2023 г.). Якутск, ИМЗ СО РАН, 2023, с. 182–186.
- Веркулич С.Р., Демидов Н.Э., Анисимов М.А. Разработка проекта организации мониторинга многолетнемерзлых

грунтов высокоширотной Арктики на базе наблюдательной сети Росгидромета // Рос. полярные исслед., 2021, т. 43, № 1, с. 23–27.

Гидрогеология СССР. Т. 26. Северо-Восток СССР / Под ред. О.Н. Толстихина. М., Недра, 1972, 297 с.

Глотова Л.П., Глов В.Е. Роль подземных вод в общем стоке малых горных рек бассейна реки Колымы // Изв. Самар. науч. центра РАН, 2012, т. 14, № 1 (9), с. 2321–2324.

Замолотчикова С.А., Зуев И.А. Юкагино-Анюйский и Колымский регионы // Геокриология СССР. Восточная Сибирь и Дальний Восток. М., Недра, 1989, с. 293–309.

Метеорологический ежемесячник. Вып. 24. Якутск, Якут. упр-ние гидрометеорол. службы. Гидрометцентр, 1981–2000, 990 с.

Метеорологический ежемесячник. Вып. 33. Магадан, Колым. упр-ние гидрометеорол. службы. Гидрометцентр, 1981–2006, 936 с.

Мильков Ф.Н. Ландшафтная сфера Земли. М., Мысль, 1970, 207 с.

Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3. Многолетние данные. Магаданская область, Чукотский автономный округ. Л., Гидрометеиздат, 1990, вып. 33, ч. 1–6, 567 с.

Насыбулин П.С. Репрезентативность характеристик стока Колымской водно-балансовой станции для территории верхней Колымы // Природные ресурсы Северо-Востока СССР. Владивосток, АН ДВНС ИБПС, 1976, с. 32–41.

Оленченко В.В., Макарьева О.М., Землянская А.А. и др. Геофизические признаки источников гигантской наледи на р. Анмангында (Магаданская область) // Геодинамика и тектонофизика, 2023, т. 14, № 3, 0702.

Рожина М.С., Гулый С.А. Влияние снежного покрова и растительности на температуру поверхности пород (на примере участка “Ольский перевал” в Магаданской области) // Современные исследования трансформации криосферы и вопросы геотехнической безопасности сооружений в Арктике: Тезисы конф. Салехард, ИКЗ СО РАН, 2021, с. 359–362.

Справка о состоянии и перспективах использования минерально-сырьевой базы Магаданской области на 15.09.2022, от 14.01.2021 г. № 049-00016-21-00. СПб., ВСЕГЕИ, 2021, 4 с.

Справочник по климату СССР. Чукотский национальный округ и Магаданская область. М., Гидрометеиздат, 1966, вып. 34, ч. 2, 288 с.

Толстихин О.Н. Наледи и подземные воды Северо-Востока СССР. Новосибирск, Наука, 1974, 164 с.

Makarieva O., Nesterova N., Lebedeva L., Sushansky S. Water balance and hydrology research in a mountainous permafrost watershed in upland streams of the Kolyma River, Russia: a database from the Kolyma Water-Balance Station, 1948–1997 // Earth Syst. Sci. Data, 2018, vol. 10, No. 2, p. 689–710.

Makarieva O., Nesterova N., Post D. et al. Warming temperatures are impacting the hydrometeorological regime of Kolyma rivers in the zone of continuous permafrost // The Cryosphere, 2019, vol. 13, p. 1635–1659.

Melnikov V.P., Osipov V.I., Brouchkov A.V. et al. Climate warming and permafrost thaw in the Russian Arctic: Potential economic impacts on public infrastructure by 2050 // Nat. Hazards, 2022, vol. 112, No. 1, с. 231–251.

Shikhov A., Ilyushina P., Makarieva O. et al. Satellite-based mapping of gold-mining-related land-cover changes in the Magadan region, Northeast Russia // Remote Sens., 2023, vol. 15, p. 3564.

Sysolyatin R., Kalinicheva S., Fedorov A., Rozhina M. Eastern Siberia permafrost transect (ESPT). A first stage: The Verkhoyansk Range part // J. Mountain Sci., 2023a, vol. 20, p. 6.

Sysolyatin R., Serikov S., Kirillin A. et al. Brief communication: Alternation of thaw zones and deep permafrost in the cold climate conditions of the East Siberian Mountains, Suntar-Khayata Range // The Cryosphere, 2023b, vol. 17, p. 4601–4608.

Zemlianskova A., Makarieva O., Shikhov A. et al. The impact of climate change on seasonal glaciation in the mountainous permafrost of North-Eastern Eurasia by the example of the giant Anmangynda aufeis // Catena, 2023, vol. 233, p. 107530.

URL: <http://gtnpdatabase.org/boreholes> (дата обращения: 10.02.2023).

URL: <http://www.pogodaiklimat.ru> (дата обращения: 17.02.2023).

References

Alekseeva O.I., Gulyi S.A., Shepelev V.V. et.al. Georgy Zakharovich Perlshtein (05.10.1937–26.08.2020). Earth's Cryosphere, 2020, vol. XXIV, No. 6, p. 49–50.

Afanasiev V.I. Geologicheskaya karta SSSR masshtaba 1:200 000 (pervoe pokolenie). Seriya Verhne-Kolymskaya. List P-55-XXX. Ob"yasnitel'naya zapiska [Geological map of the USSR, scale 1:200,000 (first generation). Upper Kolyma series. Sheet P-55-XXX. Explanatory letter]. Moscow, Nedra, 1968, 65 p. (in Russian).

Bantcekina T.V. Temperature regime and ground ice content of the coarse slope sediments without filler in the spring-summer time (example of Kontaktoviy creek). Kolyma, 2002, No. 4, p. 9–13.

Vasiliev A.I. Current state of the landscapes of the Kolyma water-balance station. In: Monitoring in the Cryolithozone. Collection of reports of the sixth conference of Geocryologists of Russia with participation of Russian and foreign scientists, engineers and specialists (June 14–17, 2022). Moscow, University Book House, Dobrosvet, 2022, p. 151–156 (in Russian).

Vasiliev A.I. Current state of the landscapes in the catchment area of the Anmangynda River. In: Environmental and infrastructure integrity in permafrost regions in the conditions of climate change: Proc. of the Russian Conf. with int. participation on the occasion of 150th anniversary of M.I. Sumgin (March 22–24, 2023). Yakutsk, Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 2023, p. 182–186 (in Russian).

Verkulich S.R., Demidov N.E., Anisimov M.A. Development of a project for the organization of monitoring of long-lived soils of high latitude Arctic on the basis of the Roshydromet observation network. Rossiiskie poliarnye issledovaniia [Russ. Polar Res.], 2021, vol. 43, No. 1, p. 23–27.

Gidrogeologiya SSSR [Hydrogeology of the USSR. Vol. 26. North-East of the USSR]. O.N. Tolstikhin (ed.). Moscow, Nedra, 1972, 297 p. (in Russian).

Glотова L.P., Glотов V.E. Role of underground waters in the common drain of small mountain rivers at Kolyma River basin. Izvestiya Samar. Nauch. Tsentra RAN [Proc. of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2012, vol. 14, No. 1 (9), p. 2321–2324.

Zamolotchikova S.A., Zuev I.A. Yukagiно-Anuyskiy i Kolymskiy regiony [Yukagiно-Anuyskiy and Kolyma regions]. Geokriologiya SSSR. Vostochnaya Sibir' i Dal'nii Vostok [Geocryology of the USSR. Eastern Siberia and the Far East]. Moscow, Nedra, 1989, p. 293–309 (in Russian).

- Meteorologicheskij ezheemesyachnik. Vypusk 24. Yakutsk, Yakutskoe upravlenie gidrometeorologicheskoy sluzhby [Monthly weather summary. Issue 24. Yakutsk, Yakutsk Department of Hydrometeorological Service]. Gidrometcenter, 1981–2000, 990 p. (in Russian).
- Meteorologicheskij ezheemesyachnik. Vypusk 33. Magadan, Kolymskoe upravlenie gidrometeorologicheskoy sluzhby [Monthly weather summary. Issue 33. Magadan, Kolyma Department of Hydrometeorological Service]. Gidrometcenter, 1981–2006, 936 p. (in Russian).
- Mil'kov F.N. Landshaftnaia sfera Zemli [Landscape sphere of the Earth]. Moscow, Mysl, 1970, 207 p. (in Russian).
- Nauchno-prikladnoy spravochnik po klimatu SSSR. Seriya 3. Mnogoletnie dannye. Magadanskaia oblast, Chukotskii avtonomny okrug [USSR Scientific and applied climate Handbook. Ser. 3. Long-term data. Magadan Region, Chukotsky autonomous District], Leningrad, Gidrometeoizdat, 1990, vol. 33 (1–6), 567 p. (in Russian).
- Nasybulin P.S. The representativity of runoff characteristics at the Kolyma water-balance station for the upper Kolyma area. Natural resources of the USSR North-East. Vladivostok, AN DVIS IBPS, 1976, p. 32–41 (in Russian).
- Olenchenko V.V., Makarieva O.M., Zemlianskova A.A. et al. Geophysical features of sources of giant aufeis on the Anmangynda river (Magadan region). Geodinamika i tektonofizika [Geodynamics and Tectonophysics], 2023, vol. 14, No. 3, 0702.
- Rozhina M.S., Gulyi S.A. Influence of snow cover and vegetation on the surface temperature of rocks (on the example of the "Ol'skiy pass" in the Magadan region). In: Proc. of the Conf. "Modern research on cryospheric transformation and geotechnical safety of structures in the Arctic". Salekhard, IKZ SO RAN, 2021, p. 359–362 (in Russian).
- Spravka o sostoianii i perspektivakh ispolzovaniia mineralno-syrevoi bazy Magadanskoi oblasti na 15.09.2022, ot 14.01.2021. [Reference on the state and prospects of the mineral-raw material base of the Magadan region on 15.09.2022, from 14.01.2021. No. 049-00016-21-00]. St. Petersburg, VSEGEI, 4 p. (in Russian).
- Spravochnik po klimatu SSSR Chukotskii natsionalnyi okrug i Magadanskaia oblast [USSR Climate Handbook Chukotsky National District and Magadan Region]. Moscow, Gidrometeoizdat, 1966, vol. 34 (2), 288 p. (in Russian).
- Tolstikhin O.N. Aufeis and underground water in the North-Eastern Regions of the USSR. Novosibirsk, Nauka, 1974, 164 p. (in Russian).
- Makarieva O., Nesterova N., Lebedeva L., Sushansky S. Water balance and hydrology research in a mountainous permafrost watershed in upland streams of the Kolyma River, Russia: a database from the Kolyma Water-Balance Station, 1948–1997. Earth Syst. Sci. Data, 2018, vol. 10, No. 2, p. 689–710.
- Makarieva O., Nesterova N., Post D. et al. Warming temperatures are impacting the hydrometeorological regime of Russian rivers in the zone of continuous permafrost. The Cryosphere, 2019, vol. 13, p. 1635–1659.
- Melnikov V.P., Osipov V.I., Brouchkov A.V. et al. Climate warming and permafrost thaw in the Russian Arctic: Potential economic impacts on public infrastructure by 2050. Nat. Hazards, 2022, vol. 112, No. 1, p. 231–251.
- Shikhov A., Ilyushina P., Makarieva O. et al. Satellite-based mapping of gold-mining-related land-cover changes in the Magadan region, Northeast Russia. Remote Sens., 2023, vol. 15, p. 3564.
- Sysolyatin R., Kalinicheva S., Fedorov A., Rozhina M. Eastern Siberia permafrost transect (ESPT). A first stage: The Verkhoysansk Range part. J. Mountain Sci., 2023a, vol. 20, p. 6.
- Sysolyatin R., Serikov S., Kirillin A. et al. Brief communication: Alternation of thaw zones and deep permafrost in the cold climate conditions of the East Siberian Mountains, Suntar-Khayata Range. The Cryosphere, 2023b, vol. 17, p. 4601–4608.
- Zemlianskova A., Makarieva O., Shikhov A. et al. The impact of climate change on seasonal glaciation in the mountainous permafrost of North-Eastern Eurasia by the example of the giant Anmangynda aufeis. Catena, 2023, vol. 233, p. 107530.
- URL: <http://gtnpdatabase.org/boreholes> (last visited: 10.02.2023).
- URL: <http://www.pogodaiklimat.ru> (last visited: 17.02.2023).

*Поступила в редакцию 30 мая 2023 г.,
после доработки – 18 апреля 2024 г.,
принята к публикации 18 апреля 2024 г.*