

УДК 551.345

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД ВЕРХНЕКОЛЫМСКОГО НАГОРЬЯ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

**О.М. Макарьева^{1,2}, Д.А. Абрамов³, А.А. Землянскова^{1,2}, А.А. Осташов^{1,4},
Н. В. Нестерова^{1,4}**

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о
Земле, 199034, Санкт-Петербург, Университетская набережная, 7–9,
Россия; omakarieva@yandex.ru

² Северо-Восточный государственный университет, 685000, г. Магадан, ул.
Портовая, 13, Россия

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
геологический факультет, кафедра геокриологии, Москва, Ленинские горы,
1А, 119991, Россия; dmitrii.abramov@student.msu.ru

⁴ Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург, 2-я линия
В. О., 23, 199004, Россия

Целью исследования является первичный анализ данных о температуре многолетнемерзлых пород (ММП) континентальной части Магаданской области, полученных по материалам термометрических скважин, пробуренных и оборудованных авторами в 2021-2022 гг. Скважины глубиной до 15 м расположены на высотах от 618 до 1182 м в различных ландшафтах Верхнеколымского нагорья. Ведутся режимные наблюдения за температурой пород на различных глубинах с измерениями каждые 4 часа, а также наблюдения за снежным покровом. Получены данные о среднегодовой температуре пород, глубине сезонного оттаивания/промерзания, а также глубине нулевых годовых амплитуд. Среднегодовая температура пород на глубине нулевых годовых амплитуд колеблется в пределах – от -0.1 до -3.8

°С. Глубина сезонного оттаивания составила от 0.9 до 2.6 м. Глубина нулевых годовых амплитуд составила 11.5 и 13 м в двух скважинах. На двух скважинах, расположенных в таликовых зонах, глубина промерзания зафиксирована на 2.6 и 3.6 м. Температурный режим пород в пределах одного района существенно отличается, 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 геокриологического мониторинга в Магаданской области. Несмотря на короткие ряды наблюдений, в связи с практическим отсутствием сведений о состоянии ММП для рассматриваемой территории, публикация данных актуальна и своевременна.

***Ключевые слова:** многолетнемерзлые породы, слой сезонного оттаивания/промерзания, температурный режим пород, горная криолитозона, Верхнеколымское нагорье, талик*

**GROUND TEMPERATURE REGIME OF THE MOUNTAIN
PERMAFROST OF UPPER KOLYMA HIGHLAND IN THE CURRENT
O.M. Makarieva^{1,2}, D.A. Abramov³, A.A. Zemlyanskova^{1,2}, A.A. Ostashov^{1,4},
N. V. Nesterova^{1,4}**

¹ *St. Petersburg State University, St. Petersburg, 199034, Russia;*

omakarieva@yandex.ru

² *North-Eastern State University, 13 Portovaya str., Magadan, 685000, Russia*

³ *Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russia;*

dmitrii.abramov@student.msu.ru

⁴ *State Hydrological Institute, St. Petersburg, 199004, Russia*

The aim of the study is the preliminary analysis of the ground temperature regime in continental part of the Magadan region, obtained from the data of thermometric wells, drilled and equipped by the authors in 2021-2022. The wells up to 15 m deep are located at altitudes from 618 to 1182 m in the characteristic landscapes of the Upper-Kolyma Highland (rocky talus, mountain tundra, sparse larch-forest, valleys of rivers and streams). Continuous 4-hour monitoring of ground temperature at various depths is carried out. Data were obtained on the average annual temperature of rocks, the depth of seasonal thawing/freezing, as well as the depth of zero annual amplitudes. The mean annual ground temperature ranges 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 wells. Two wells which are located in talik zones recorded a freezing depth of 2.6 and 3.6 m. Ground temperature regimes within the same region differ significantly in different landscapes. Based on the data obtained and the experience of the work, it is planned to further develop the geocryological monitoring network in the Magadan region. Despite the short series of analyzed data, due to the practical lack of information about the state of the permafrost for the territory under consideration, the publication of data is relevant and timely.

Key words: *permafrost, seasonal thawing/freezing layer, ground temperature regime, mountain permafrost, the Upper-Kolyma Highland, talik*

ВВЕДЕНИЕ

Прогнозируемые последствия изменения климата на территории регионов России с распространением многолетнемерзлых пород (ММП) к середине 21 века затронут 54% всех жилых зданий, общей стоимостью 1.2 трлн руб. и более 20% всех коммерческих и промышленных сооружений, с суммарным ущербом от этих изменений и ликвидацией последствий примерно в 5 трлн руб. [Streletskiy, Suter, Shiklomanov et al., 2019].

Одним из стратегически важных регионов в зоне ММП (98% территории) является Магаданская область (МО), которая по добыче россыпного золота и масштабам прогнозных ресурсов коренного золота занимает первое и второе место в России соответственно [Справка ..., 2021].

В настоящее время в МО наращиваются объемы добычи драгоценных металлов. Например, для Тенькинского городского округа на основе анализа данных дистанционного зондирования выявлено увеличение площади нарушенных земель за период 2001-2021 гг. более чем в 7 раз, что связано со значительным увеличением объемов золотодобычи [Илюшина, Шихов, Макарьева, 2023]. Освоение природных ресурсов влечёт за собой масштабное развитие энергетической, транспортной и социальной инфраструктуры.

За последние 50 лет на Северо-Востоке (включая Чукотский п-ов, Магаданскую обл., Восточную Якутию) температура воздуха выросла в среднем на +2.2°C [Makarieva, Nesterova, Post, Sherstyukov et al., 2019].

Анализ данных наблюдений за температурой ММП по данным термометрических скважин, 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 повысилась на 0.9, 1.1 и 0.8°C соответственно.

Согласно одному из климатических сценариев (RCP8.5) прогноза СМIP 5, к 2050 году 26% всей инфраструктуры Магаданской области окажется в зоне геокриологических рисков, а общая стоимость ущерба от деградации мерзлоты к 2050 году достигнет около 60 млрд рублей (цены 2016 года) [Streletskiy, Suter, Shiklomanov et al., 2019].

Для оценки состояния и динамики ММП, а также построения прогнозов и оценки геокриологических рисков, главной характеристикой является температура пород. Наиболее востребованный метод для прогнозирования изменения криолитозоны – установка режимных наблюдений на термометрических скважинах. Тем не менее, для регионов криолитозоны России фоновая сеть наблюдений за температурой пород очень разрежена [Melnikov, Osipov, Brouchkov et al., 2022], ряды данных имеют разную продолжительность, а государственная сеть геокриологического мониторинга находится в стадии организации [Веркулич, Демидов, Анисимов, 2021].

В Магаданской области активное изучение закономерностей распространения ММП и их температуры было начато с середины сороковых годов 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 Институт мерзлотоведения. В 1945 г. была организована Центральная мерзлотная станция Дальстроя, занимающаяся в том числе исследованием температурного режима пород на Аркагалинской мерзлотной станции до 1953 г. и в пос. Мяунджа с 1953 г. [Гидрогеология СССР ..., 1972].

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

На метеорологических станциях Гидрометеорологической Службы также велись наблюдения за температурой пород до глубины 3.2 м с помощью вытяжных термометров. В 1966 году на территории Магаданской области количество станций, на которых производились наблюдения за температурой почвы на глубинах ниже 80 см было десять, в настоящее время – две, в гг. Магадан и Сусуман.

Гидрометслужбе принадлежала Колымская водно-балансовая станция, основанная в 1948 г. На ней с 1951 гг. начались наблюдения за динамикой промерзания и протаивания с использованием мерзлотомеров конструкции Данилина. Полученные данные были репрезентативны для значительной территории криолитозоны горного Северо-Востока [Makarjeva, Nesterova, Lebedeva 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 мерзловед Г.З. Перльштейн [Алексеева, Гулый, Шепелев и др., 2022]. Согласно данным общемировой базы данных о мерзлоте GTN-P с 1973 по 1989 гг. было пробурено 6 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 метров [<http://gtnpdatabase.org/boreholes>]. Данные по этим скважинам в свободном доступе отсутствуют.

После 90-х годов существенно сократилось финансирование научных исследований, из-за чего развитие сети наблюдений за ММП прекратилось.

В контексте развития экономики Магаданской области особенно важен вопрос об устойчивости существующей и проектируемой промышленной инфраструктуры региона. Горнодобывающие предприятия региона расположены в его континентальной части, в зоне распространения сплошной многолетней мерзлоты. После закрытия в 1997 г. Колымской водно-балансовой станции режимные наблюдения за геокриологическими условиями здесь отсутствуют. Фоновой мониторинг температуры пород на этой территории (400000 км²) ведется на единственной метеорологической станции Сусуман (вытяжные термометры до глубины 0.8 м). В 1966 г. на территории региона таких станций было не менее десяти [Справочник по Климату ..., 1966] (Рис. 1).

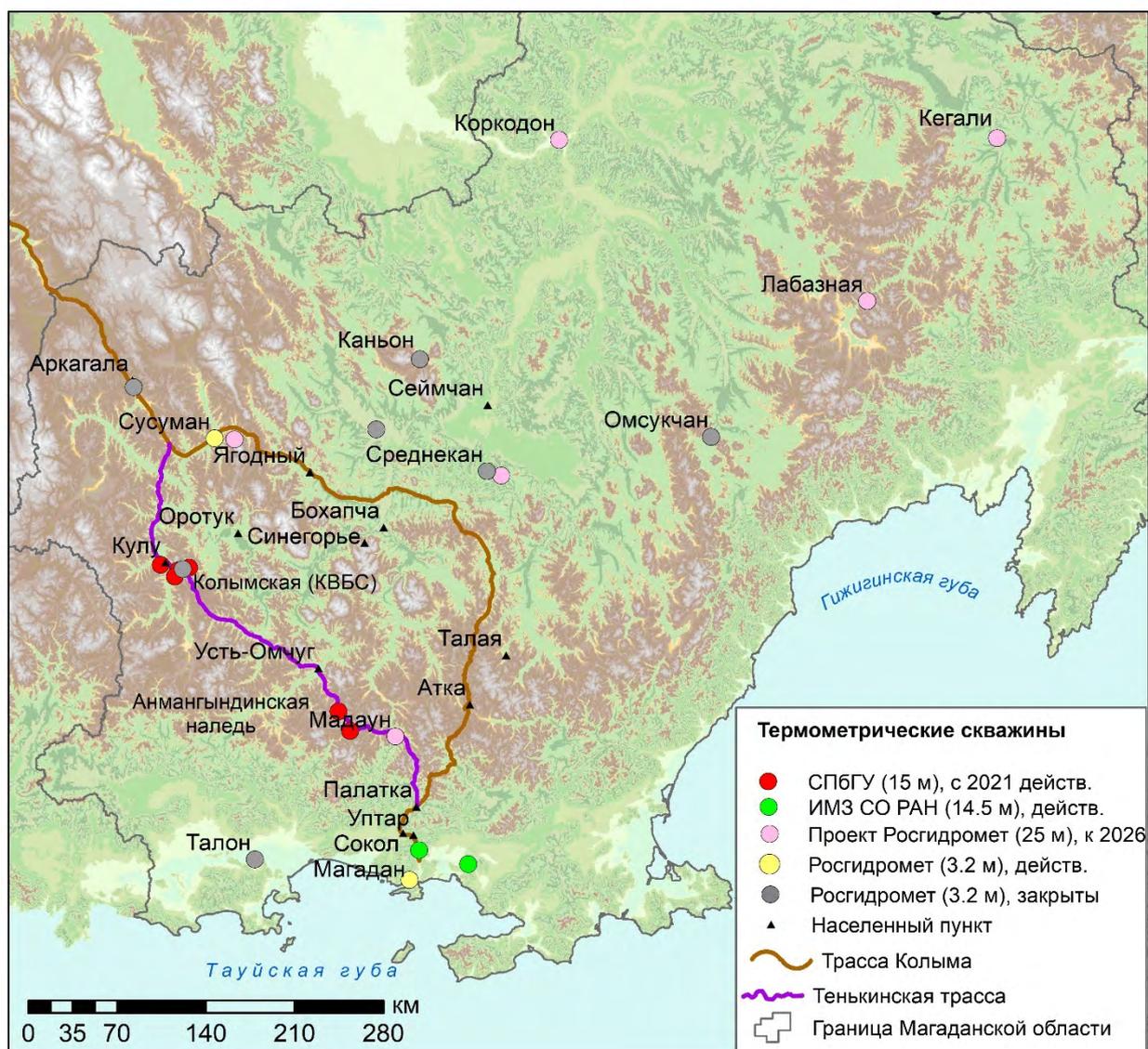


Рис. 1. Схема расположения скважин в Магаданской области

Fig. 1. Thermometric wells in the Magadan region

В рамках развития государственной геокриологической сети мониторинга мерзлоты к 2025 г. в Магаданской области планируется оборудовать до 6 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 многолетней мерзлоты является недостаточным. При успешной реализации планов Росгидромет первые данные о температуре ММП будут получены только в 2026 г.

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 десяти термометрических скважинах глубиной от 5 до 15 м, пробуренных и оборудованных авторами в 2021-2022 гг. (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 расположены в пределах Тенькинского городского округа Магаданской области: одна из них в долине р. Бускэчэн (приток р. Бохапча, правый приток р. Колымы), четыре – в бассейне р. Анмангынды (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 Делянكير (бассейн р. Индигирка).

В физико-географическом отношении Тенькинский район располагается в пределах Верхне-Колымского нагорья на западе Магаданской области. 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 заполнена по большей части глинистыми сланцами конца палеозоя – мезозоя [Афанасьев, 1968].

Климат района – резко-континентальный, муссонный. В зимнее время в горных районах характерна температурная инверсия. Среднегодовая температура района исследований колеблется в пределах -8...-11 °С, количество осадков – 300-400 мм. 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 Усть-Омчуг показывают, что с 1980 г. среднегодовая температура воздуха увеличилась на 1.8 °С (Табл. 1). Наибольший рост температуры характерен для апреля-мая и октября-ноября. Сумма осадков с 1980 г. в среднем выросла на 59 мм (или 16%) с 317 до 376 мм. Значительно увеличилась средняя толщина снежного покрова – на 4-10 см в зимние месяцы. В Табл. 1 представлены дополнительные данные о климатических характеристиках на метеорологических станциях исследуемого региона. Климатические изменения оказывают влияние на температурный режим пород.

Таблица 1

Климатические характеристика района исследований

Станция (высота, м)	Переменная	Период, источник	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Год
Усть- Омчуг (575)	Т	1955-1980*	-34.1	-30.7	-23.5	-11.3	2.0	10.8	13.9	11.3	3.6	-11.8	-28.0	-33.8	-11.0
		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
	Р	1945-1980*	15	12	7	10	23	47	60	50	40	20	17	16	317
		1981-2000^	14	11	7	12	19	43	64	63	41	31	18	10	334
		2001-2021^	13	11	12	11	26	53	56	83	47	26	22	16	376
	Н	1967-2021^	14	11	9	10	24	49	59	66	42	26	19	13	341
		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
КВБС (850)	Т	1949-2014	-34.0	-30.5	-22.9	-11.4	1.4	10.7	13.6	10.2	1.9	-12.7	-27.1	-34.8	-11.3
	Р	1951-2014	14	11	8	10	21	52	71	66	39	24	20	15	354

	Н	2007-2022**	54	61	61	63	52	0	0	0	11	26	42	49	47
Кулу (650)	Т	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
		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
	Р	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
Н	1942-1980*	36	42	42	42	12	0	0	0	2	9	20	29	26	

Т (°С) – средняя температура воздуха, Р (мм) – среднее количество осадков, Н (см) – средняя месячная высота снежного покрова по постоянной рейке. * – [Климатический справочник, 1966] ** – [pogodaiklimat]; ^ – суточные данные.

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

Гидрометеорологические условия периода наблюдений

На распределение температуры в толще горных пород непосредственно влияют конкретные погодные условия прошедшего года. С 1 октября 2021 г. по 30 сентября 2022 г. среднегодовая температура воздуха по данным м/с Усть-Омчуг составила -8.3°C , годовая сумма осадков – 366 мм. Гидрологический год по температурному режиму оказался на 0.9°C выше среднего за последние двадцать лет, наибольшее отклонение значений температуры воздуха пришлось на летний период, в июле 2022 г. средняя температура воздуха была выше на 3.7°C . В целом количество осадков за год было близко к норме, однако их величина в отдельные месяцы значительно отличалась от нее. Так, в 10-12 месяцы 2021 г. количество твердых осадков составило 105 мм при норме 64 мм. Июль 2022 г. был сухим (20 мм, при

норме 56 мм). По данным станции Усть-Омчуг средняя высота снежного покрова в октябре 2021 г. составила 14 см, в ноябре она увеличилась до 25 см, а в январе достигла 30 см. В апреле 2022 г. средняя высота снежного покрова составила 26 см. По данным снегомерной подушки, установленной в районе Анмангындинской наледи (30 км от пос. Усть-Омчуг), в 2022 г. максимальный запас воды в снежном покрове 24 марта 2022 г. составил 90 мм, а наибольшая мощность снежного покрова по данным снегомерной рейки, установленной рядом, до 58 см.

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 (Таблица 2, Рисунок 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 Делянкир. Бурение проводилось ударным способом с продувкой на установке УРБ 2А2М.

Второй этап бурения еще пяти скважин произведен в июле 2022 года с отбором и описанием керна. Глубина всех скважин, оборудованных на втором этапе, составила 15 м.

Все скважины обсажены пластиковой трубой с внешним диаметром 32 мм, с внешней стороны засыпаны грунтом, а сверху изолированы от проникновения атмосферного воздуха и влаги.

Для круглогодичного мониторинга температуры пород используется оборудование производства компании «Импеданс» (г. Москва) с автоматической записью данных раз в 4 часа. Цифровая термометрическая коса «Импеданс» построена на основе контрольного соединительного кабеля для особо тяжелых условий с оболочкой из устойчивого полиуретана. В кабель вмонтированы герметичные термометрические датчики с защитной

оболочкой. Преобразователь содержит шестнадцатитбитный преобразователь температуры и микропроцессор для управления преобразователем и обмена данными. Рабочий диапазон температур составляет от -55°C до $+125^{\circ}\text{C}$. Точность измерений составляет 0.1°C в диапазоне от -3°C до $+3^{\circ}\text{C}$, 0.2°C в диапазонах от -10°C до -3°C и от $+3^{\circ}\text{C}$ до $+10^{\circ}\text{C}$; 0.3°C в диапазонах от -40°C до -10°C и от $+10^{\circ}\text{C}$ до $+85^{\circ}\text{C}$. Коса подсоединяется к регистратору данных (логгеру). Логгеры ЛК-U(2U) оснащены автономным морозоустойчивым батарейным питанием, поддерживает ход часов реального времени, в соответствии с программными установками инициирует процесс измерения, организует получение данных измерения и их хранение в энергонезависимой памяти. Получение данных из логгера, а также настройка его режимов работы происходит под управлением персонального компьютера через интерфейс USB. Логгер и коса характеризуются микропотреблением – автономность работы комплекта составляет десятки тысяч измерений в течение 10 лет и более.

Коса термометрическая оснащена 15 или 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 (5 шт.), в интервале от 0.5 до 1.5 м через 0.25 м (4 шт.), от 1.5 до 5 (15) м через 0.5 м (4 или 27 шт.), дополнительный датчик установлен на глубине 4.75 (14.75) м. Скважина «Наледь» (глубина 13.1 м) находится в пределах наледной поляны р. Анмангынды, на участке, где толщина льда по историческим данным может достигать 2 м. Для того, чтобы изолировать скважину от попадания воды сверху, оголовок был сделан высотой 2.66 м. Из-за того, что длина термометрической косы составляет 16 м, на скважине «Наледь» только 28 из 38 датчиков было задействовано для измерения температуры пород, начиная с глубины 0.1 м.

Ландшафтные условия скважин

Скважины расположены в диапазоне высот от 618 до 1182 м в различных ландшафтных условиях: гольцы, тундры, лиственничные редколесья, наледная поляна, а также техногенный ландшафт (Таблица 2). На Рис. 2, представляющем обобщение ландшафтной карты бассейна реки Анмангында [Васильев, 2023], нанесено как реальное (красные точки), так и гипотетическое (фиолетовые точки) расположение скважин, находящихся за пределами бассейна р. Анмангында в схожих ландшафтах [Васильев, 2022]. Для «гипотетических скважин» при нанесении учитывались характеристики высоты местности и ландшафтов.

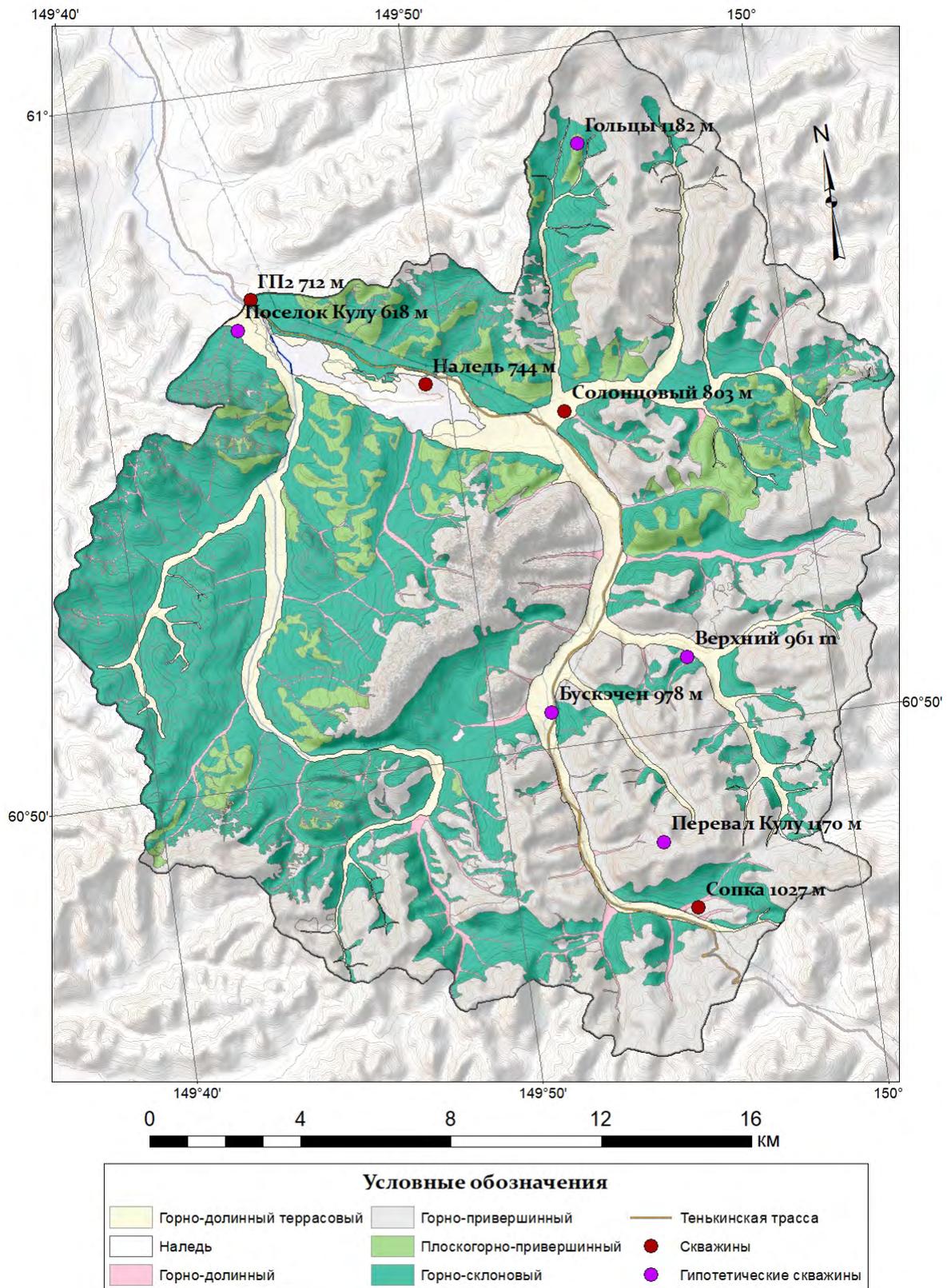


Рис. 2. Приуроченность скважин к различным типам местности и рельефа на примере бассейна р. Анмангында. Гипотетические скважины расположены в районе поселка Кулу, однако могут быть отнесены к типичным для бассейна р. Анмангында типам местности

Fig. 2. Layout of terrain types and location of the wells in the Anmangynda river basin. Hypothetical wells (marked in violet) are located in the area of the Kulu settlement, but can be attributed to the types of terrain typical for the Anmangynda river basin

Таблица 2

Описание ландшафтных условий оборудованных термометрических скважин

№	Название, глубина, м	Высота, м	Элемент рельефа	Тип местности или ландшафта	Растительные ассоциации
Период наблюдения 1.10.2021 по 30.09.2022					
1	Сопка 15	1027	Склон	Горно-привершинный	Тундры горные лишайниковые и кустарничковые каменистые с редкими кедровыми стланиками
2	ГП-2 15	712	Надпойменная терраса р. Анмангынды	Горно-долинный террасовый	Лиственничные редины на лишайниково-сфагновой мари с ерниками морошково-багульниково-осоковыми
3	Наледь 13.1	744	Наледная поляна гигантской наледи	Горно-долинный террасовый	Пойма рек и ее притоков в сочетании с лиственничными редколесьями с участками чозениевых и тополевых лесов, ивняками и лугами.
4	Солонцовый 5	803	Надпойменная терраса	Горно-долинный террасовый	Пойма рек и ее притоков в сочетании с лиственничными редколесьями с участками чозениевых и тополевых лесов, ивняками и лугами
5	Делянكير 15	801	Надпойменная терраса	Горно-долинный террасовый	Пойма рек и ее притоков в сочетании с лиственничными редколесьями с участками чозениевых и тополевых лесов, ивняками и лугами.
Период наблюдения 1-30.09.2022					
6	Перевал Кулу 15	1170	Плоский водораздел	Горно-привершинный	Тундры горные лишайниковые и кустарничковые каменистые с редкими кедровыми стланиками
7	Поселок Кулу 15	618	Надпойменная терраса р. Кулу	Горно-долинный террасовый	Техногенная осыпь со спорадическим распространением злаковой растительности
8	Гольцы 15	1182	Склон	Плоскогорно-привершинный	Тундры горные каменистые кассиопейно-лишайниковые с редкими кедровыми стланиками и угнетенными лиственницами
9	«Верхний» 15	961	Надпойменная терраса	Горно-долинный (днища горных ручьев и рек)	Лиственничные леса с ерниками и ивняками багульниково-грушанково-осоковые лишайниково-зеленомошные
10	Бускэчен 15	978	Надпойменная терраса р. Бускэчен	Горно-долинный террасовый	Пойма рек и ее притоков в сочетании с лиственничными редколесьями с участками чозениевых и тополевых лесов, ивняками и лугами

Скважина «ГП2» расположена на верхнеоуплейстоценовой надпойменной террасе р. Анмангынды, сложенной суглинком с включениями мелкой слабоокатанной гальки мощностью 6–10 м, подстилаемым песчано-глинистыми сланцами. Растительность представляет собой угнетенное лиственничное редколесье с подростом из карликовой берёзы, кедрового стланика, злаковой растительностью с голубикой, сфагнумом (мощность до 15 см) и лишайниками (Рис. 3А).

Скважина «Наледь» расположена на наледной поляне, в 500 м от одной из основных протоков р. Анмангынды. Растительность представлена редкими кустарниками голубики и карликовой ивы, а также зеленомошным покровом спорадического распространения (Рис. 3Б). Мощность аллювия, представленного гравийно-галечниковыми отложениями с песчано-суглинистым заполнителем, по данным геофизических исследований может достигать 12 м [Оленченко, Макарьева, Землянскова и др., 2023].

Скважина «Солонцовый» расположена в 50 метрах к югу от русла ручья Солонцовый (правый приток р. Анмангынды) на субгоризонтальной поверхности. Породы разреза представлены накоплениями крупнообломочного материала с песчано-суглинистым заполнителем, их мощность не определена. Ландшафт представляет собой лиственничный лес (высотой до 10 метров), напочвенный покров представлен дерном со спорадическим распространением сфагнума мощностью до 20 см (Рис. 3В).

Скважина «Сопка» расположена в верховьях бассейна р. Анмангынды. Ландшафт представляет собой поверхность, заполненную осыпным щебнистым материалом, растительность представлена отдельно стоящими лиственницами с напочвенным лишайниковым покровом мощностью до 5 см. (Рис. 3Г).

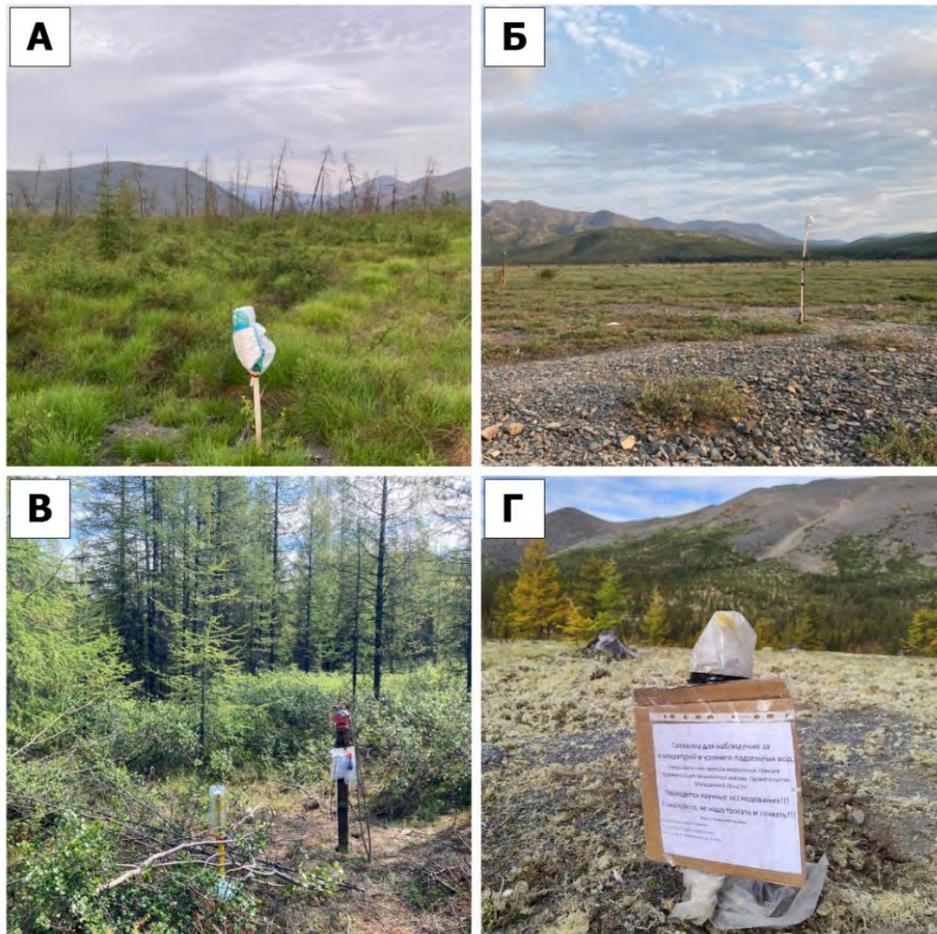


Рис. 3. Ландшафты скважин: А) ГП2; Б) Наледь; В) Солонцовый; Г) Сопка

Fig. 3. Well Landscapes: А) HP2; Б) Aufeis; В) Solontsoviy; Г) Peak

Скважина «Перевал Кулу» расположена на Кулинском перевале вблизи Тенькинской трассы. Скважина находится на субгоризонтальной поверхности, представляющей собой лиственничное редколесье.

Поверхность выполнена лишайниками мощностью до 10 см. В геологическом отношении первые 2 м разреза представлены дрсесвой глинистого сланца. С 2 м и до забоя литологический состав пород не меняется и представлен алевро-глинистыми сланцами.

Скважина «Поселок Кулу» пробурена в пределах закрытого поселка Кулу и расположена на надпойменной террасе правого берега реки Кулу на расстоянии 30 метров от остова дома. Поверхность практически лишена

растительности, а первые 20 см разреза представляют собой техногенный грунт с осколками стекла, кирпичей и строительного мусора. Интервал глубин 0.2-1.5 м представлен мелким песком со следами строительного мусора, за ним следует прослой суглинка 1.5-2.6 м, с глубины 2.6 м и до забоя литологический состав не меняется и представляет собой щебень с песчаным заполнителем.

Скважина «Гольцы» расположена в гольцовом поясе на высоте 1182 м в бассейне ручья Правый Итрикан (правый приток р. Кулу), в 15 метрах от бровки крутого (40-50°) склона высотой 20-30 метров на наклонной поверхности 7-10° западной ориентации. Тип местности – плоскогорно-привершинный, растительность – тундры горные каменистые кассиопейно-лишайниковые с редкими кедровыми стланиками и угнетёнными лиственницами. Первые 2 м разреза представляют собой крупнообломочный делювиальный материал, сложенный глыбами гранодиоритов. В начале лета в данной местности образуется гольцовый лед.

Скважина «Верхний» расположена в долине ручья, притока р. Правый Итрикан, в 20 м от правого берега русла. Тип местности – горно-долинный, растительность – лиственничный лес с кедровым стлаником, лишайниковый напочвенный покров мощностью до 5 см. До 3.8 м суглинок с включением щебня. С 3.8 м и до забоя породы представлены глинистыми сланцами.

Скважина «Бускэчен» расположена в пределах надпойменной террасы реки Бускэчен в 30 метрах к западу от Тенькинской трассы, в 200 метрах от границы поймы реки. Растительность представлена лиственничным редколесьем. Напочвенный покров представляет собой сфагнум мощностью до 10-20 сантиметров и лишайник мощностью до 5 см. Горные породы представляют собой аллювий р. Бускэчен, состоящий из крупной окатанной гальки с песчаным заполнителем.

РЕЗУЛЬТАТЫ

К настоящему моменту получены ряды данных о температуре пород за гидрологический год (01.10.2021 – 30.09.2022) по 4 из 10 скважин, а также распределение температуры пород по глубине к окончанию летнего сезона 2022 г. на пяти новых скважинах. Также получены отрывочные данные по скважине Делянكير (период 01.10.2021 – 15.03.2022).

Данные позволяют оценить характеристики ММП территории исследования, такие как среднегодовая температура пород T_{cp} , глубина ξ и скорость сезонного оттаивания/промерзания, глубина нулевых годовых амплитуд H_0 (Табл. 3).

Критерием для оценки глубины нулевых годовых амплитуд H_0 является неизменность среднемесячной температуры датчика с погрешностью ($\pm 0.3^\circ\text{C}$). Глубина сезонного оттаивания определяется по максимальной мощности слоя с положительными температурами. Аналогично, глубина сезонного промерзания фиксируется по слою с отрицательными температурами в конце периода промерзания. Среднегодовая температура пород T_{cp} – температура пород на глубине нулевых годовых амплитуд H_0 . В Табл. 3. также представлены данные о характеристиках снежного покрова в октябре и декабре 2022 г., они позволяют предварительно оценить различия процессов снегонакопления для разных скважин.

Таблица 3

Характеристики пробуренных скважин, 2021-2022 гг.

Скважина	Высота, м	Снежный покров, 2022 г.				T_{cp} , $^\circ\text{C}$	ξ , м	H_0 , м	Начало – окончание			
		6-10 октября		21 декабря					оттаивания		промерзания	
		Н, см	Р, г/см ³	Н, см	Р, г/см ³							
Гольцы	1182	43	0.25	н/д		-3.8	1.9	н/д	н/д	IX	IX	X
Перевал Кулу	1170	33	0.20			-2.4	1.3	н/д	н/д	IX	IX	X
Сопка	1027	30	0.17	70	0.27	-3.2	1.3	13	VI	IX	IX	IX
Бускэчен	978	26	0.15	н/д		-0.6	1.6	н/д	н/д	IX	IX	н/д
«Верхний»	961	41	0.18			-0.6	2.6	н/д	н/д	IX	IX	X
Солонцовый	803	19	0.12			1.5	2.6	н/д	VI	VIII	X	V
Наледь	744	6	0.15	44	0.19	-0.1	3.6	—	VI	VIII	X	—

ГП2	712	13	0.13	55	0.11	-1.8	0.9	11.5	V	IX	X	X
Поселок Кулу	618	13	0.12	н/д		-2.5	1.7	н/д	н/д	IX	IX	X

H, см – высота снежного покрова, P, г/см³ – плотность снежного покрова; н/д – данные не доступны.

Скважина «Наледь» интересна своим расположением в районе наледееобразования. Формирование температурного режима пород наледных полян происходит под воздействием стока речных и подземных вод, процессов наледееобразования. Скважина вскрывает подрусловой талик мощностью 8.5 м. Разгружающиеся подземные воды, формирующие наледь, имеют температуру близкую к нулю (рис. 4Б). Промерзание начинается в октябре как с поверхности земли, так и с кровли ММП, и заканчивается в ноябре на глубине 2.6 и 5.6 м соответственно. Высокая температура мерзлоты (-0.4°C на глубине 13 м) формируется под отепляющим влиянием подземных вод [Оленченко, Макарьева, Землянскова и др., 2023].

В скважине *«Солонцовый»* глубиной 5 м наблюдается таликовая зона по всей вскрытой мощности (рис. 4В). Это может быть связано с близостью ручья Солонцовый (150 м) и его впадением в русло р. Анмангында в радиусе 1 км от скважины. Минимальная температура пород на глубине 5 м достигается в мае (+0.8°C). Среднегодовая температура пород на глубине 5 м – +1.5 °C. Фронт промерзания формируется с поверхности земли в октябре, максимальной мощности ξ (2.6 м) СМС достигает в мае.

Скважины *«Сопка»* и *«ГП2»* (рис. 4Г, 4А). Различие в высотном расположении (1027 и 712 м соответственно) и типах местности объясняет контраст в характеристиках ММП – на «Сопке» среднегодовая температура пород составляет -3.2°C, на «ГП2» -1.8°C. Однако, на «Сопке» порода оттаивает на большую глубину ($\xi = 1.3$ м) в отличие от скважины «ГП2» ($\xi = 0.9$ м) несмотря на то, что оттаивание на «ГП2» начинается на месяц раньше. Ранний период начала оттаивания на «ГП2» связан с более ранним переходом температуры воздуха к положительным значениям, а также тем,

что на «Сопке» выпадает больше твердых осадков. В октябре 2022 г. на «Сопке» высота снега составляла 26 см, а на ГП2 13 см. Разница глубины протаивания связана с растительным покровом – на «Сопке» растительный покров сильно разрежен, тогда как на «ГП2» он сомкнут и его теплоизоляционные свойства оказывают охлаждающий эффект. Также свою роль может играть влажность пород: в скважине «ГП2» больше тепла расходуется на фазовые переходы «вода/лед».

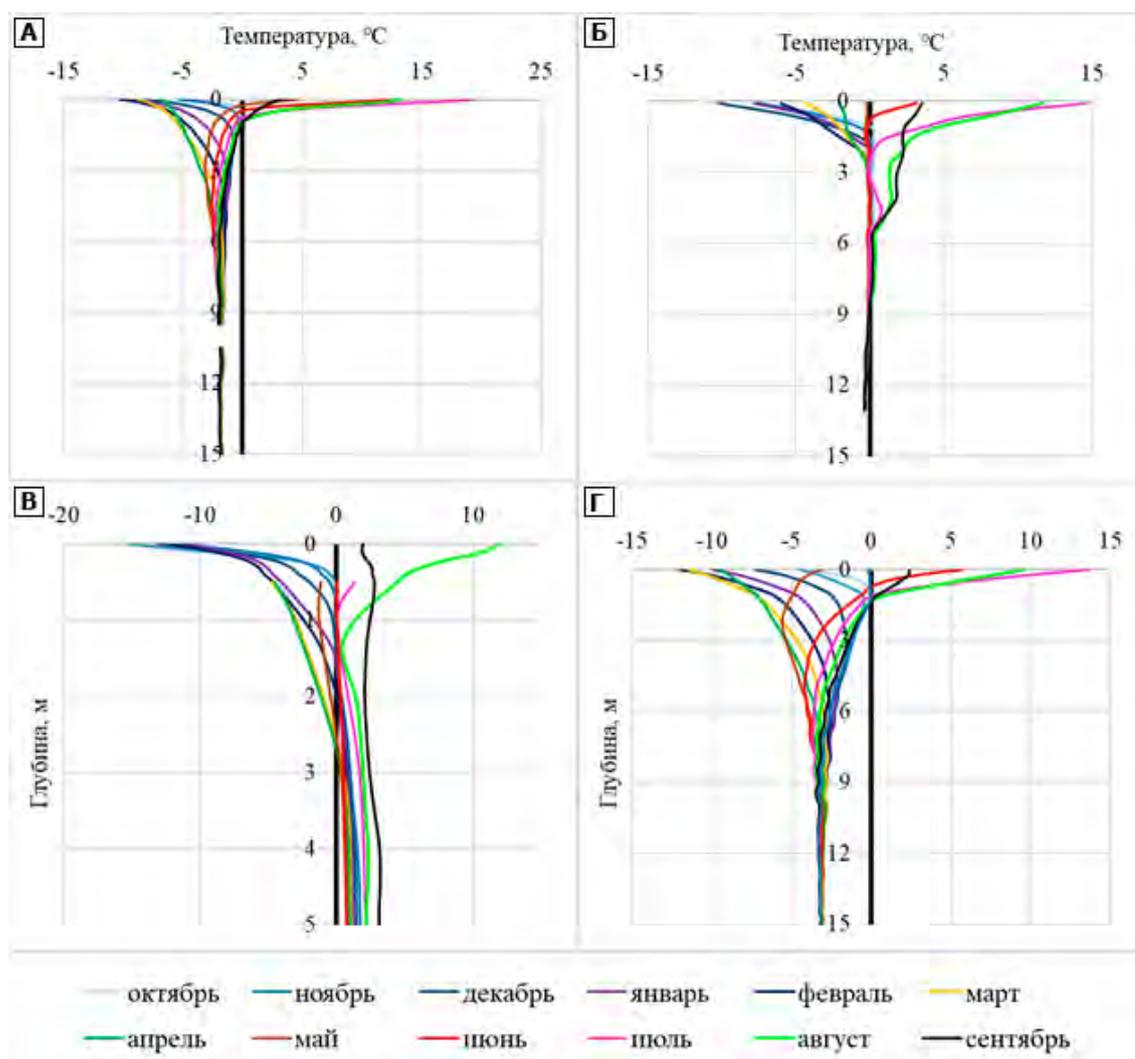


Рис. 4. Графики изменения температуры пород в скважинах за период 01.10.2021 – 30.09.2022: А) ГП2; Б) Наледь; В) Солонцовый; Г) Сопка.

Fig. 4. Ground temperature graphs in the wells for the period 01.10.2021 – 30.09.2022: А) HP2; Б) Aufeis; В) Solontsoviy; Г) Peak

Скважины «*Бускэчен*» и «*Верхний*» расположены в долине реки и ручья с водосборными площадями около 27.5 и 5.5 км² соответственно. В геологическом отношении оборудованы в рыхлых крупнообломочных отложениях, в которых вероятно круглогодичная фильтрация подземных вод, обеспечивающая высокую среднегодовую температуру (-0.6 °С) (Табл. 3). При одинаковой среднегодовой температуре глубина оттаивания отличается на 1 метр (1.6 и 2.6 м соответственно). Это может быть связано с тем, что на ручьях вверх по течению содержание глинистых фракций в аллювиальных отложениях сокращается, они лучше дренируются, образуются так называемые сушенцы, что ведет к увеличению глубины залегания подошвы сезонно-талого слоя [Глотова и Глотов, 2012].

В скважинах «*Перевал Кулу*» и «*Поселок Кулу*» зафиксирована схожая среднегодовая температура пород (-2.4 °С и -2.5 °С), несмотря на различие по высоте почти в 600 м. Возможно значительную роль играют различия режима снегонакопления и температурная инверсия в зимний период (Табл. 3).

Скважина «*Гольцы*», расположенная на максимальной высоте (1182 м) из представленных, характеризуется наименьшей среднегодовой температурой пород (-3.8 °С) и большой глубиной оттаивания (1.9 м). Промерзание в данной скважине начинается ранее других (13 сентября), что связано с высотным изменением температуры воздуха и соответственно температуры пород. Промерзание начинается почти мгновенно с переходом температуры воздуха к отрицательным среднесуточным значениям, т. к. разрез представлен скальными породами, а растительный покров отсутствует.

ВЫВОДЫ

По данным девяти термометрических скважин, расположенных в характерных ландшафтах горной криолитозоны Верхнеколымского нагорья 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.

В 2021-2022 гг. среднегодовая температура пород в различных типах местности составила величины от +1.5 до -3.8 °С, глубина сезонного оттаивания - от 0.9 до 2.6 м, глубина нулевых годовых амплитуд отмечена на 11.5 и 13 м в двух скважинах. На двух скважинах, расположенных в зоне талика, глубина промерзания зафиксирована на 2.6 и 3.6 м.

Температурный режим пород в пределах одного района существенно отличается в различных ландшафтах. Это доказывает необходимость натуральных наблюдений для данного региона, практически не обеспеченного такими данными.

Прослеживается закономерность в изменении геокриологических характеристик с высотой, которая может значительно нарушаться влиянием таких факторов как режим снегонакопления и растительный покров.

Полученные характеристики ММП могут быть использованы на других объектах со схожими условиями, например, при изысканиях. Глубина нулевых годовых амплитуд показывает необходимость бурения термометрических скважин более 12 м. Несмотря на изменения климата общепризнанная глубина в 15 м является оптимальной, но для получения температурного градиента ее недостаточно.

Дальнейшие режимные наблюдения и развитие сети позволят проследить динамику, выявить тренды изменения температурного режима, а также дадут возможность делать прогноз изменения криолитозоны района исследований.

Благодарности. Авторы выражают признательность рецензенту за конструктивную критику. Также 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. Полевые данные получены при поддержке Санкт-Петербургского государственного университета «Комплексная оценка естественных и антропогенных факторов интенсификации водообменных процессов криолитозоны в условиях изменения климата» (№ 94034170), анализ термометрических данных выполнен в рамках проекта Российского научного фонда № 23-17-20011 и содействию правительства Магаданской области.

Литература

Афанасьев В.И. Геологическая карта СССР масштаба 1: 200 000 (первое поколение). Серия Верхне-Колымская. Лист Р-55-XXX. Объяснительная записка. – М.: Недра, 1968, 65 с.

Васильев А. И. Современное состояние ландшафтов Колымской водно-балансовой станции // Сборник докладов Шестой конференции геокриологов России «Мониторинг в криолитозоне» МГУ имени М.В. Ломоносова, 14 - 17 июня 2022 г. Под редакцией Р.Г. Мотенко. – 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: материалы Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 150-летию М.И. Сумгина, г. Якутск, Россия, 22–24 марта 2023 г. // ФГБУН Институт мерзлотоведения им.П. И. Мельникова Сибирского отделения РАН; отв. ред.: д.т.н. Р. В. Чжан; д.г.н. А.Н.Фёдоров; д.г.н. М. Н. Григорьев. – Якутск: Издательство ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, 2023. – 243 с.

Веркулич С.Р., Демидов Н.Э., Анисимов М.А. Разработка проекта организации мониторинга многолетнемерзлых грунтов высокоширотной Арктики на базе наблюдательной сети Росгидромета // Российские полярные исследования, 2021, т. 43, №1, с. 23-27.

Гидрогеология СССР Северо-Восток СССР т. 26 / Авт. Зуев И.А., Глотова Л.П., Зеленкевич А.А. и др.; Ред. О. Н. Толстихин, 1972, 296 с.

Глотова Л.П., Глотов В.Е. Роль подземных вод в общем стоке малых горных рек бассейна реки Колымы // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2012, т. 14, №1(9), с. 2321-2324.

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

Илюшина П.Г., Шихов А.Н., Макарьева О.М. Картографирование негативного воздействия золотодобывающих предприятий на природную среду криолитозоны по спутниковым данным (на примере Магаданской области) // Исследование Земли из космоса, 2023, №1, с. 41-52.

Оленченко В.В., Макарьева О.М., Землянкова А.А., Данилов К.П., Осташов А.А., Калганов А.С., Нестерова Н.В., Христофоров И.И. Геофизические признаки источников гигантской наледи на р. Анмангында (Магаданская область) // Геодинамика и тектонофизика, 2023, т. 14, №3.

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, 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), ФГБУ «ВСЕГЕИ».

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

Makarieva O., Nesterova N., Post D., Sherstyukov A., Lebedeva L. Warming temperatures are impacting the hydrometeorological regime of Russian rivers in the zone of continuous permafrost // *The Cryosphere*, 2019, vol.13, pp. 1635–1659.

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 System Science Data*, 2018, vol. 10, №2, pp. 689–710.

Melnikov V.P., Osipov V.I., Brouchkov A.V., Falaleeva A.A., Badina S.V., Zheleznyak M.N. et al. Climate warming and permafrost thaw in the Russian Arctic: Potential economic impacts on public infrastructure by 2050 // *Natural Hazards*, 2022, vol. 112, №. 1, с. 231-251.

Streletskiy D.A., Suter L., Shiklomanov N.I., Porfiriev B.N. & Eliseev D.O. Assessment of climate change impacts on buildings, structures and infrastructure in the Russian regions on permafrost // *Environmental Research Letters*, 2019, vol. 14, №. 2.

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

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

References

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] – М.: Nedra Publisher, 1968, 65 p.

Iliushina P.G., Shikhov A.N., Makarieva O.M. Mapping of the negative impact of gold mining on the natural environment of permafrost zone from satellite

data (case of Magadan region). Issledovanie Zemli iz kosmosa [Earth Observation and Remote Sensing], 2023, №1, p. 41-52 (in Russian).

Olenchenko V.V., Makarieva O.M., Zemlyanskova A.A., Danilov K.P., Ostashov A.A., Kalganov A.S., Nesterova N.V., Khristoforov I.I. Geophysical features of sources of giant aufeis on the Anmangynda river (Magadan region). Geodinamika i tektonofizika [Geodynamics & Tectonophysics], 2023, vol. 14, №3 (in Russian).

Spravochnik po klimatu SSSR Chukotskii natsionalnyi okrug i Magadanskaia oblast [USSR Climate Handbook Chukotsky National District and Magadan Region], vol. 34(2), Moscow, Gidrometeoizdat Publisher, 1966, 288 p (in Russian).

Gidrogeologiya SSSR: Severo-Vostok SSSR [Hydrogeology of the USSR: North-East of the USSR]. Ed. by O.N. Tolstikhin. Moscow, Nedra Publisher, Vol. 26, 1972, 297 p. (in Russian).

Glotova L.P., Glotov V.E. Role of underground waters in the common drain of small mountain rivers at Kolyma River basin // Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2012, vol. 14, №1(9), p. 2321-2324.

Spravka o sostoianii i perspektivakh ispolzovaniia mineralno-syrevoi bazy Magadanskoi oblasti na 15.09.2022, ot 14.01.2021 г. (№ 049-00016-21-00) [Reference on the state and prospects of the mineral-raw material base of the Magadan region on 15.09.2022, from 14.01.2021. (№049-00016-21-00)], VSEGEI.

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: Proceedings of the conference «Modern research on cryospheric transformation and geotechnical safety of structures in the Arctic», 2021, p. 359-362 (in Russian).

Makarieva O., Nesterova N., Post D., Sherstyukov A., Lebedeva L. Warming temperatures are impacting the hydrometeorological regime of Russian rivers in the zone of continuous permafrost // *The Cryosphere*, 2019, vol.13, pp. 1635–1659.

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 System Science Data*, 2018, vol. 10, №2, pp. 689–710.

Melnikov V.P., Osipov V.I., Brouchkov A.V., Falaleeva A.A., Badina S.V., Zheleznyak M.N. et al. Climate warming and permafrost thaw in the Russian Arctic: Potential economic impacts on public infrastructure by 2050 // *Natural Hazards*, 2022, vol. 112, №. 1, c. 231-251.

Streletskiy D.A., Suter L., Shiklomanov N.I., Porfiriev B.N. & Eliseev D.O. Assessment of climate change impacts on buildings, structures and infrastructure in the Russian regions on permafrost // *Environmental Research Letters*, 2019, vol. 14, №. 2.

URL: <http://gtnpdatabase.org/boreholes> (last visited: 10.02.2023)

URL: <http://www.pogodaiklimat.ru> (last visited: 17.02.2023)

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. 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. Proceedings of the Russian Conference with international participation on the occasion of 150th anniversary of M.I. Sumgin*

(March 22–24, 2023). Yakutsk, Melnikov Permafrost Institute SB RAS Press. 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 [Russian Polar researchs], 2021, vol. 43, №1, p. 23-27 (in Russian).

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