

А. А. Баикова^{1,2✉}, А. Н. Шеин,¹ Я. Б. Горелик²

Особенности мониторинга геологической среды застраиваемых территорий Приуральского района ЯНАО

¹ Научный центр изучения Арктики, г. Салехард, Российская Федерация

² Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, г. Тюмень, Российская Федерация
e-mail: aabashkova@yanao.ru

Аннотация. В работе рассматриваются результаты комплексного изучения современного состояния геологической среды территории центральной части Приуральского района ЯНАО. В результате анализа климатических параметров по метеостанции Салехард показано, что за последние 30 лет среднегодовое значение температуры воздуха и количество осадков непрерывно повышается. На практическом примере показано, что кровля мерзлоты в ненарушенных ландшафтах постепенно опускается и происходит ее отрыв от сезонномерзлого слоя. В работе приведены результаты изучения гидрогеологических условий и геохимического опробования грунтовых вод, отобранных на территории г. Салехард и административного центра Приуральского района с. Аксарка. Приведены результаты изучения геоэкологических условий урбанизированных территорий. Определены факторы, оказывающие влияние на изменение геологической среды и показана необходимость ее комплексного изучения. В связи с чем возникает необходимость разработки нормативных документов, регламентирующих проведение мониторинга геологической среды для урбанизированных территорий криолитозоны особенно вблизи южной границы.

Ключевые слова: геологическая среда, мониторинг, гидрогеологические условия, строительство, сезонно действующее охлаждающее устройство, мерзлота, климатические изменения

A. A. Bashkova^{1,2✉}, A. N. Shein¹, Y. B. Gorelik²

Features of monitoring the geological environment of the built-up territories of the Priuralsky district of the YNAD

¹ Arctic Research Center of the Yamal-Nenets Autonomous Okrug, Salekhard, Russian Federation

² Institute of the Earth's Cryosphere of the Tyumen Scientific Center SB RAS,
Tyumen, Russian Federation
e-mail: aabashkova@yanao.ru

Abstract. The paper considers the results of a comprehensive study of the current state of the geological environment in the central part of the Priuralsky district of the Yamalo-Nenets Autonomous District. As a result of an analysis of the air temperature at the Salekhard meteorological station, it has been shown that over the past 30 years, the average annual air temperature and the number of cages have been continuously increasing. A practical example shows that the permafrost roof in undisturbed landscapes gradually descends and it separates from the seasonal layer. The paper presents the results of studying the hydrogeological conditions and geochemical testing of groundwater sampled in the territory of Salekhard and the administrative center of the Priuralsky district of Aksarka village. The results of studying the geoeological conditions of urbanized territories are presented. The factors influencing the change in the geological environment are identified and the need for its comprehensive study is shown. In this regard, there is a need to develop regulatory documents regulating.

Keywords: geological environment, monitoring, hydrogeological conditions, construction, seasonally operating cooling device, permafrost, climatic changes

Введение

Развитие Арктических территорий является одним из приоритетных направлений, обозначенных в плане адаптации экономики Российской Федерации (РФ) до 2035 года. Так как, именно, Арктика играет ключевую роль в обеспечении страны углеводородами. Одним из регионов, являющихся стратегической ресурсной базой РФ, стал Ямало-Ненецкий автономный округ (ЯНАО). Помимо многочисленных месторождений нефти и газа на территории ЯНАО вдоль восточного склона Полярного Урала простирается Сосьвинско-Салехардский бассейн бурого угля [1-2]. Территория распространения угленосного бассейна преимущественно приходится на северную часть Приуральского района.

Приуральский район расположен на северо-западе ЯНАО, на севере район омывается водами Байдарацкой губы Карского моря, а южная часть простирается на Западно-Сибирской равнине (рис. 1). Наличием обширной гидрографии: более 20 000 озер и 400 рек, обуславливается весьма сложные гидрогеологические условия на территории района.



Рис. 1. Схема расположения Приуральского района ЯНАО

Добыча и транспортировка нефти и природного газа, в том числе газового конденсата, требует не только промышленного освоения территории и создания инфраструктуры, но и сохранение ее работоспособного состояния на продолжительный срок (50-70 лет). Строительство на территориях Приуральского района осложняется наличием многолетнемерзлых грунтов (ММГ), которые здесь широко распространены и имеют неоднородное распространение как по площади, так и по глубине. Северная часть представлена преимущественно сплошным распространением мерзлоты (мощность 100-300 м). Южная часть представлена преимущественно ММГ прерывистого и островного распространения, имеющих мощность до 100 м и до 25 м соответственно. Следует отметить, что городские агломерации Салехарда и Лабытнанги расположены на южной границе криолитозоны, которая постоянно изменяется [3]. При столь изменчивом распространении ММГ на территории района свойства геологической среды (ГС) также явля-

ются неоднородными, что значительно затрудняет организацию мониторинга ее состояния. Проблемы возникают не только из-за сложного строения геологической среды, но и ускорившихся в последнее время, процессов деградации мерзлоты ввиду потепления климата.

Методы и материалы

Анализ климатических параметров выполнялся по данным метеостанции Салехард, где наблюдения ведутся с 1982 г. [4]. По результатам статистической обработки полученных данных построены линейные тренды среднегодовых значений температуры воздуха и количества выпавших осадков за период с 1966 по 2023 гг. Для определения зависимости уровня подземных вод от климатических параметров был построен комплексный график за период наблюдения с декабря 2023 по ноябрь 2024 года.

Измерение уровней грунтовых вод велось в 5-ти гидрогеологических скважинах с периодом в 2-4 недели вручную и с помощью гидрогеологической рулетки РГ-ЛМ-30 производства ООО ПКФ Гидэк-Тензор. Скважина ГС-2 оборудована регистратором данных Solinst Levellogger5 Model 3001, который 3 раза в сутки замеряет уровень воды и ее температуру. Снятие данных с датчика производилось вручную с помощью оптического считывателя. В остальных скважинах температура грунтовых вод определялась с периодом в 2-4 недели в ручном режиме с помощью кондуктометра Hydromaster НМ-200.

Измерение температуры грунтов произведено термометрическими косами производства ООО «РУСГЕОТЕХ», г. Москва, в соответствии с п. 6.8 ГОСТ 25358-2020, на глубинах: в пределах первых 5 м – кратным 0,5 м; затем до глубины 10 м – кратным 1 м; свыше 10 м – кратным 2 м, а также на забое скважины [5]. Погрешность калибровки датчиков измерения температуры – 0.1 °С. Данные с приборов поступают на сервер в автоматическом режиме и собираются в единую систему хранения и визуализации геокриологической информации ГИС «ЯМАЛ-АРКТИКА» <https://monitoring.arctic.yanao.ru> [6, 7].

В процессе осуществления мониторинга состояния грунтовых вод ежемесячно производился отбор образцов для определения физических свойств и их химического состава потенциометрическим, флуориметрическим, фотометрическим, гравиметрическим методами и методом ионной хроматографии. Микрокомпонентный состав водных образцов был определен методами масс-спектральным (ICP-MS) анализа и атомно-эмиссионным (ICP-AES) с индуктивно связанной плазмой. Определение концентрации тяжелых металлов и удельной активности радионуклидов производилось методом атомно-адсорбционной спектроскопии.

Статистическая обработка результатов лабораторных определений химического состава вод, удельной активности радионуклидов и концентрации тяжелых металлов в грунтах производилась с помощью программного обеспечения Microsoft Office Excel, Statistica.

Результаты

Изучение текущего состояния ГС застраиваемых территорий Приуральского района выполнялось с целью определения ее геокриологических, гидрогеологических и геоэкологических компонентов, а также определения техноген-

ных факторов, оказывающих на нее своё влияние. Главной особенностью ГС района является неоднородность распространения многолетнемерзлых грунтов и сложное строение геологического разреза, сложенного частым переслаиванием песчанистых и глинистых грунтов, имеющих различную степень льдистости.

Результатом изучения геокриологической составляющей ГС стали данные о температурном состоянии ММГ до глубины 25 м. На примере мониторинга температуры грунта в геотермической скважине, пробуренной на территории Ангальского мыса (г. Салехард) в 1976 г. геологической партией Салехардского комплексного гидрогеологического и инженерно-геологического поста в естественных ландшафтах, можно проследить динамику ее изменения [8]. В 2024 году силами сотрудников «Научного центра изучения Арктики» была пробурена новая скважина в непосредственной близости к скважине, пробуренной в 1976 году, что позволило сравнить результаты измерения температур грунта (рис. 2).

Графики сравнения температурных значений в «архивной» и вновь пробуренной скважинах показали, что за последние 48 лет кровля мерзлоты на территории исследования опустилась с глубины 1 м до 8 м и произошел ее отрыв от сезонномерзлого слоя, а температуры мерзлых грунтов на глубине 10 м повысились с $-2,3^{\circ}\text{C}$ до $-0,2^{\circ}\text{C}$. Освоение данных территорий значительно затрудняется, т.к. наличие оттаивающих ММГ в разрезе требует применения дополнительных способов технической мелиорации грунтовых оснований для сохранения работоспособного состояния возведенных зданий и сооружений.

Все чаще при строительстве на ММГ применяется I принцип использования мерзлых грунтов в основании фундаментов объектов с использованием сезоннодействующих охлаждающих устройств (СОУ). Данный способ позволяет не только в значительной степени понижать температуру ММГ в основании объектов, но и замораживать изначально талые грунты, что полностью меняет геокриологические условия урбанизированных территорий [9, 10]. Именно замораживание талых грунтов устройствами СОУ является одним из основных факторов антропогенного воздействия на ГС, т.к. при их применении происходит закономерное изменение её водообменных функций, связанных с процессами промерзания водонасыщенных грунтов в деятельном слое [11].

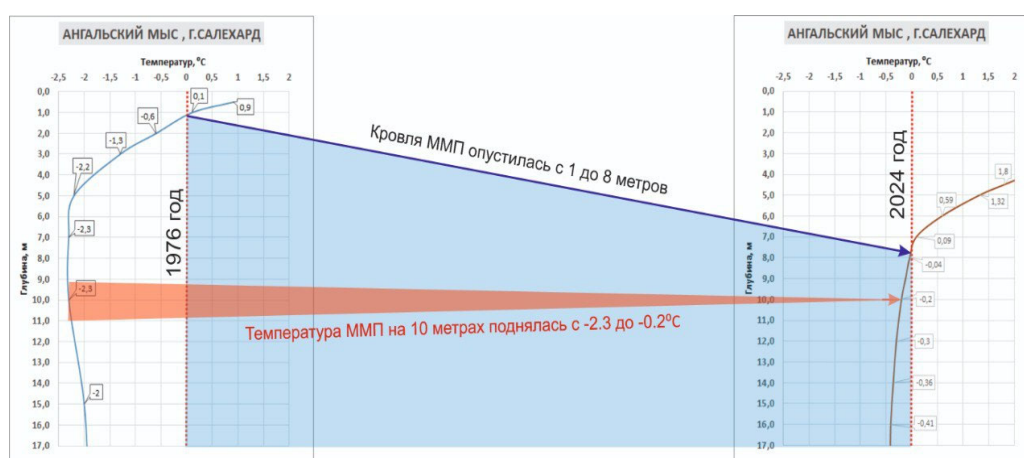


Рис. 2. Сравнительные графики значений температуры грунта в скважинах, пробуренных на территории Ангальского мыса в 1976 и 2024 гг.

Изменение гидрогеологических условий застраиваемых территорий приводит к проявлению таких опасных процессов, как растепление мерзлых пород и размыв грунтового основания объектов при сезонном повышении уровня подземных вод талыми водами, перекрытие путей трассировки и разгрузки подземных вод (барражный эффект), подтопление и заболачивание участков с пониженным рельефом и т.д. Указанные процессы являются еще одним фактором, влиянием которого на ГС, меняет ее состояние в значительной степени.

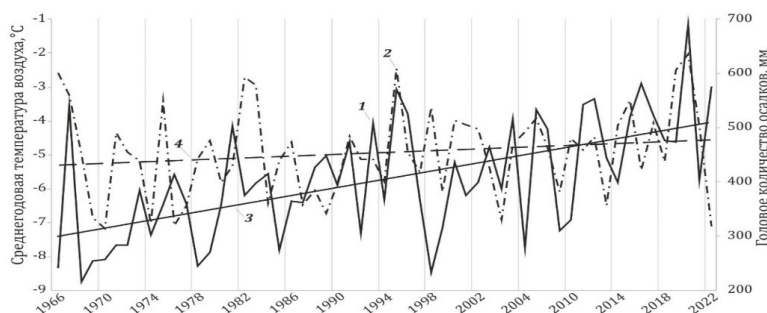


Рис. 3. График многолетней изменчивости (1966–2024 гг.) среднегодовой температуры воздуха и годового количества осадков по данным метеостанции Салехард: 1 – среднегодовая температура воздуха, °C; 2 – среднегодовое количество осадков, мм; 3, 4 – линейные тренды наблюдаемых параметров (температуры и осадков соответственно)

Анализ климатических параметров по данным метеостанции Салехард, позволяет констатировать, что начиная с 1990 года, величина линейного тренда повышения среднегодовой температуры воздуха составила $+0,09$ °C/год, вместе с температурой увеличивается количество осадков (рис. 3) [7]. В настоящее время видимых предпосылок к изменению существующего тренда на потепление не наблюдается. При постепенном повышении среднегодовых температур воздуха и увеличении продолжительности теплого периода года оттаивание ММГ происходит с нарастающей интенсивностью. Это приводит к закономерному образованию таликовых зон, постепенно увеличивающихся в размерах, при этом аккумулируя большое количество подземных вод с последующей их разгрузкой в пониженные формы рельефа, что требует организации регулярного мониторинга гидрогеологической составляющей ГС на урбанизированных территориях.

Результатом изучения гидрогеологической составляющей ГС территории Приуральского района стало получение данных о наличии нескольких выдержанных и невыдержанных горизонтов подземных вод с неоднородным химическим составом. Некоторые из водоносных горизонтов обладают напором.

На основании Методических рекомендаций ВСЕГИНГЕО на территории города Салехард была создана пилотная специализированная сеть наблюдательных гидрогеологических и геотермических скважин для организации регулярного мониторинга состояния подземных вод, их уровня и температурного режима, а также химического состава. Скважины были организованы на всех гео-

морфологических уровнях. Глубина бурения была выбрана с учетом абсолютных отметок устьев скважин и составляла от 10 м на первой надпойменной террасе до 28 м на четвертой.

В процессе бурения наблюдательных скважин было выполнено опробование грунтов с последующим лабораторным определением полного комплекса физико-механических и теплофизических свойств. По результатам статистической обработки лабораторных определений свойств грунта в геологических разрезах было выделено от 3 до 8 инженерно-геологических элементов, что в соответствии с СП 443.135800.2020 (Приложение А, табл. 1), характеризует инженерно-геокриологические условия территории как II-III категория (средней сложности – сложная) (рис. 4).

Наблюдательными гидрогеологическими скважинами были вскрыты подземные воды: ГС-9 приуроченные к надмерзлотным водоносным горизонтам несквозных таликов озерно-аллювиальных отложений (a^1 III-H), ГС-12 озерно-эстуарных отложений (am^4 III), ГС-2 сквозных таликов (a^1 III-H); ГС-6 и ГС-7 локально-водоносного криогенно-таликового харасавэйского аллювиально-морского горизонта (la^3 III). Воды, вскрытые скважинами ГС-6 и ГС-7, пробуренные на территории городской застройки, имеют значительный криогенный напор, достигающий 14 м. Стоит отметить, что воды, опробованные в скважине ГС-7, слабосоленоватые. Это объясняет тот факт, что на дату 12.02.2025 г. их температура имела значение минус 0,3 °С, а сами воды находились в талом состоянии (криопеги). По химическому составу данные воды могут быть использованы для бальнеологических целей, т.к. их минерализация колеблется в пределах значений 1,5-2,0 г/дм³ и в них отмечено высокое содержание органических веществ. Бальнеологические воды с аналогичным химическим составом и свойствами добываются в 450 м от ГС-7, но с глубины 400 м.

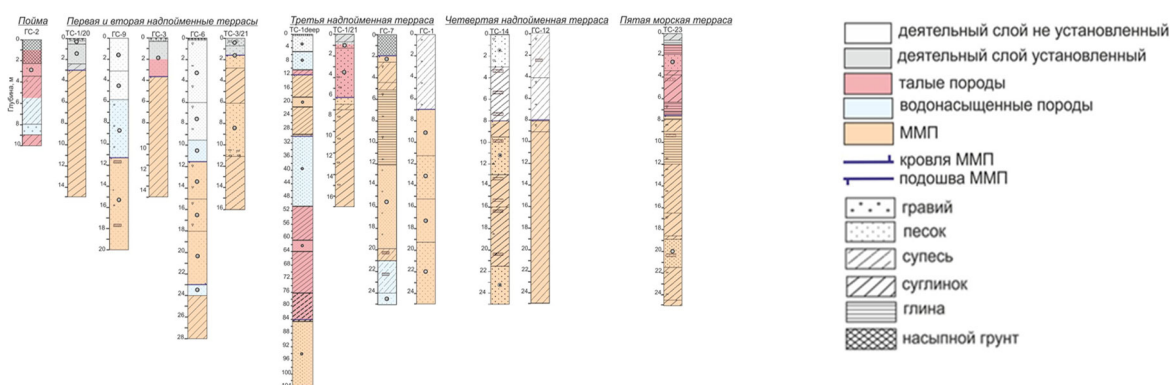


Рис. 4. Литологические колонки наблюдательных гидрогеологических и геотермических скважин, пробуренных на территории г. Салехард и за его пределами, в 2023-2024 гг.

В целом подземные воды, вскрытые и опробованные гидрогеологическими скважинами, преимущественно гидрокарбонатные по анионному составу, по катионному – преимущественно кальциево-магниевого, реже натриево-кальциевого. Минерализация подземных вод изменяется от 100 до 1580 мг/дм³.

В скважине ГС-1, пробуренной техногенно-нарушенных ландшафтах, было отмечено повышенное содержание аммония (до 3 мг/дм³), нефтепродуктов (до 2,0 мг/дм³), фенолов (до 0,109 мг/дм³). По результатам лабораторных определений микрокомпонентного состава в подземных водах, опробованных всеми гидрогеологическими скважинами, были отмечены повышенные значения Al, Mn, Fe, Ni, Pb, Li, Be, Rb, Nb, Mo, Cd, Sb, W, Tl и Br.

В зимний период 2024-2025 года были отобраны образцы подземных вод, вышедших на дневную поверхность в административном центре Приуральского района с. Аксарка, и образовавших массивные наледи в микрорайоне Брусничный и в переулке Поляриков. По водородному показателю воды изменяются от нейтральных до слабощелочных (7,6-8,3), по анионному составу гидрокарбонатные сульфатно-хлоридные, по катионному составу натриево-магниевые-кальциевые. Минерализация вод изменяется в пределах 175-272 мг/дм³.

Результатом изучения геоэкологического компонента ГС стало получение информации о удельной активности естественных дозообразующих радионуклидов (ЕРН) (табл. 1) и концентрации тяжелых металлов (ТМ) (табл. 2) в грунтах, отобранных при бурении всех изучаемых наблюдательных скважин с интервалом 1 м от поверхности до глубины забоя. Результаты лабораторных определений ЕРН и ТМ показали, что в скважине ГС-12 концентрация веществ на глубине 10 м, по всем показателям увеличена в 10 раз по отношению к остальным скважинам. Скважина ГС-12 была пробурена и обустроена в ненарушенных ландшафтах за территорией г. Салехард. Уровень грунтовых вод в данной скважине колеблется в пределах 4,5-5,5 м от уровня земли, а кровля мерзлоты зафиксирована на глубинах 8,5-9,0 м. Наименьшее значение удельной активности радионуклидов ²²⁶Ra (8,0 Бк/кг) и ²³²Th (6,0 Бк/кг) в скважине ГС-9 объясняется интенсивным вымыванием надмерзлотными водами в процессе их трассировки в зону разгрузки.

Таблица 1

Удельная активность радионуклидов в породах, отобранных на глубине 10 м

Наименование скважины	²²⁶ Ra, Бк/кг	²³² Th, Бк/кг	⁴⁰ K, Бк/кг
ГС-9	8,0	6,0	267,0
ГС-11	17,0	6,0	447,0
ГС-12	39,0	36,0	594,0
ТС-14	13,0	16,0	301,0
ГС-6	21,0	17,0	670,0
ГС-7	15,0	17,0	328,0

Таблица 2

Концентрация (мг/кг) тяжелых металлов в породах, отобранных на глубине 10 м

Наименование скважины	Cr	Mn	Cd	Zn	Cu	Pb
ГС-9	5,09	32,0	0,337	3,34	2,30	0,26
ГС-11	4,50	25,3	0,167	5,38	4,47	2,27
ГС-12	28,9	369,0	0,734	84,9	40,0	10,9
ТС-14	3,9	26,0	0,08	0,05	0,05	1,0
ГС-6	4,3	23,0	0,05	3,5	0,05	1,2
ГС-7	5,3	26,0	0,05	3,0	0,05	1,3

Обсуждение

Основываясь на результатах анализа температурных значений грунтов, распределенных по глубине деятельного слоя до 17 м (рис. 2), можно сделать выводы о том, что при существующем тренде на потепление, кровля мерзлоты в естественных ландшафтах южной части Приуральского района продолжит опускаться. Как следствие, для сохранения объектов на продолжительный период (до 70 лет), потребуется либо разработка новых проектных решений, либо повсеместное применение средств технической мелиорации грунтовых оснований (СОУ). Любой сценарий влечёт значительные социально-экономические риски.

По результатам изучения гидрогеологической составляющей ГС Приуральского района, можно констатировать, что опробованные подземные воды обладают весьма пестрым химическим составом. По анионному составу воды преимущественно гидрокарбонатные, реже нитратно-гидрокарбонатные (ГС-9). По катионному составу воды преимущественно магниево-кальциевые или кальциево-магниевые, реже натриево-кальциевые. Минерализация подземных вод изменяется от 100 до 1580 мг/дм³. Практически во всех отобранных водных образцах отмечалось повышенное значение аммония (до 3 мг/дм³), нефтепродуктов (до 2,0 мг/дм³ в скв. ГС-1) и фенолов (до 0,109 мг/дм³). Также стоит отметить повышенное содержание нитратов (до 28 мг/дм³) в скважине ГС-9, что может быть связано, как с результатом многолетней эксплуатации подземных вод на Полуйском месторождении, выраженном в повышении ионов азотной группы, так и с влиянием хозяйственной деятельности на опытном поле, расположенном вблизи скважины. Для получения достоверной информации о гидрогеологической составляющей ГС крайне необходима разработка методических рекомендаций и сводов правил, которые будут регламентировать процесс организации сети наблюдений, обоснования выбора мест расположения наблюдательных гидрогеологических скважин и постов геохимического опробования подземных и поверхностных вод, состав исследований и их периодичность.

Область питания подземных вод Приуральского района приурочена к Сибирским Увалам, что обуславливает низкую природную защищенность водоносных горизонтов от загрязняющих веществ техногенного и природного происхождения [12]. Вертикальный перенос ЕРН и ТМ обусловлен наличием в верхней части разрезов песчанистых грунтов (зона аккумуляции), а горизонтальный перенос осуществляется в процессе транзита грунтовых вод в область разгрузки и в пониженные рельефы. При наличии ММГ, которые являются надежным флюидоупором, на участках аккумуляции грунтовых вод, происходит постепенное накопление веществ на кровле мерзлоты и именно на этих участках в разрезе отмечаются наибольшие значения концентраций (скважина ГС-12). Территория расположения данной скважины требует дальнейшего анализа с установлением причин повышенного содержания ЕРН и ТМ с выявлением источников загрязнения.

Заключение

В процессе выполнения данной работы была достоверно доказана необходимость комплексного изучения геологической среды, как единой системы, со-

стоящей из целого ряда отдельных исследований тесно взаимосвязанных между собой. Изменение геокриологических условий на территории криолитозоны в результате климатических или антропогенных воздействий, неизбежно влечет за собой изменение гидрогеологических и геоэкологических.

Таким образом, при современных климатических трендах и в сложившихся инженерно-геокриологических условиях необходимо предъявлять повышенные требования к принятию проектных решений при строительстве на ММГ и, особенно, вблизи южной границы криолитозоны. Для оценки экономической целесообразности применения того или иного способа технической мелиорации, необходимо организовать комплексный мониторинг всех компонентов геологической среды на всей урбанизированной территории. Актуализация нормативной документации и сводов правил для строительства вблизи южной границ криолитозоны, а также системный, научно-методический подход при выборе принципов использования ММГ в основании фундаментов объектов позволит продлить срок эксплуатации сооружений.

Благодарности

Работа выполнена ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики» в рамках реализации проекта «Методика автоматизированного гидрогеологического мониторинга для расчета и прогноза состояния грунтов основания объектов» при поддержке правительства Ямало-Ненецкого автономного округа, а также госзадания (тема № FWRZ-2021-0007 ИКЗ ТюмНЦ СО РАН). Авторы благодарны специалистам участка инженерных изысканий ГАУ ЯНАО Научный центр изучения Арктики за создание мониторинговой инфраструктуры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бешенцев В. А., Сальникова Ю. И., Абдрашитова Р. Н., Воробьева С. В. Гидрохимические условия нефтегазовых областей Ямало-Ненецкого нефтегазодобывающего региона // Нефть и газ. – 2019. – № 5. – С. 10-22.
2. Пронина Н. В., Макарова Е. Ю., Богомолов А. Х., Митронов Д. В., Кузеванова Е. В. Геология и угленосность Российской Арктики в связи с перспективами развития региона // Георесурсы. – 2019. – Т. 21. – № 2. – С. 42-52.
3. Шеин, А. Н. Обзор научных и производственных работ по изучению многолетнемерзлых пород в естественных и антропогенных условиях / А. Н. Шеин, Я.К. Камнев // Научный вестник ЯНАО. – 2020. – № 3(108). – С. 42-50.
4. Громадский А. Н., Арефьев С. В., Волков Н. Г., Камнев Я. К., Сеницкий А. И. Дистанционный контроль за температурным режимом вечномерзлых грунтов под зданиями г. Салехард // Научный вестник ЯНАО. – 2019. – № 3. – С. 17-21.
5. Шеин А. Н., Башкова А. А. Статистические характеристики данных температурного мониторинга грунтовых оснований фундаментов зданий города Салехарда за 2018–2023 годы как основа для автоматизации процесса первичной обработки данных // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2024. – Т. 30. – № 3. – С. 58-69.
6. System of automated geocryological monitoring. – URL: <https://monitoring.arctic.yanao.ru/> (Accessed 10 March 2025 in Russian).
7. Специализированные массивы для климатических исследований. – URL: <http://www.aisori-m.meteo.ru/waisori/index1.shtml> (дата обращения: 04.02.2025).

8. Грязнов О. М. Комплексная гидрогеологическая, инженерно-геологическая и геоэкологическая съемка листа Q-42-50-A (г. Салехард) масштаба 1:50000. – Екатеринбург, 2004.
9. Башкова А. А., Шеин А. Н., Горелик Я. Б. Мониторинг грунтов основания здания на искусственном новообразовании мерзлоты // Промышленное и гражданское строительство. – 2025. – № 2. – С. 41-51.
10. Хрусталеv Л. Н., Пармузин С. Ю., Емельянова Л. В. Надежность северной инфраструктуры в условиях меняющегося климата. – М.: Университетская книга, 2011. – 259 с.
11. Шевелев В. В. Анализ влияния криолитозоны на водообменные процессы // Геология и инженерная геология. – 2021. – Т. 44. – № 2. – С. 180-190.
12. Бешенцев В. А. Ресурсы подземных вод Ямало-Ненецкого нефтегазодобывающего региона и проблемы их использования // Известия Уральского государственного горного университета. – 2013. – № 2 (30). – С. 15-20.

© А. А. Башкова, А. Н. Шеин, Я. Б. Горелик, 2025