

DOI: 10.25283/2223-4594-2026-2-274-287
УДК 556.314; 550.42; 551.34

ФОРМИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО И ИЗОТОПНОГО СОСТАВА ПОВЕРХНОСТНЫХ И ПОДЗЕМНЫХ ВОД В УСЛОВИЯХ ДЕГРАДАЦИИ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД И ВОЗДЕЙСТВИЯ АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ НА ПРИМЕРЕ СЕЛИТЕБНОЙ ЗОНЫ САЛЕХАРДА

В. А. Паламарчук^{1,2}, И. В. Токарев³, А. А. Башкова^{4,1}, Л. С. Лебедева⁵, Е. П. Чежина⁶

¹ Институт криосферы Земли Тюменского научного центра Сибирского отделения РАН (Тюмень, Российская Федерация)

² Институт геоэкологии имени Е. М. Сергеева РАН (Москва, Российская Федерация)

³ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

⁴ Государственное автономное учреждение Ямало-Ненецкого автономного округа «Научный центр изучения Арктики» (Салехард, Российская Федерация)

⁵ Институт мерзлотоведения имени П. И. Мельникова Сибирского отделения РАН (Якутск, Российская Федерация)

⁶ Санкт-Петербургский государственный университет (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 5 июля 2025 г.

Для цитирования

Паламарчук В. А., Токарев И. В., Башкова А. А. и др. Формирование химического и изотопного состава поверхностных и подземных вод в условиях деградации многолетнемерзлых пород и воздействия антропогенных факторов на примере селитебной зоны Салехарда // Арктика: экология и экономика. — 2026. — Т. 16, № 2. — С. 274—287. — DOI: 10.25283/2223-4594-2026-2-274-287.

Исследование особенностей формирования химического и изотопного состава поверхностных и подземных вод в Салехарде по современным и историческим данным позволило оценить влияние природных (деградация многолетнемерзлых пород) и техногенных факторов на их качество. Отмечается некоторое улучшение качества речных вод вследствие модернизации канализационных очистных сооружений в городе. Однако подземные воды территории до сих пор испытывают сильное антропогенное влияние. Оттаивание мерзлых пород за последние 50 лет привело к формированию водоносного талика в отложениях IV террасы и миграции из отложений таких элементов, как Mn, Fe, Al, Ni, Pb.

Ключевые слова: поверхностные и подземные воды криолитозоны, макрокомпоненты, микроэлементы, стабильные изотопы, Салехард, Западная Сибирь.

Введение

Данные GTN-P (Global Terrestrial Network for Permafrost) свидетельствуют о повсеместном повышении температуры многолетнемерзлых пород (ММП) [1], что приводит к увеличению мощности сезонно-талого слоя (СТС), отступанию кровли ММП и формированию надмерзлотных таликов [2—4]. Эти процессы изменяют водный сток мерзлотных ландшафтов, способствуя увеличению ресурсов

подземных вод, улучшению их связи с атмосферными и поверхностными водами и увеличению времени взаимодействия подземных вод с горными породами [4].

Деградация ММП на севере Западной Сибири, отмечаемая с 1970-х годов, характеризуется устойчивым повышением температуры (0,03—0,06°C/год) и опусканием кровли мерзлых пород [3]. Эти процессы оказывают сложное влияние на гидрохимический режим природных вод: моделирование показывает потенциальное увеличение концентраций металлов (Co, Cu, Fe, Mn) при ча-

© Паламарчук В. А., Токарев И. В., Башкова А. А., Лебедева Л. С., Чежина Е. П., 2026

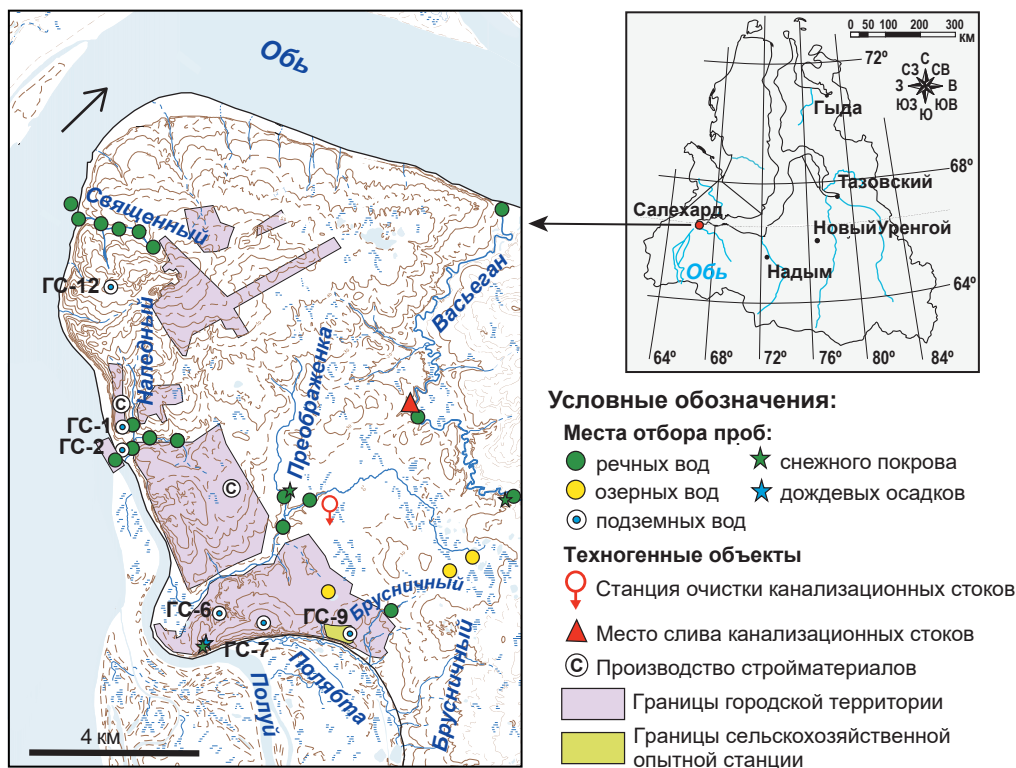


Рис. 1. Территория исследований и места отбора проб воды. Составлено авторами по данным [19]
 Fig. 1. Study Area and Water Sampling Locations. Compiled by the authors based on data from [19]

стичном протаивании и рост стока неорганических компонентов в Карское море до 59% при полной деградации мерзлоты [5]. Другие исследования указывают на то, что таяние мерзлых пород здесь способствует уменьшению выноса органического углерода, P, Si и Fe, увеличению Ca^{2+} , SO_4^{2-} , Sr^{2+} , Ba, Mo и U и слабо влияет на миграцию NO_3^- , B, Li, K^+ , Rb, Cs, Mg, Zn, As, Sb, Cs и Rb [6].

Исследование трансформации изотопного состава вод при таянии ММП требует комплексного подхода с анализом дейтериевого эксцесса d_{exc} , изотопного масс-баланса и дополнительных трассеров [7]. Таяние полигонально-жильных льдов, формирующихся зимними осадками [8], может облегчать изотопный состав вод [9], тогда как промерзание водоносных горизонтов в прошлом приводило к его утяжелению [10]. Совместное влияние оттаивания мерзлоты и испарения с болот увеличивает вариативность изотопных характеристик вод [7].

Помимо климатических изменений на геохимию вод существенно влияют техногенные факторы [11; 12]. В арктических городах антропогенное воздействие приводит к засолению почв, росту минерализации вод, загрязнению тяжелыми металлами и образованию криопэггов [13; 14]. В урбанизированных районах с ливневой канализацией изотопный сигнал рек может быстро меняться после интенсивных осадков из-за их мгновенного попадания в водотоки [15]. Сточные воды часто вызывают утяжеление изотопного состава природных вод [16].

В исследовании рассматривается селитебная зона Салехарда, где за последние 50 лет зафиксировано опускание кровли многолетнемерзлых пород до 8—10 м при околонулевых температурах [17]. Цель настоящей работы — выявление тенденций изменения химического и изотопного состава вод Салехарда на основе оригинальных данных полевых исследований 2023—2025 гг., а также анализа фоновых материалов 2002 и 1954—1983 гг. с оценкой вклада деградации ММП и техногенных факторов.

Методы исследований

Полевыми работами 2023—2025 гг. опробованы речные, озерные и подземные воды на территории Салехарда. Поверхностные воды охарактеризованы при регулярном опробовании рек Васьеган, Преображенка и ручья Наледный. Единично отобраны реки Обь, Полуй и ручьи Брусничный и Священный, а также озера Лебяжье, Безымянное и Молодежное (рис. 1). Поверхностные воды опробовались преимущественно в теплый период года раз в две-три недели.

Гидрогеологическими скважинами (ГС — 6 скважин глубиной 10—25 м) вскрыты подземные воды аллювиальных отложений высокой поймы (ГС-2), I террасы (ГС-9, ГС-6), озерно-аллювиальных отложений III террасы (ГС-1, ГС-7) и аллювиально-эстуарных отложений IV террасы (ГС-12). Водовмещающими породами служат мелко- и среднезернистые пески и супеси. Мощность горизонтов составляет 1—4,5 м,

Проблемы регионов

уровни подземных вод залегают на глубинах 1—5 м. За исключением скважины ГС-2, вскрывшей талик под рекой Полуя, остальные скважины дренируют надмерзлотные воды. Отбор проб подземных вод проводился круглогодично с интервалом 2—4 недели; атмосферные осадки отбирались эпизодически.

Пробы, отобранные до июля 2024 г., исследованы в лаборатории Государственного автономного учреждения Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО) «Научный центр изучения Арктики» (Надым) методами фотометрии, гравиметрии и титриметрии, а отобранные с октября 2024 г. — в лаборатории ООО «ЭкоИнтерСервис» (Салехард) потенциометрическим, флуориметрическим, фотометрическим, гравиметрическим и ионно-хроматографическим методами. Ионный состав вод озер изучался в Ресурсном центре Санкт-Петербургского государственного университета (СПбГУ) на жидкостном хроматографе Shimadzu. Микрокомпонентный состав проб изучен в аналитическом центре Института проблем точной механики и управления РАН (Черноголовка) масс-спектральным (ICP-MS) и атомно-эмиссионным (ICP-AES) методами с индуктивно связанной плазмой. Изотопный состав ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) измерен на лазерном спектрометре Picarro L2130-i (Научный парк СПбГУ). Дейтериевый эксцесс d_{exc} рассчитан как $\delta^2\text{H} - 8\delta^{18}\text{O}$ [18].

Всего отобрано 127 проб для исследования макрокомпонентного состава, 161 — для определения содержания микрокомпонентов и 74 — для изучения стабильных изотопов ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$). Динамика химического состава вод оценена по фондовым данным Салехардского отряда Полуянской комплексной геологоразведочной экспедиции за 1954—1983 гг.: 26 проб подземных вод и гидрогеологической съемки за 2002 г., 55 проб поверхностных вод [19].

Природные и антропогенные условия формирования подземного и поверхностного стоков

Для территории исследования в районе Салехарда (расположен на севере Западно-Сибирской низменности в нижнем течении Оби) характерен резко континентальный тип климата. Среднегодовая температура воздуха за последние 50 лет составляет $-5,7^\circ\text{C}$, а среднегодовое количество осадков равно 455 мм^1 . Мощный снежный покров со средней толщиной 43 см держится с октября по май-июнь.

Осадочный чехол территории сложен плиоцен-четвертичными отложениями речных террас, залегающими с размывом на меловых породах. В минералогическом составе отложений отмечены полевые шпаты, ильменит, лейкоксен, рутил, сфен, амфиболы, циркон, апатит, турмалин и гидрослюда [19].

На территории исследования развиты ММП сплошного типа мощностью от 10—20 до 150—200 м при двух-, трех-, четырех-, а иногда и пяти-

слоином строении. Сквозные талики развиты под руслами Оби и Полуя, несквозные талики приурочены к руслам малых рек и озерам. Около 30% изучаемой площади характеризуется температурами пород от $-0,5^\circ\text{C}$ до $1,5^\circ\text{C}$ [19].

Базисом эрозии является Обь (рис. 1). Среди малых водотоков выделяются: река Васьеган, река Преображенка с заболоченной долиной и ручей Наледный, в среднем течении которого наблюдаются высачивания подземных вод, а зимой формируется наледь мощностью до 1 м. Для всех водотоков характерен режим с выраженным весенне-летним половодьем, устойчивой зимней меженью и преобладающим атмосферным питанием.

В гидрогеологическом отношении Салехард расположен в пределах Нижнеобского бассейна стока подземных вод. В гидрогеологическом строении района участвуют два комплекса: эоцен-четвертичный водоносный комплекс (пресные $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$ воды) и криогенный водоупорный комплекс [19]. Питание подземных вод происходит за счет инфильтрации осадков и перетекания из вышележащих водоносных горизонтов, разгрузка — в долины рек.

Городская инфраструктура Салехарда представлена преимущественно 2—9-этажными зданиями с частично централизованными коммуникациями. До 2020 г. отмечались сбросы сточных вод в речную сеть, однако современные очистные сооружения обеспечивают нормативное качество очищенных стоков, сбрасываемых в реку Васьеган². Дополнительным фактором воздействия являлась деятельность сельскохозяйственной станции (1932—2007 гг.).

Результаты и их обсуждение

Современный химический состав подземных и поверхностных вод

Атмосферные осадки в Ямало-Ненецком автономном округе имеют Ca-Na катионный состав с минерализацией до 20 мг/л [20]. Превалирование Na^+ в их ионном составе связано с поступлением морских аэрозолей с Карского моря [21]. Дождевые осадки в августе-сентябре 2024 г. имели Na-Ca катионный состав. Минерализация снега изменялась от 18 мг/л в начале зимы до 53 мг/л к марту при преобладании Mg-Ca в катионном составе и долей Na^+ и K^+ до 19%-экв. В отдельных пробах зафиксировано присутствие NH_4^+ = 0,6—0,7 мг/л.

Природные воды территории преимущественно нейтральные и слабощелочные за исключением озерных вод, имеющих щелочную и сильнощелочную реакцию (табл. 1). Поверхностные воды относятся к ультрапресным и пресным, подземные — к ультрапресным, пресным и слабосоленатым. В катионном составе вод преобладают ионы Mg^{2+} (28—29%-экв.) и Ca^{2+} (45—50%-экв.). Наиболее широко в речных

¹ Описание массива данных месячных сумм осадков на станциях России. — URL: <http://meteo.ru/data/158-total-precipitation#описание-массива-данных>.

² Справка о современном состоянии подземных вод и опасных экзогенных геологических процессов Ямало-Ненецкого автономного округа за 2022 г.



Рис. 2. Антропогенное воздействие на левый приток реки Преображенка: сток с очистных сооружений (а) и техногенная наледь (б) (В. А. Паламарчук, 13 сентября 2023 г. и 28 марта 2024 г. соответственно)
Fig. 2. Man-made impact on the left feeder of the Preobrazhenka River: (a) runoff from treatment facilities and (b) man-made ice. (V. A. Palamarchuk, September 13, 2023 and March 28, 2024 correspondently)

водах варьируют содержания Na^+ (6—42%-экв.), по-видимому, в связи с вариациями вклада подземного питания. Максимальные концентрации Na^+ отмечены в реке Васьеган и в верховье ручья Брусничный. Среди подземных вод повышенные содержания Na^+ обнаружены в водах скважины ГС-9 (23—41%-экв.) и высачиваниях на склоне ручья Наледный (63%-экв.) во время снеготаяния (07.06.2024). Концентрации K^+ варьируют от 3—4%-экв. в межень до 8—9%-экв. в половодье. Для региона концентрации аммония в поверхностных водах (0,4—0,6 мг/л) превышают рыбохозяйственные нормативы³. По нашим данным, содержание NH_4^+ = 4—21%-экв. Особенно высокие значения зафиксированы в левом притоке реки Преображенка. Превышения ПДК по NH_4^+ также отмечены в подземных водах скважин ГС-2 и ГС-7 (см. табл. 1).

Исследованные воды характеризуются гидрокарбонатным анионным составом (среднее содержание HCO_3^- 88%-экв.) при следующих вариациях

концентраций: SO_4^{2-} = 1—22%-экв. и Cl^- = 1—14%-экв. Анализ вод фонового ручья 1 выявил аномалию SO_4^{2-} , характерную для зон просадок при деградации ММП [22], что указывает на возможный естественный источник сульфатов. В то же время воды левого притока Преображенки демонстрируют повышенные относительно других опробованных вод концентрации SO_4^{2-} , Cl^- , NH_4^+ и фенолов — маркер влияния хозяйственно-бытовых стоков. В ходе полевых работ зафиксированы точки сброса сточных вод с очистных сооружений в приток (рис. 2а), а в зимний период — образование наледи желтоватого оттенка от замерзших стоков (рис. 2б).

Содержания PO_4^{3-} превышают ПДКрх (0,2 мг/л) в водах Васьегана и Преображенки, а также в ручье Брусничном, достигая 0,6—1,0 мг/л. Среди подземных вод некоторое повышение фосфатов наблюдается в водах скважины ГС-12 (0,2—1,8 мг/л). Повышенные концентрации PO_4^{3-} в речных и подземных водах Нижнеобского бассейна описаны в [20]. Концентрации NO_2^- и NO_3^- в среднем составляют 0,026 и 0,280 мг/л соответственно. В воде из скважины ГС-9 обнаружены содержания NO_3^- = 36,7 мг/л (25%-экв.), что связано с деятельностью сельскохозяйственной опытной станции в 1932—2007 гг. По данным [23], почвы на этом участке насыщены доступными соединениями P, K и N до глубин 1,6—2,0 м. По нашим данным, обнаруживается миграция отдельных азотных соединений в грунтовые воды до глубин 5—11 м.

Повышенные концентрации нефтепродуктов и фенолов, превышающие нормативы (см. табл. 1), свидетельствуют о техногенном загрязнении. Пространственное распределение их максимумов четко

³ Справочник по применению региональных значений содержания контролируемых компонентов на региональных полигонах экологического мониторинга при оценке состояния и уровня загрязнения окружающей среды на территории ЯНАО. — Тюмень, 2020. — 16 с.; Приказ Министерства сельского хозяйства РФ «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения. В том числе нормативов допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения» (с изменениями на 10 марта 2020 г.) от 13 декабря 2016 г. № 552; Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. Гигиенические нормативы ГН 2.1.5.1315-03. — М., 2003. — 154 с.

Таблица 1. Осредненный химический состав поверхностных и подземных вод на территории Салехард в 2023—2025 гг., мг/л

Table 1. Average chemical composition of surface and groundwater in the city of Salekhard in 2023—2025, mg/l

№ п/п	Место отбора пробы	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	Минерализация	Нефтепродукты	АП АВ	Фенолы общие
Поверхностные воды																	
1	Река Васьеган, среднее течение	6,9	7,5	3,0	4,6	0,6	0,5	36,6	4,1	2,6	0,01	0,2	0,3	60	0,02	0,03	0
2	Река Васьеган, верхнее течение	6,8	5,9	2,5	4,6	0,5	0,5	36,7	2,9	3,6	0,01	0,2	0,2	58	0,02	0,03	0,01
3	Река Преображенка, верхнее течение	6,6	6,3	2,8	2,8	0,4	0,6	42,9	2,7	1,9	0,01	0,2	0,3	63	0,02	0,04	0
4	Левый приток реки Преображенка	6,5	11,2	3,7	5,9	1,2	1,1	47,4	9,5	8,3	0,01	0,3	0,3	82	0,03	0,08	0,01
5	Ручей Наледный	7,0	21,9	7,7	7,9	1,0	0,5	108,0	13,5	5,5	0,02	0,3	0,1	170	0,02	0,03	0
6	Ручей Брусничный	6,4	4,6	2,3	4,9	0,1	0,6	19,0	4,4	3,3	0,01	0,3	0,4	47	0,02	0,04	0
7	Временный водоток в овраге	7,4	20,0	9,1	8,8	2,6	0,1	318,0	23,9	5,0	0,07	1,5	0,1	468	4,2	0,08	0,05
8	Ручей 1	6,9	2,72	1,30	1,92	0,11	0,30	12,60	5,10	1,46	0	0,20	0,1	26	—	—	—
9	Озеро Лебяжье	10,3	18,3	3,4	5,8	2,9	0,1	66,4	12,7	5,1	—	1,4	0,1	116	—	—	—
10	Озеро Молодежное	9,1	5,7	1,4	1,5	0,6	0,1	26,1	0,6	0,6	—	1,1	0	38	—	—	—
Подземные воды																	
11	ГС-1	6,6	945	23,5	11,8	1,9	1,3	434,4	37,3	12,2	0,01	0,3	0,1	616	1,63	0,08	0,12
12	ГС-2	6,7	54,7	21,5	18,8	5,5	2,0	366,5	20,4	21,4	0,02	0,3	0,2	503	0,35	0,09	0,04
13	ГС-9	6,6	10,4	3,6	11,0	4,5	0,1	54,1	13,0	5,4	0,04	24,5	0,1	127	0,08	0,03	0,02
14	ГС-12	6,6	26,0	17,0	7,49	3,5	0,4	141,3	20,7	2,0	0,03	0,3	0,5	219	0,05	0,03	0
15	ГС-7	6,7	297,3	72,3	19,8	2,8	2,2	938,7	291,0	178,7	0,01	0,3	0,1	1803	0,15	0,08	0,02
16	ГС-6	7,0	13,5	11,3	2,3	0,9	0,1	102,0	3,4	7,8	0,02	0,1	0,1	108	0,41	0,02	0
Атмосферные осадки																	
17	Снег в октябре	7,0	1,3	1,0	0,1	0,2	0,4	13,4	0,3	0,4	0,03	0,5	0,1	18	0,07	0,04	0,01
18	Снег в марте	6,2	1,7	1,0	0,9	0,6	0,4	45,5	0,5	1,4	0,02	0,9	0,1	53	0,06	0,04	0

Примечания: 1. Прочерк — нет данных, 2. Полужирным шрифтом выделены превышения ПДК.

Notes: 1. Dash — no data available. 2. The excess of the maximum permissible concentration is highlighted in bold.

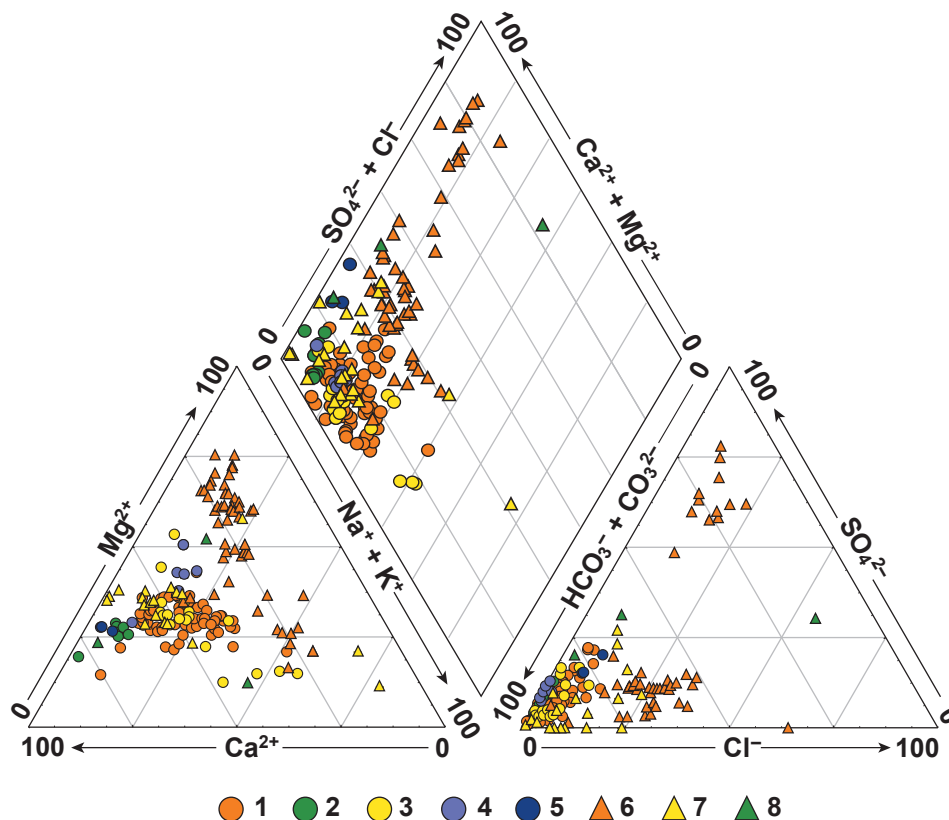


Рис. 3. Соотношения основных ионов в природных водах на территории Салехард в разные годы: 1 – поверхностные воды 2023–2025 гг., 2 – подземные воды (ПВ) в озерно-аллювиальных отложениях 2023–2025 гг., 3 – ПВ в аллювиальных отложениях 2023–2025 гг., 4 – ПВ в аллювиально-эстуарных отложениях 2024–2025 гг., 5 – ПВ скважины ГС-7 2024–2025 гг., 6 – поверхностные воды 2002 г., 7 – ПВ в аллювиальных отложениях 1954–1987 г., 8 – ПВ в озерно-аллювиальных отложениях 1954–1987 г. Составлено авторами с использованием данных [19]

Fig. 3. The ratios of main ions in natural waters in the Salekhard region in different years: 1 – surface water 2023–2025, 2 – groundwater (GW) in lacustrine-alluvial sediments 2023–2025, 3 – GW in alluvial sediments 2023–2025, 4 – GW in alluvial-estuarine sediments 2024–2025, 5 – GW from GS-7 well 2024–2025, 6 – surface water 2002, 7 – GW in alluvial sediments 1954–1987, 8 – GW in lacustrine-alluvial sediments 1954–1987. Compiled by the authors using data from [19]

приурочено к зонам городской и промышленной застройки (см. рис. 1).

Изучены подвижные формы микрокомпонентов в атмосферных осадках, поверхностных и подземных водах в районе Салехарда (табл. 2). Снежный покров обогащен Mn, Fe, Zn и Pb вследствие влияния автотранспорта [24]. Поверхностные воды региона характеризуются повышенными концентрациями Mn = 0,2 мг/л и Fe = 2,5 мг/л, превышающими рыбохозяйственные нормативы. Для природных вод ЯНАО характерны высокие концентрации органического вещества гумусового ряда, обладающего высоким потенциалом накопления марганца и железа [20]. Также в водотоках отмечены превышения ПДК_{рх} Al и V, а в устьях рек зафиксированы повышения содержания Ni и Pb. Максимальные концентрации микрокомпонентов отмечены во временном водотоке, принимающем городской сток. В подземных водах относительно гигиенических нормативов помимо превышений ПДК Al, Mn и Fe отмечены высокие концентрации Ni и Pb, а в скважине ГС-7 — Vg (см. табл. 2).

Динамика химического состава природных вод в Салехарде

За последние 20 лет речные воды в летний период в районе Салехарда стали более пресными, их минерализация понизилась в 1,5 раза за счет уменьшения концентраций основных ионов в 2–14 раз, при этом заметно изменилось соотношение между компонентами химического состава (рис. 3). В 2002 г. в катионном составе речных вод превалировал Mg²⁺ (45%-экв.), в 2023–2025 гг. — Ca²⁺ (45%-экв.). Значительно уменьшилось влияние ионов Cl⁻ и SO₄²⁻ на анионный состав вод. Снизились концентрации NH₄⁺ в речных водах в среднем с 9 до 0,6 мг/л. Тренд на снижение концентраций NH₄⁺, Cl⁻ и SO₄²⁻, вероятно, обусловлен реконструкцией очистных сооружений⁴.

Сопоставление данных 2002 г. и современных измерений микрокомпонентного состава требует осторожности ввиду неидентичности методик. По немногочисленным данным можно предположить

⁴ В Салехарде завершили работы по обновлению КОС. — URL: <https://yamal-media.ru/news/44945>.

Таблица 2. Осредненный микрокомпонентный состав природных вод в районе Салехарда
Table 2. Average micro-component composition of natural waters in the Salekhard area

Элемент	Обь	Васьеган	Преображенка	Наледный	Брусничный	овраг	ГС-1	ГС-2	ГС-12	ГС-9	ГС-7	ГС-6	Снег (осень)	Дождь (август)
мкг/л														
B	18	13	11	15	2	25	30	104	17	55	153	13	2	30
Al	82	123	49	16	63	2386	254	60	617	409	1771	348	75	16
Si	3781	6197	6125	7249	6164	5847	8005	8593	10739	3965	9224	7274	153	284
P	195	176	244	84	244	177	69	83	33	38	201	75	23	29
S	1104	747	1001	4341	185	9502	12333	6532	12194	7016	74799	1267	476	457
Ti	3	3	2	1	1	32	8	3	9	7	18	8	2	< 0,7
V	1	1	1	0	0	8	3	1	2	3	13	5	0	0
Cr	<0,7	0	0	0	0	2	1	1	2	2	5	1	< 0,7	< 0,7
Mn	111	103	317	361	290	1069	2574	4023	1467	236	4489	823	15	11
Fe	2218	1641	3237	1596	5221	3494	11641	8336	974	1050	27421	5075	363	13
Co	0	1	1	0	2	7	17	9	9	9	17	8	0	< 0,1
Ni	2	2	2	1	2	5	13	19	25	18	23	24	1	1
Cu	2	1	1	1	0	34	5	3	8	12	63	5	2	4
Zn	6	3	4	2	3	61	34	171	28	36	89	12	15	9
As	2	2	2	1	3	1	5	3	1	1	7	1	1	0
Br	42	12	11	27	10	60	58	75	78	24	335	33	< 20	< 20
Sr	73	31	49	108	25	283	359	241	89	140	1320	48	7	10
Ba	17	15	15	19	11	81	142	41	30	88	439	22	11	5
Pb	1	0	0	0	0	3	13	16	10	8	52	4	2	0
Li	2	1	1	3	1	2	95	19	14	1	8	3	0	0
нг/л														
Be	25	18	11	4	11	58	42	6	91	50	400	80	8	< 5
Rb	1359	443	530	618	248	2987	1382	1116	1209	2029	4606	938	347	346
Y	484	474	216	91	146	1360	1333	264	2034	2814	11735	2128	141	10
Zr	229	217	154	98	180	367	414	137	142	185	503	46	28	12
Nb	< 5	5	4	3	3	6	13	5	3	4	3	3	< 5	< 5
Mo	159	26	38	56	23	407	1201	2856	349	835	1333	2104	42	22
Cd	21	19	29	6	6	65	38	25	83	79	313	40	70	18
Sn	< 20	16	25	10	10	27	19	83	21	55	140	10	45	86
Sb	66	39	42	36	31	257	179	1163	115	148	136	176	114	71
Cs	6	6	3	1	1	67	51	40	24	18	276	28	12	2
W	< 4	4	9	7	8	1773	207	253	15	61	93	63	15	10
Tl	2	2	1	1	1	16	4	2	9	19	27	6	8	1
Bi	985	23	6	7	3	13	20	36	49	97	81	9	41	15
Th	58	49	22	11	29	113	142	28	129	169	1904	219	7	< 1
U	92	13	9	34	3	665	1310	1011	257	134	1461	248	14	3

увеличение концентраций Fe, Mn и Sr в 2—6 раз и уменьшение концентраций Cu и Zn в 2—5 раз. Объяснение наблюдаемых тенденций имеет комплексный характер. Предположительно рост концентраций Fe, Mn, Sr может быть связан с их естественным поступлением при оттаивании мерзлых торфяников, широко распространенных в водосборах рек региона и обогащенных рядом микрокомпонентов согласно [25]. Снижение концентраций Cu и Zn, наиболее характерных для техногенных источников загрязнения [26], вероятно, объясняется уменьшением антропогенной нагрузки на водосборы,

Подземные воды комплекса аллювиальных отложений характеризуются стабильным $\text{HCO}_3\text{-Mg-Ca}$ составом (см. рис. 3). В 1954—1987 гг. минерализация подземных вод колебалась в пределах 50—534 мг/л, в 2023—2025 гг. она составила 68—605 мг/л. Данные 2002 г. по содержанию микроэлементов (Cu — 32 мкг/л, Zn — 86 мкг/л, Mn — 2,6 мг/л, Ba — 10 мкг/л, Mo — 1 мкг/л, N — 1 мкг/л, Co — 1 мкг/л, V — 2 мкг/л, Cr — 1 мкг/л) существенно отличаются от измерений 2023—2025 гг., когда концентрации многих элементов возросли (см. табл. 2). Все современные скважины находятся в пределах городской черты (ГС-2, ГС-6, ГС-9), что обусловило обнаружение значительного влияния антропогенного фактора.

Водоносный комплекс озерно-аллювиальных отложений охарактеризован слабо (одна скважина пробурена в 1983—1987 гг., вторая, ГС-1, — в 2023 г.). Воды относятся к гидрокарбонатному, реже сульфатно-гидрокарбонатному магниевому-кальциевому типу с минерализацией 100—610 мг/л и повышенным содержанием Fe (11—17 мг/л). Микрокомпонентный состав в 2002 г. охарактеризован пятью элементами (Cu — 60 мкг/л, Zn — 150 мкг/л, Mn — 422 мкг/л, Al — 370 мкг/л, Ba — 10 мкг/л). Современные данные фиксируют рост концентраций микрокомпонентов в скважине ГС-1 (табл. 2), что обусловлено антропогенным воздействием и не отражает региональных природных трендов.

Обнаружение вод в скважине ГС-12 на глубине 8 м в 2024 г. (против их отсутствия в 2002 г. [19]) свидетельствует о формировании надмерзлотного водоносного горизонта из-за деградации ММП [17]. Удаленное расположение скважины минимизирует техногенное влияние, позволяя рассматривать ее как фоновую. Воды относятся к $\text{HCO}_3\text{-Mg-Ca}$ типу с минерализацией 180—240 мг/л.

Повышенные содержания Fe, Mn, Al, Pb, Ni и PO_4^{3-} (см. табл. 1, 2), вероятно, имеют природное происхождение [19; 25].

Наибольшая антропогенная трансформация химического состава подземных вод выявлена в южной части города в скважине ГС-7, пробуренной у здания с поврежденными коммуникациями. Скважиной вскрыты слабосоленоватые воды $\text{HCO}_3\text{-Mg-Ca}$ состава с минерализацией 1,5—2,0 г/л и повышенным содержанием NH_4^+ (см. табл. 1). Содержания многих микрокомпонентов на этом участке в несколько раз повышены относительно вод из других скважин (см. табл. 2). Температура подземных вод равна $-0,2^\circ\text{C}$, что, вероятно, указывает на образование техногенного криопэга, как это описано в [14].

Стабильные изотопы кислорода и водорода в природных водах в районе Салехарда

Для характеристики изотопного состава атмосферных вод были привлечены данные GNIP МАГАТЭ по станции в Салехарде⁵. В 1996—2000 гг. значения $\delta^{18}\text{O}$ в атмосферных осадках варьировали от $-7,6\text{‰}$ до $-30,2\text{‰}$ и $\delta^2\text{H}$ от $-65,9\text{‰}$ до $-236,8\text{‰}$. Средние многолетние содержания составляли (‰): $\delta^{18}\text{O} = -17,4 \pm 5,4$; $\delta^2\text{H} = -136,2 \pm 42,5$, $d_{\text{exc}} = 3,6 \pm 4,1$. Уравнение локальной линии метеорных вод (ЛЛМВ)

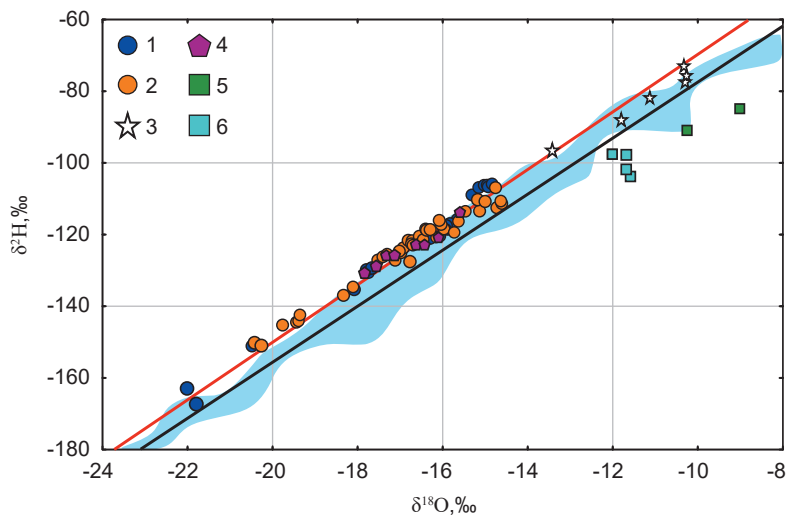


Рис. 4. Соотношения $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ в природных водах в Салехарде: 1 — подземные воды, 2 — поверхностные воды, 3 — дождь (август 2024 г.), 4 — подземные воды 2021 г. [27], 5 — озера (2023 г.), 6 — озера 2021 г. [27], красная линия — глобальная линия метеорных вод (ГЛМВ), черная линия — ЛЛМВ в Салехард в 1996—2000 г., заливкой показана область изотопного состава атмосферных осадков Салехарда. Составлено авторами с использованием данных [27]

Fig. 4. $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ ratios in natural waters in Salekhard: 1 — groundwater, 2 — surface water, 3 — rain (August 2024), 4 — groundwater in 2021 [27], 5 — lakes (2023), 6 — lakes in 2021 [27], black line — GMWL (global meteoric water line), red line — LMWL (local meteoric water line) in Salekhard in 1996—2000, inset shows the area of isotopic composition of atmospheric precipitation in Salekhard. Compiled by the authors using data from [27]

⁵ International Atomic Energy Agency. Available at: <https://nucleus.iaea.org/wiser/explore>.

Таблица 3. Состав стабильных изотопов ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, d_{exc}) природных вод Салехарда в 2024 г.
Table 3. Stable isotopic signature ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, d_{exc}) of natural waters in the city of Salekhard, 2024

Место отбора	Дата отбора	$\delta^{18}\text{O}$, ‰	$\delta^2\text{H}$, ‰	d_{exc}
Река Васъеган, верхнее течение	07.06.2024	-20,4	-150,5	13
	19.06.2024	-19,4	-142,7	12
	16.07.2024	-16,9	-125,1	11
	06.08.2024	-14,7	-106,8	11
	28.08.2024	-16,3	-119,2	11
	18.09.2024	-15,5	-113,7	10
Река Васъеган, среднее течение	16.07.2024	-17,1	-126,9	10
	06.08.2024	-15,2	-110,5	11
	28.08.2024	-15,7	-119,3	7
	18.09.2024	-16,7	-121,7	12
Река Преображенка, верхнее течение	07.06.2024	-19,4	-143,7	11
	19.06.2024	-18,3	-136,7	10
	16.07.2024	-17,0	-124,8	12
	06.08.2024	-16,2	-118,7	11
	28.08.2024	-16,4	-118,5	13
	18.09.2024	-16,0	-116,3	12
Река Преображенка, левый приток	07.06.2024	-19,7	-145,4	13
	19.06.2024	-16,7	-127,3	7
	16.07.2024	-16,2	-120,9	8
	06.08.2024	-15,6	-116,1	9
	28.08.2024	-15,1	-113,6	7
	18.09.2024	-15,0	-111,0	9
Ручей Наледный, среднее течение	07.06.2024	-20,3	-151,2	11
	19.06.2024	-18,1	-134,8	10
	16.07.2024	-16,7	-123,5	10
	09.08.2024	-14,7	-112,8	5
	28.08.2024	-16,8	-122,5	12
	17.09.2024	-16,7	-122,2	11
Ручей Священный, исток	28.08.2024	-16,8	-121,9	13
Ручей Священный, среднее течение	28.08.2024	-17,4	-126,4	13
	28.08.2024	-17,5	-127,3	13
Ручей Священный, нижнее течение	28.08.2024	-17,3	-125,6	13
Ручей Священный, устье	28.08.2024	-16,4	-121,6	10

$\delta^2\text{H} = 7,9\delta^{18}\text{O} + 1,2$, $R = 0,99$. Отобранные в августе и сентябре 2024 г. дождевые осадки имели средний изотопный состав (‰): $\delta^{18}\text{O} = -11,2$; $\delta^2\text{H} = -82,4$, $d_{\text{exc}} = 7,3$.

Речные воды в районе Салехарда имеют средний изотопный состав $\delta^{18}\text{O} = -16,8$ ‰, $\delta^2\text{H} = -123,6$ ‰, $d_{\text{exc}} = 10,3$ ‰, а подземные $\delta^{18}\text{O} = -16,7$ ‰, $\delta^2\text{H} = -123,0$ ‰, $d_{\text{exc}} = 10,8$ ‰, что указывает на общие условия формирования и тесную гидравлическую связь (рис. 4, табл. 3). Практически во всех случаях воды, относящиеся к опробованию 2023—2024 гг., тяготеют к глобальной линии метеорных вод (ГЛМВ), а не ЛЛМВ, рассчитанной по данным наблюдений 1996—2000 гг. Обнаруженный эффект может указывать на изменения условий формирования воздушных масс в районе Салехарда в условиях потепления климата.

В летний сезон наблюдается закономерное утяжеление изотопного состава речных вод (см. табл. 3). В начале июня в период снеготаяния фиксируется наиболее облегченный сигнал, тогда как к августу с установлением межени состав стабилизируется в более тяжелом диапазоне.

Вследствие антропогенного воздействия, установленного выше при анализе химического состава, отдельную специфику демонстрирует река Преображенка. Хотя для ее верхнего течения и левого притока прослеживается увеличение значений $\delta^{18}\text{O}$ в межень (см. табл. 3), общая сезонная динамика изотопного состава выражена слабее по сравнению с другими водотоками на территории исследования. Влияние коммунальных стоков на изотопный состав вод левого притока может проявляться в их «утяжелении» и резких изменениях d_{exc} (см. табл. 3) при смешении речных и сточных вод. Сточные воды, особенно прошедшие этапы испарения и взаимодействия в канализационных системах, часто обогащены тяжелыми изотопами [16].

Окончание табл. 3

Место отбора	Дата отбора	$\delta^{18}\text{O}$, ‰	$\delta^2\text{H}$, ‰	d_{exc}
Река Обь, нижнее течение	28.08.2024	-14,6	-111,1	6
Река Полуй, нижнее течение	09.08.2024	-14,6	-111,6	5
ГС-1	12.04.2024	-17,8	-130,1	12
	07.05.2024	-18,1	-135,5	9
	07.06.2024	-17,7	-130,8	11
	19.06.2024	-17,6	-129,5	12
	17.09.2024	-15,7	-116,1	9
ГС-2	12.04.2024	-16,0	-120,5	8
	07.05.2024	-15,9	-118,2	9
	07.06.2024	-15,9	-117,8	10
	19.06.2024	-15,9	-117,9	10
	16.07.2024	-15,9	-117,6	9
	09.08.2024	-15,9	-117,4	10
	28.08.2024	-15,9	-117,2	10
ГС-12	10.07.2024	-14,8	-105,9	13
	17.07.2024	-14,9	-106,2	14
	05.08.2024	-15,0	-106,3	14
	04.09.2024	-14,9	-106,6	13
	17.09.2024	-15,2	-107,0	14
ГС-9	04.09.2024	-20,5	-150,9	13
	18.09.2024	-21,9	-163,0	13

Для ручья Священного характерно неоднородное распределение изотопного состава по длине водотока — наиболее тяжелые показатели зафиксированы в верховье и устье (под воздействием вод Оби), а в среднем течении происходит облегчение состава за счет притоков (см. табл. 3).

Влияние испарения на изотопный состав поверхностных водотоков хорошо заметно в водах крупных рек Обь и Полуй и озер (см. рис. 3). Озерные воды имеют самый тяжелый изотопный состав из всех опробованных вод (‰) $\delta^{18}\text{O} = -10,9$, $\delta^2\text{H} = -96,2$, $d_{\text{exc}} = -8,2$.

Наличие гидравлической связи с подруслowym таликом Оби [27] обуславливает наиболее стабильный изотопный состав подземных вод аллювиальных отложений высокой поймы, вскрытых скважиной ГС-2 (см. табл. 3). Несколько облегченный изотопный состав этих вод относительно вод подруслового талика может объясняться дополнительной инфильтрацией талых снеговых вод в районе высокой поймы. Подрусловой талик питается в основном за счет фильтрации речной воды, изотопный состав которой уже сбалансирован за счет смешения разных компонентов, включая снеговое питание.

Подземные воды озерно-аллювиальных отложений (скважина ГС-1) характеризуются облегченным изотопным составом (см. табл. 3), что свидетельствует о преобладании в их питании осадков зимнего периода. Образование ледяной пробки в стволе скважины (июль-сентябрь) за счет замерзания изотопно тяжелых летних осадков и ее последующее таяние вызвали кратковременное утяжеление изотопного сигнала в точке отбора (+2‰ по $\delta^{18}\text{O}$, +13,5‰ по $\delta^2\text{H}$).

Самый легкий изотопный состав имеют подземные воды аллювиальных отложений, вскрытые скважиной ГС-9 на опытном поле (см. табл. 3), он близок к изотопному составу зимних атмосферных осадков, что связано с эффективным поглощением снеготалых вод пашней.

Наиболее тяжелый изотопный состав в сочетании с высоким дейтериевым эксцессом зафиксирован в надмерзлотных водах аллювиально-эстуарных отложений на IV террасе из скважины ГС-12 (см. табл. 3). Сочетание обогащения тяжелыми изотопами и высокого дейтериевого эксцесса, вероятно, сформировалось в результате комбинации нескольких процессов. Обогащение тяжелыми изотопами могло произойти в результате протавивания мерзлых пород, а также за счет возрастающего влияния дождевых осадков при увеличении зоны аэрации, в то время как высокий дейтериевый эксцесс может сохраняться благодаря минимальному влиянию испарения. Следовательно, деградация ММП не является непосредственной причиной утяжеления изотопного состава, но опосредованно влияет на него. Сохранение высокого дейтериевого эксцесса указывает на ограниченную роль испарения и, вероятно, вклад зимних осадков в питание подземных вод даже в условиях их обогащения тяжелыми изотопами.

Отдельно следует отметить сложность оценки прямого влияния техногенных факторов на

Проблемы регионов

изотопный состав вод. Изотопная сигнатура коммунальных стоков не обладает уникальными техногенными маркерами и может находиться в пределах диапазона природной изотопной вариативности.

Заключение

Формирование химического и изотопного состава природных вод на территории Салехарда происходит под влиянием двух основных факторов — деградации многолетнемерзлых отложений и высокой антропогенной нагрузки на водные объекты. Их воздействие по-разному отражается на составе речных и грунтовых вод. За последние 20 лет существенно улучшилось качество речных вод — в несколько раз понизились концентрации Cl^- , SO_4^{2-} и NH_4^+ , что мы связываем с уменьшением техногенной нагрузки за счет реконструкции канализационных очистных сооружений. Влияние бытовых стоков на химический и изотопный состав реки Преображенка до сих пор существенно. Усиливается антропогенное влияние на подземные воды города. Деятельность сельскохозяйственной опытной станции в 1937—2002 гг. привела к высоким содержаниям в подземных водах аллювиальных отложений ионов Na и NO_3^- . В южной части города неоднократные прорывы бытовых коммуникаций под жилым зданием, вероятно, привели к формированию криопэга, содержащего слабосоленоватые воды с температурой $-0,2^\circ\text{C}$.

Отступление кровли ММП в отложениях IV террасы за последние 50 лет привело к формированию водоносного горизонта. Обогащение тяжелыми изотопами при сохранении высокого d_{exs} в водах этого горизонта свидетельствует о комплексном воздействии деградации ММП и увеличении долевого вклада дождевых осадков при минимальном влиянии испарения. Повышенные концентрации Fe , Mn , Al , Pb , Ni и PO_4^{3-} здесь могут указывать на их миграцию при оттаивании мерзлых пород.

Разграничение источников поступления химических элементов в природные воды региона требует дальнейших детальных исследований. Повышенные концентрации ионов NH_4^+ , Cl^- , SO_4^{2-} и NO_3^- могут служить индикаторами техногенного влияния, связанного с городскими стоками и сельскохозяйственным загрязнением. Высвобождение Fe , Mn , Al , Pb , Ni , PO_4^{3-} — при деградации ММП, вероятно, является одним из потенциальных природных процессов, влияющих на формирование химического состава природных вод региона.

Изотопный состав природных вод отражает комплексное воздействие климатических и антропогенных факторов. Деградация ММП опосредованно влияет на изотопный сигнал, создавая условия для усиленной инфильтрации летних осадков с тяжелым изотопным составом в надмерзлотные воды. Антропогенная нагрузка проявляется в нарушении естественной сезонной динамики изотопного состава малых водотоков, однако прямое влияние сточных

вод затруднено для оценки из-за отсутствия уникальных техногенных изотопных маркеров.

Финансирование

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FWRZ-2026-0016, ИКЗ ТюмНЦ СО РАН) и НИОКТР (№ 126020516689-6, ИМЗ СО РАН). Лабораторные анализы химического состава вод выполнены ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики». Изотопный состав определен в РЦ РДМИ Научного парка СПбГУ (проект № 125021702335-5).

Благодарность

Авторы признательны А. Н. Шеину и А. П. Гинзбургу за помощь в проведении полевых работ.

Литература/References

1. Biskaborn B. K. et al. Permafrost is warming at a global scale. *Nature communications*, 2019, vol. 10, no. 1, p. 264. DOI: 10.1038/s41467-018-08240-4.
2. Lebedeva L. S. et al. Suprapermafrost subaerial taliks, central Yakutia, Shestakovka River basin. *Earth's Cryosphere*, 2019, vol. 23, no. 1, pp. 35—44. DOI: 10.21782/EC2541-9994-2019-1(35-44).
3. Vasiliev A. A. et al. Permafrost degradation: Results of the long-term geocryological monitoring in the western sector of Russian Arctic. *Cryosphere of the Earth*, 2020, vol. 24, no. 2, pp. 15—30. DOI: 10.21782/EC2541-9994-2020-2(14-26).
4. Jin H., Huang Y., Bense V. F., Ma Q., Marchenko S. S., Shepelev V. V., Hu Y., Liang S., Spektor V. V., Jin X. et al. Permafrost Degradation and Its Hydrogeological Impacts. *Water*, 2022, 14, 372. DOI: 10.3390/w14030372.
5. Frey K. E., Siegel D. I., Smith L. C. Geochemistry of west Siberian streams and their potential response to permafrost degradation. *Water Resour. Res.*, 2007, 43. Available at: <https://doi.org/10.1029/2006WR004902>.
6. Pokrovsky O. S. et al. Impact of permafrost thaw and climate warming on riverine export fluxes of carbon, nutrients and metals in Western Siberia. *Water*, 2020, vol. 12, no. 6, p. 1817. Available at: <https://doi.org/10.3390/w12061817>.
7. Ala-Aho P. et al. Permafrost and lakes control river isotope composition across a boreal Arctic transect in the Western Siberian lowlands. *Environmental Research Letters*, 2018, vol. 13, no. 3, p. 034028. DOI: 10.1088/1748-9326/aaa4fe.
8. Буданцева Н. А., Васильчук Ю. К. Соотношение изотопных параметров $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ в позднплейстоценовых и голоценовых повторно-жильных льдах // Арктика и Антарктика. — 2021. — № 3. — С. 19—43. — DOI: 10.7256/2453-8922.2021.3.36636.
9. Буданцева Н. А., Васильчук Ю. К. The Ratio of Isotopic Parameters $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ in Late Pleistocene and Holocene Ice Wedges. *Arctic and Antarctic*, 2021, no. 3, pp. 19—43. DOI: 10.7256/2453-8922.2021.3.36636. (In Russian).

9. Лепокурова О. Е., Иванова И. С., Пыряев А. Н. Использование стабильных изотопов водорода, кислорода и углерода при интерпретации условий формирования поверхностных водных объектов Ямало-Ненецкого автономного округа // Изв. Томского политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. — 2023. — Т. 334, № 6. — С. 7—19. — DOI: 10.18799/24131830/2023/6/4038.
- Lepokurova O. E., Ivanova I. S., Pyryaev A. N. Stable isotopes of hydrogen, oxygen and carbon when interpreting formation conditions of surface water bodies of Yamal-Nenets Autonomous Area. Bull. of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering, 2023, vol. 334, no. 6, pp. 7—19. DOI: 10.18799/24131830/2023/6/4038. (In Russian).
10. Tokarev I., Poturay V., Yakovlev E. Estimation of the thermal water formation at the Kuldur site (Amur region, Russia) according to water isotope composition (^2H , ^{18}O). Environmental Earth Sciences, 2024, vol. 83, no. 4, p. 126. Available at: <https://doi.org/10.1007/s12665-024-11422-7>.
11. Booth D. B., Roy A. H., Smith B., Capps K. A. Global perspectives on the urban stream syndrome. Freshwater Science, 2016, vol. 35, no. 1, pp. 412—420. Available at: <https://doi.org/10.1086/684940>.
12. Гурлев И. В., Макоско А. А., Малыгин И. Г. Экологические проблемы Арктической зоны России на примере Ямало-Ненецкого автономного округа // Арктика: экология и экономика. — 2024. — Т. 14, № 3. — С. 370—383. — DOI: 10.25283/2223-4594-2024-3-370-383.
- Gurlev I. V., Makosko A. A., Malygin I. G. Ecological problems of the Russian Arctic Zone on the example of the Yamal-Nenets Autonomous Area. Arctic: Ecology and Economy, 2024, vol. 14, no. 3, pp. 370—383. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-3-370-383. (In Russian).
13. Базова М. М., Кошевой Д. В. Оценка современного состояния качества вод Норильского промышленного района // Арктика: экология и экономика. — 2017. — № 3 (27). — С. 49—60. — DOI: 10.25283/2223-4594-2017-3-49-60.
- Vazova M. M., Koshevoi D. V. The assessment of the current state of water quality in the Norilsk industrial region. The Arctic: Ecology and Economy, 2017, no. 3 (27), pp. 49—60. DOI: 10.25283/2223-4594-2017-3-49-60. (In Russian).
14. Павлова Н. А., Данзанова М. В. Геоэкологическая обстановка на урбанизированной территории Центральной Якутии // Экология урбанизир. территорий. — 2018. — № 1. — С. 71—76. — DOI: 10.24411/1816-1863-2018-11071.
- Pavlova N. A., Danzanova M. V. Geoecological situation in urbanized areas of Central Yakutia. Ekologiya urbanizirovannykh territorii [Ecology of Urbanized Areas], 2018, no. 1, pp. 71—76. DOI: 10.24411/1816-1863-2018-11071. (In Russian).
15. Васильчук Ю. К., Буданцева Н. А. Изменчивость изотопно-кислородного состава реки Яузы в пределах города Москвы в 2019—2021 гг. под влиянием снеготаяния и сильных дождей // Вод. ресурсы. — 2024. — Т. 51, № 2. — С. 170—178. — DOI: 10.31857/S0321059624020033.
- Vasil'chuk Yu. K., Budantseva N. A. Variability of the Oxygen Isotope Composition of the Yauza River within Moscow City in 2019—2021 under the Influence of Snowmelt and Heavy Rains. Water Resources, 2024, vol. 51, no. 2, pp. 170—178. DOI: 10.31857/S0321059624020033. (In Russian).
16. McCance W. et al. Combining environmental isotopes with Contaminants of Emerging Concern (CECs) to characterise wastewater derived impacts on groundwater quality. Water Research, 2020, vol. 182, p. 116036. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116036>.
17. Demidov N. E. et al. Conception and first results of the Russian National System of Background Permafrost Monitoring. Adv. Polar Sci., 2025, vol. 36, no. 1, pp. 51—60. DOI: 10.12429/j.advps.2024.0036.
18. Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation. Tellus, 1964, vol. 16, iss. 4, pp. 436—468.
19. Инженерно-геологические условия долинных областей криолитозоны ЯНАО и их трансформация под воздействием техногенеза / Под ред. проф. О. Н. Грязнова. — Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2014. — 198 с.
- Engineering-Geological Conditions of Valley Areas in the Yamal-Nenets Autonomous District Permafrost Zone and Their Transformation Under Technogenic Impact. Ed. by Prof. O. N. Gryaznov. Yekaterinburg, UGGU Publishing House, 2014, 198 p. (In Russian).
20. Бешенцев В. А., Иванов Ю. К., Бешенцева О. Г. Экология подземных вод Ямало-Ненецкого автономного округа / Ин-т геологии и геохимии УрО РАН. — Екатеринбург, 2005. — 165 с.
- Beshentsev V. A., Ivanov Yu. K., Beshentseva O. G. Ecology of Groundwater in the Yamal-Nenets Autonomous Area. Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Yekaterinburg, 2005, 165 p. (In Russian).
21. Куценогий К. П., Трубина Л. К. Комплексный мониторинг атмосферных аэрозолей Сибири // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2005. — Т. 5. — С. 9—18.
- Kutsenogiy K. P., Trubina L. K. Comprehensive monitoring of atmospheric aerosols in Siberia. Interekspo Geo-Sibir [Interexpo Geo-Siberia], 2005, vol. 5, pp. 9—18. (In Russian).
22. Солдатова Е. А. и др. Особенности формирования химического состава поверхностных вод арктических территорий Западной Сибири // Геохимия. — 2022. — Т. 67, № 11. — С. 1142—1156. — DOI: 10.31857/S0016752522100090.
- Soldatova E. A. et al. Features of the Chemical Composition Formation of Surface Waters in the Arctic Territories of Western Siberia. Geochemistry International, 2022, vol. 67, no. 11, pp. 1142—1156. DOI: 10.31857/S0016752522100090. (In Russian).
23. Nizamutdinov T., Suleymanov A., Morgun E., Yakkonen K., Abakumov E. Soils and olericultural prac-

tices in circumpolar region of Russia at present and in the past. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2022, vol. 6, p. 1032058. Available at: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.1032058>.

24. Печкин А. С., Шинкарук Е. В., Красненко А. С. Экологический мониторинг снежного покрова города Надым // Науч. вестн. Ямало-Ненец. автоном. округа. — 2022. — № 4 (117). — С. 52—73. — DOI: 10.26110/ARCTIC.2022.117.4.003.

Pechkin A. S., Shinkaruk E. V., Krasnenko A. S. Ecological monitoring of snow cover in Nadym city. Nauchnyi vestnik Yamalo-Nenetskogo avtonomnogo okruga [Scientific Bulletin of Yamal-Nenets Autonomous Area], 2022, no. 4 (117), pp. 52—73. DOI: 10.26110/ARCTIC.2022.117.4.003. (In Russian).

25. Stepanova V. M., Pokrovsky O. S., Viers J., Mironycheva-Tokareva N. P., Kosykh N. P., Vishnyakova E. K. Major and trace elements in peat profiles in Western Siberia: Impact of the landscape context, latitude and permafrost coverage. *Appl. Geochem.*, 2015, vol. 53, pp. 53—70. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.12.004>.

26. Хажеева З. И., Санжанова С. С. Химический состав сточных вод очистных сооружений и снижение подвижности тяжелых металлов в результате известкования иловых осадков // Вода: химия и экология. — 2018. — № 7—9. — С. 69—74.

Khazheeva Z. I., Sanzhanova S. S. Chemical Composition of Wastewater from Treatment Facilities and Reduction of Heavy Metal Mobility as a Result of Lime Treatment of Sludge Sediments. Water: Chemistry and Ecology, 2018, no. 7—9, pp. 69—74. (In Russian).

27. Токарев И. В., Исаков В. А., Исакова Т. Н. Использование изотопных методов для оценки условий формирования ресурсов и запасов подземных вод // Разведка и охрана недр. — 2024. — № 1. — С. 74—82. — DOI: 10.53085/0034-026X_2024_1_74.

Tokarev I. V., Isakov V. A., Isakova T. N. Use of isotopic methods for assessing the conditions of formation of groundwater resources and reserves. Razvedka i okhrana nedr, 2024, no. 1, pp. 74—82. DOI: 10.53085/0034-026X_2024_1_74. (In Russian).

Информация об авторах

Паламарчук Валентина Анатольевна, младший научный сотрудник, Институт криосферы Земли Тюменского научного центра Сибирского отделения РАН (625026, Россия, Тюмень, ул. Малыгина, д. 86); аспирант, Институт геоэкологии им. Е. М. Сергеева РАН (107045, Россия, Москва, Уланский пер., д. 13, стр. 2), e-mail: palamarchuk97@inbox.ru.

Токарев Игорь Владимирович, доктор геолого-минералогических наук, главный специалист, проблемная лаборатория глубинной метагеологии, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II (199106, Россия, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21-я линия, д. 2), e-mail: tokarevigor@gmail.com.

Башкова Анна Александровна, научный сотрудник, Государственное автономное учреждение ЯНАО «Научный центр изучения Арктики» (629008, Россия, Салехард, ул. Республики, д. 20); аспирант, Институт криосферы Земли Тюменского научного центра Сибирского отделения РАН (625026, Россия, Тюмень, ул. Малыгина, д. 86), e-mail: aabashkova@yanao.ru.

Лебедева Людмила Сергеевна, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова Сибирского отделения РАН (677010, Россия, Якутск, Мерзлотная ул., д. 36), e-mail: lyudmilaslebedeva@gmail.com.

Чежина Елизавета Павловна, аспирант, Санкт-Петербургский государственный университет (199155, Россия, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7-9), e-mail: e.p.chezchina@spbu.ru.

FORMATION OF THE CHEMICAL AND ISOTOPIC COMPOSITION OF SURFACE AND GROUNDWATER UNDER CONDITIONS OF PERMAFROST DEGRADATION AND MAN-MADE IMPACT IN TERMS OF THE SALEKHARD URBAN AREA

Palamarchuk, V. A.^{1,2}, Tokarev, I. V.³, Bashkova, A. A.^{4,1}, Lebedeva, L. S.⁵, Chezhina, E. P.³

¹ Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences (Tyumen, Russian Federation)

² Sergeev Institute of Environmental Geoscience of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

³ Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University (Saint Petersburg, Russian Federation)

⁴ Arctic Research Centre of the Yamal-Nenets Autonomous Area (Salekhard, Russian Federation)

⁵ Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Yakutsk, Russian Federation)

⁶ Saint Petersburg State University (Saint Petersburg, Russian Federation)

The article was received on July 5, 2025

For citing

Palamarchuk V. A., Tokarev I. V., Bashkova A. A., Lebedeva L. S., Chezhina E. P. Formation of the chemical and isotopic composition of surface and groundwater under conditions of permafrost degradation and man-made impact in terms of the Salekhard urban area. *Arctic: Ecology and Economy*, 2026, vol. 16, no. 2, pp. 274—287. DOI: 10.25283/2223-4594-2026-2-274-287. (In Russian).

Abstract

A study of the chemical and isotopic composition of surface and groundwater in Salekhard using modern and historical data allowed the authors to assess the impact of natural (permafrost degradation) and man-made factors on their quality. Some improvement in river water quality has been noted due to the modernization of the city's wastewater treatment facilities. However, groundwater in the area is still under significant man-made impact. Thawing of permafrost over the past 50 years has led to the formation of water-bearing taliks in the fourth-terrace sediments and the migration of elements including Mn, Fe, Al, Ni and Pb from the sediments.

Keywords: *surface and underground waters of permafrost zone, macro-components, trace elements, stable isotopes, Salekhard, Western Siberia.*

Funding

The study was supported by the State Assignment (no. FWRZ-2026-0016, IKZ TyumSC SB RAS) and R&D (no. 126020516689–6, IMZ SB RAS). Water chemical analyses were conducted by the GAU YANAO NCIA. Isotopic analysis was performed at the Centre for X-ray Diffraction Studies of Saint Petersburg State University within the framework of the project 125021702335-5.

Acknowledgements

The authors are grateful to A. N. Shein and A. P. Ginzburg for their assistance with fieldwork.

Information about the authors

Palamarchuk, Valentina Anatolievna, Junior Researcher, Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Centre, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (86, Malygina St., Tyumen, Russia, 625026); PhD student, Sergeev Institute of Environmental Geoscience of the Russian Academy of Sciences (13, p. 2, Ulansky Lane, Moscow, Russia, 107045), e-mail: palamarchuk97@inbox.ru.

Tokarev, Igor Vladimirovich, Doctor of Geology and Mineralogy, Leading Researcher, Problem Laboratory of Deep Metageology, Empress Catherine II St. Petersburg Mining University (21st Line, 2, Vasilievsky Island, St. Petersburg, Russia, 199106), e-mail: tokarevigor@gmail.com.

Bashkova, Anna Alexandrovna, Senior Researcher, Arctic Research Center of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug (20, Republika St., Salekhard, Russia, 629008); PhD student, Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Centre, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (86 Malygina St., Tyumen, Russia, 625026), e-mail: aabashkova@yanao.ru.

Lebedeva, Lyudmila Sergeevna, PhD in Geographic Sciences, Leading Researcher, Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (36, Merzlotnaya St., Yakutsk, Russia, 677010), e-mail: lyudmilaslebedeva@gmail.com.

Chezhina, Elizaveta Pavlovna, Postgraduate Student, Saint Petersburg State University (7-9, Universitetskaya Emb., St. Petersburg, Russia, 199155), e-mail: e.p.chezhina@spbu.ru.