
НАУКИ О ЗЕМЛЕ
И ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

Научная статья

УДК 550.461

DOI: 10.7868/S3034530825050062

Оценка влияния объектов накопленного вреда на качество источников нецентрализованного водоснабжения поселка городского типа Ярославский (Приморский край, Россия)

А.В. Ветошкина✉, И.А. Тарасенко, А.С. Холодов, Е.А. Вах

Алена Владимировна Ветошкина

научный сотрудник

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

vetoshkina.alena@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9791-2644>

Ирина Андреевна Тарасенко

доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

профессор

Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

tarasenko_irina@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4612-0708>

Алексей Сергеевич Холодов

кандидат географических наук, старший научный сотрудник

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

alex.holodov@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-6916-0596>

Елена Александровна Вах

кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

adasea@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6690-6505>

Аннотация. В статье рассмотрено влияние накопленных отходов горно-перерабатывающего производства (хвостов обогащения) на качество подземных вод, используемых населением пгт Ярославский (Приморский край) для нецентрализованного водоснабжения. Приведен углубленный анализ гидрогеохимических процессов, определяющих миграцию загрязнителей из хвостов обогащения флюоритовых руд в подземные водоносные горизонты. Выявлено, что воды хвостохранилища обладают повышенной минерализацией и содержат токсичные компоненты (Be, As, Li, Cd и др.), относящиеся к 1–2-му классам опасности. Проведена оценка токсикологического риска: установлено незначительное превышение предельно допустимой концентрации Mn в одном из источников водоснабжения, тогда как

концентрации других контролируемых элементов находятся ниже нормативных уровней. Описаны методы и индикаторы оценки загрязненности подземных вод (сравнение с санитарными нормативами, интегральные индексы загрязнения). Предложены рекомендации по мониторингу и управлению рисками, включая постоянный контроль качества воды, усиление дамб хвостохранилища и профилактику аварийных ситуаций. Сделан вывод, что на данный момент качество исследованных подземных вод удовлетворяет санитарным требованиям, однако сохраняется потенциальный риск загрязнения при нарушении устойчивости хвостохранилища или при экстремальных природных явлениях.

Ключевые слова: хвостохранилище, подземные воды, миграция загрязнителей, токсикологический риск, гидрогеохимия, мониторинг, Приморский край

Для цитирования: Ветошкина А.В., Тарасенко И.А., Холодов А.С., Вах Е.А. Оценка влияния объектов накопленного вреда на качество источников нецентрализованного водоснабжения поселка городского типа Ярославский (Приморский край, Россия) // Вестн. ДВО РАН. 2025. № 5. С. 78–96. <http://dx.doi.org/10.7868/S3034530825050062>

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования России для ДВГИ ДВО РАН.

Original article

Assessment of the impact of the objects of accumulated environmental damage on the quality of the decentralized water supply sources in Yaroslavsky settlement (Primorsky Territory, Russia)

A.V. Vetoshkina, I.A. Tarasenko, A.S. Kholodov, E.A. Vakh

Alyona V. Vetoshkina

Researcher

Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

vetoshkina.alena@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9791-2644>

Irina A. Tarasenko

Doctor of Science in Geology and Mineralogy, Leading Researcher

Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

Professor

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

tarasenko_irina@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4612-0708>

Aleksei S. Kholodov

Candidate of Science in Geography, Senior Researcher

Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

alex.holodov@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-6916-0596>

Elena A. Vakh

Candidate of Science in Geology and Mineralogy, Senior Researcher

Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

adasea@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6690-6505>

Abstract. This article examines the impact of accumulated mining and processing waste (tailings) on the quality of groundwater used by the population of the Yaroslavsky settlement in Primorsky Territory for non-centralized water supply. It provides an in-depth analysis of the hydrogeochemical processes that determine the migration of pollutants from fluorite ore tailings into groundwater horizons. The study reveals that the mineralization of the tailing dump's waters has increased and they contain toxic components (Be, As, Li, Cd, etc.) belonging to hazard classes 1–2. A toxicological risk assessment was carried out, revealing a slight exceedance of the maximum permissible concentration of Mn in one of the water supply sources, while concentrations of other monitored elements are below normative levels. Methods and indicators for assessing groundwater pollution (e.g. comparison with sanitary norms and integral pollution indices) are described. Recommendations for monitoring and risk management are proposed, including continuous water quality control, tailings dam reinforcement and emergency situation prevention. It is concluded that, currently, the quality of the studied groundwater meets sanitary requirements. However, there is still a potential risk of contamination in the event of tailings dam instability or extreme natural occurrences.

Keywords: tailing dump, groundwater, pollutant migration, toxicological risk, hydrogeochemistry, monitoring, Primorsky Territory

For citation: Vetoshkina A.V., Tarasenko I.A., Kholodov A.S., Vakh E.A. Assessment of the impact of the objects of accumulated environmental damage on the quality of the decentralized water supply sources in Yaroslavsky settlement (Primorsky Territory, Russia). *Vestnik of the FEB RAS*. 2025;(5):78–96. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.7868/S3034530825050062>

Funding. The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for the Far East Geological Institute, FEB RAS.

Введение

Централизованные системы водоснабжения являются ключевым элементом инфраструктуры современных городов и поселков, обеспечивая население питьевой водой [1]. Однако износ коммуникаций и ухудшение качества водопроводной воды ведут к снижению доверия населения к централизованным источникам водоснабжения. Например, во Владивостоке в 2000–2005 гг. выявлена связь заболеваемости населения с употреблением водопроводной воды, не отвечающей нормативам по ряду показателей [2]. Это обусловило рост интереса населения к альтернативным источникам питьевой воды – прежде всего подземным (колодцам, скважинам, родникам). Подземные воды нередко воспринимаются как более чистые и даже целебные, хотя эти качества не всегда подтверждены лабораторно. Стихийное использование нецентрализованных источников несет риски для здоровья из-за отсутствия должного контроля качества и соответствия санитарным нормам.

В поселке городского типа (пгт) Ярославский Приморского края распространено использование альтернативных источников водоснабжения местными жителями. Наибольшей популярностью пользуются два родника, общественный колодец и самоизливающаяся скважина на ул. Комсомольской. Однако колодец и скважина расположены в зоне потенциального влияния хвостохранилища Ярославского горно-обогатительного комбината (ГОКа) – объекта накопленного экологического вреда. Деятельность данного ГОКа (единственного в России производителя флюоритового концентрата) остановлена в 2013 г., но хвостохранилище продолжает представлять опасность. Известно, что хвостохранилища – источник повышенной экологической опасности, обусловленной риском загрязнения подземных вод в результате фильтрации загрязненных вод в подземные горизонты [3–11]. Даже при соблюдении проектных решений при строительстве и эксплуатации хвостохранилищ практически невозможно полностью исключить их негативное воздействие на окружающую среду. Таким образом, существует вероятность загрязнения подземных вод, питающих альтернативные источники, компонентами, вымываемыми из накопленных отходов.

Цель настоящего исследования – оценить влияние хвостохранилища Ярославского ГОКа на качество воды в нецентрализованных источниках водоснабжения пгт Ярославский (родники, колодцы, самоизливающаяся скважина). Исследование направлено на выявление фактов и масштабов техногенного загрязнения подземных вод для обеспечения безопасности питьевой воды, используемой населением.

Объект исследования

Объект исследования – хвостохранилище Ярославского горно-обогатительного комбината и прилегающие подземные водоносные горизонты. Ярославский ГОК проводил добычу и обогащение флюоритовых руд (производство плавикового шпата) из крупнейших в России Вознесенского и Пограничного месторождений, расположенных в Хорольском районе Приморского края (рис. 1). Уникальность руд этих месторождений заключается в присутствии помимо флюорита стратегически важных элементов – бериллия, лития, рубидия и цезия. Щелочные металлы (Li, Rb, Cs) и бериллий входят в состав минералов, сопутствующих флюориту (например, слюд и берtrandита), и в процессе флотационного обогащения переходят в хвосты обогащения. В результате в хвостохранилище концентрируются не только основной минерал – флюорит (CaF_2), но и ряд потенциально токсичных элементов [12–14].

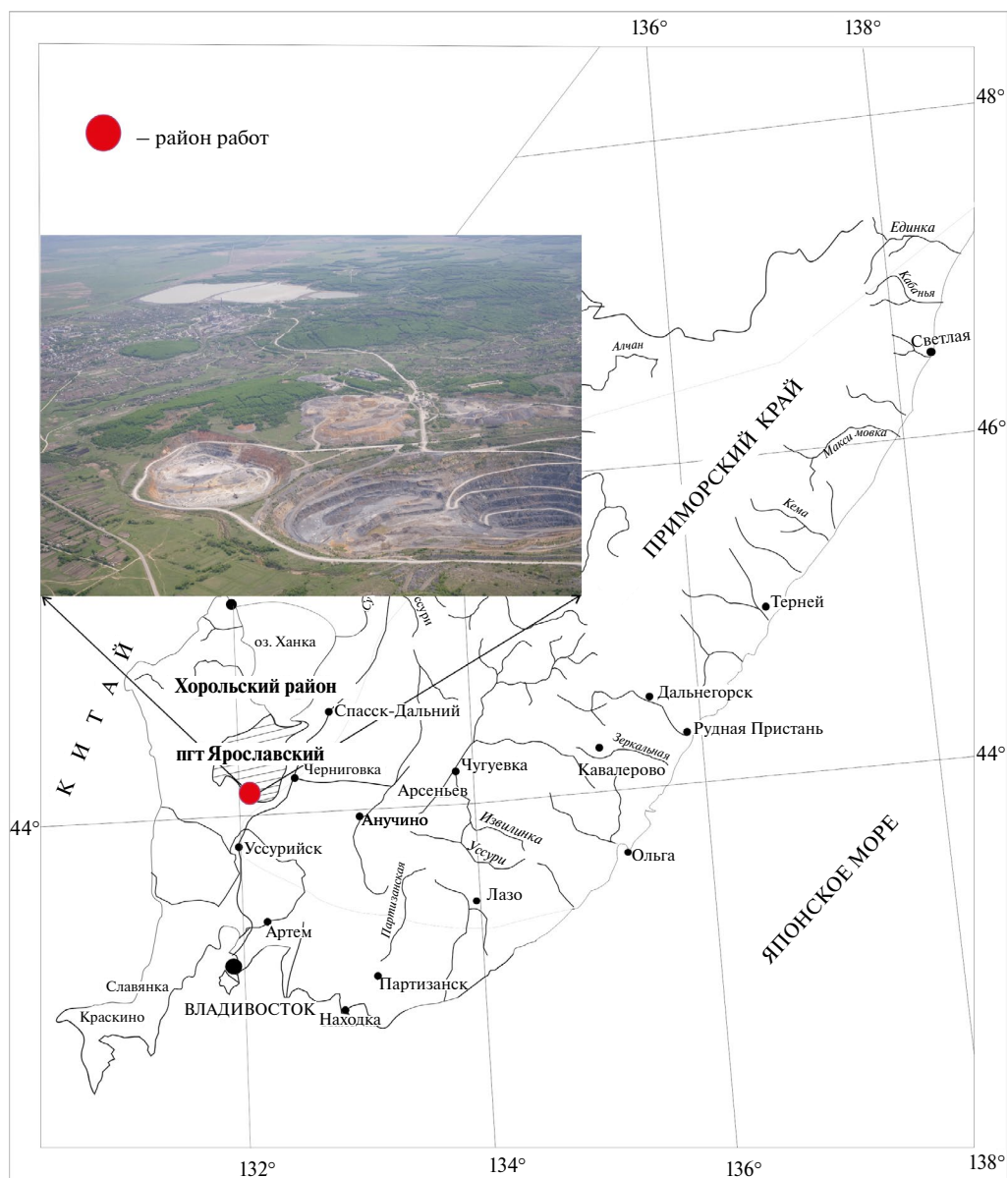


Рис. 1. Район работ на схеме Приморского края

По нашим данным, в отходах обогащения, размещенных в данном хвостохранилище, содержатся элементы, которые в своих медианных значениях значительно превышают их кларковые содержания в литосфере. Так, содержание бериллия в хвостах в 113 раз выше кларка, мышьяка – в 104, кадмия – в 92, лития – в 72, цинка – в 47, олова – в 28, молибдена и цезия – в 25, рубидия – в 22, свинца – в 16, вольфрама и таллия – в 13, меди и тантала – в 3, стронция – в 2 раза (рис. 2). Многие из этих элементов относятся к 1-му и 2-му классам опасности по воздействию на здоровье человека в силу проявления канцерогенных и мутагенных свойств [15–18].

Все эти элементы и их соединения обладают хорошей растворимостью и высоким коэффициентом водной миграции, что часто приводит к вторичному накоплению в различных средах и объектах биосферы [3, 19–22] и, как следствие, к загрязнению водных ресурсов, почв. Это может вызывать долгосрочные экологические проблемы и представлять угрозу для здоровья человека.

Рассматриваемое хвостохранилище представляет собой каскад из трех прудов, образованных дамбами разной высоты. Пруды расположены на абсолютных отметках 120–140 м, что на 20–30 м выше уровня поселка. Общий объем накопленных хвостов составляет десятки тысяч тонн. Хвостохранилище поддерживается в заполненном водой состоянии для минимизации пыления отходов.

Объект находится в зоне потенциального подтопления, длительное время подвергается воздействию разрушительных факторов: гидростатического давления столба жидких отходов и фильтрационного напора, действующих на тело дамб [23]. С прекращением деятельности обогатительной фабрики интенсивность гидродинамического воздействия несколько снизилась, однако обводненные отходы флотации продолжают создавать значительную нагрузку на элементы конструкции. Кроме того, действуют процессы химической суффозии – растворения и выноса растворимых компонентов из массива хвостов, приводящие к образованию пустот и снижению прочности грунтов основания дамбы. Совокупность этих факторов способна нарушить целостность противофильтрационных экранов и усилить инфильтрацию загрязненных вод в подземные горизонты.

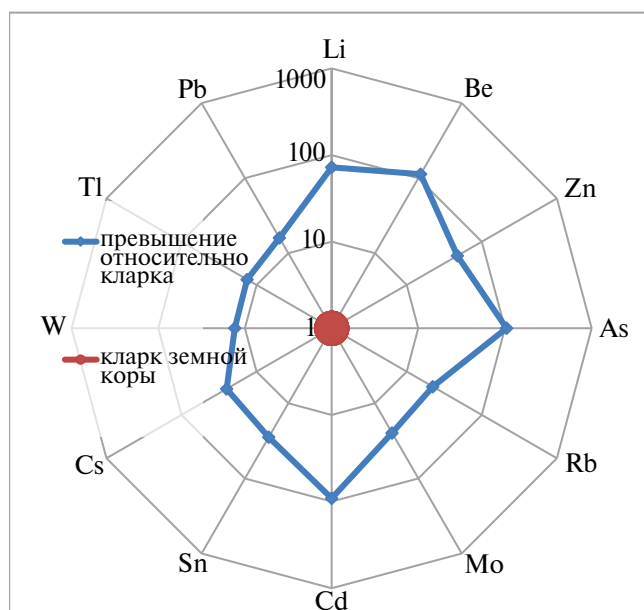


Рис. 2. Радиальная диаграмма медианных значений химических элементов в отложениях хвостохранилища Ярославского (кларк по [15])

Методы исследования и индикаторы оценки загрязненности водных объектов

В рамках полевых работ проведен отбор проб техногенных и природных вод для гидрохимического анализа. Всего отобрано 5 проб воды из разных участков хвостохранилища (поверхностные воды хвостовых прудов и одна проба из шурфа в толще хвостов) и 4 пробы подземных вод из местных источников (общественный колодец, самоизливающаяся скважина и два родника) (рис. 3).

Отбор проб осуществлялся дискретно из приповерхностного слоя воды с соблюдением требований к отбору проб для химического анализа. Каждая проба отбиралась в емкость из полипропилена. Фильтрация проб осуществлялась через мембранный фильтр (0,45 мкм) с помощью вакуумного насоса.

В пробах измерены показатели: pH, минерализация (сухой остаток), основные ионы (HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , F^-), а также концентрации ряда микроэлементов и тяжелых металлов (в том числе Be, Li, As, Cd, Zn, Pb, Mn, Fe и др.). Анализы выполнены в лаборатории аналитической химии Аналитического центра ДВГИ ДВО РАН методом атомно-эмиссионной спектроскопии (ИСП-АЭС, спектрометр iCAP 7600 Duo) для катионов и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС, спектрометр Agilent 7700) для определения микроэлементного состава. Точность анализа контролировалась с помощью стандартных образцов. Определение гидрокарбонатов выполнено с помощью титратора Dosimat 765 от Metrohm (Швейцария), цена деления 0,002 мл. Общая минерализация воды (Σn) определялась как сумма макрокомпонентов:

$$\Sigma n = [\text{Na}^+] + [\text{K}^+] + [\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}] + [\text{SO}_4^{2-}] + [\text{Cl}^-] + [\text{HCO}_3^-].$$

Оценка степени техногенного загрязнения подземных вод проводилась путем сравнения химического состава проб с гигиеническими нормативами для питьевой воды. В качестве критериев безопасности использованы предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде хозяйственно-питьевого назначения согласно действующим санитарным правилам (СанПиН 1.2.3685-21).

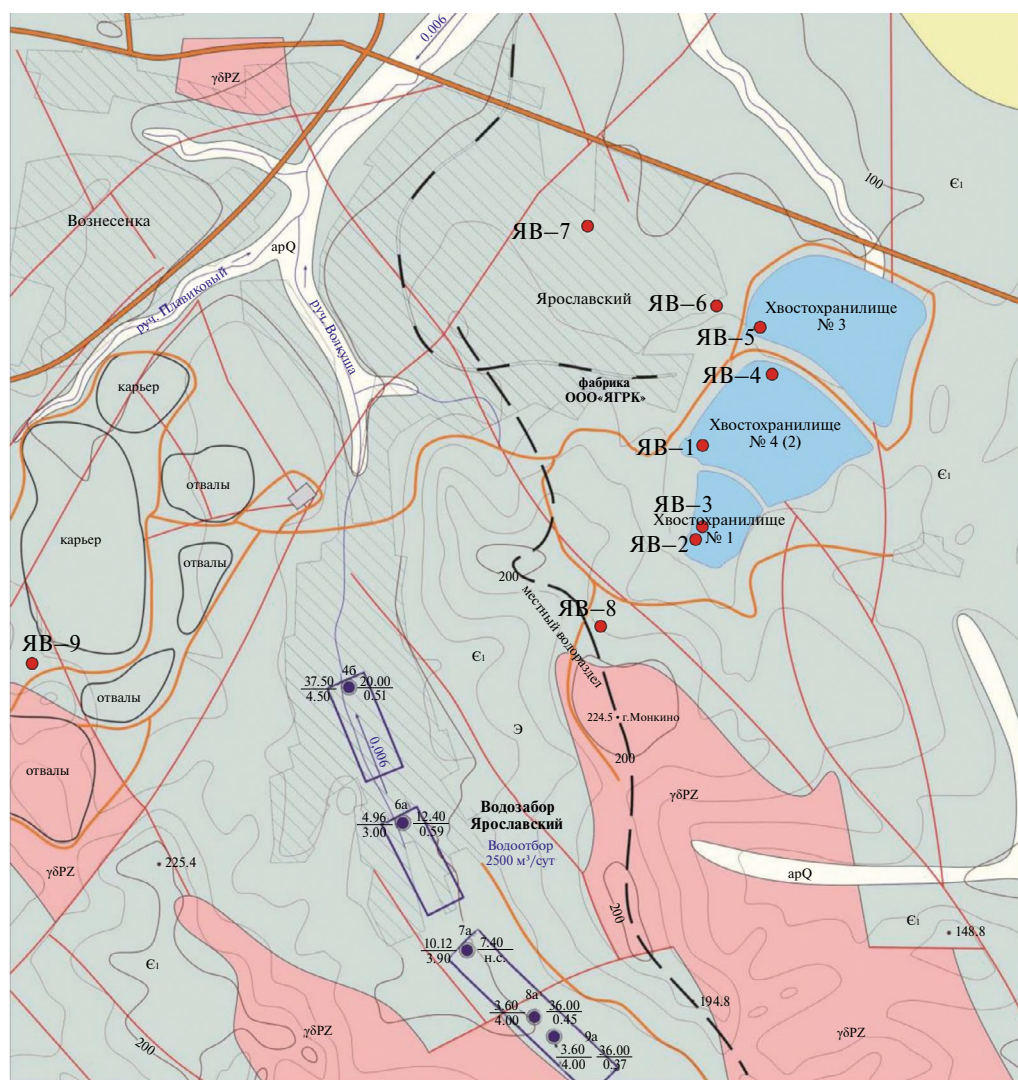
Кроме химических критериев учитывались геохимические индикаторы, позволяющие судить о техногенности вод. Такими индикаторами являются аномально высокие концентрации элементов, характерных для отходов данного производства (например, Li, Be, F⁻ для флюоритовых хвостов), а также нетипичные соотношения ионов. Анализ ионного состава проводился с использованием диаграмм Пайпера, что позволило сравнить типы вод из хвостохранилища и природных источников.

Гидрогеохимические механизмы миграции загрязнителей

Миграция загрязняющих веществ из хвостохранилища в подземные воды определяется совокупностью физико-химических процессов. В основании рассматриваемого хвостохранилища присутствует противифльтрационный слой, однако со временем его эффективность может снижаться. Под давлением столба воды в прудах происходит фильтрация поровой воды хвостов вниз и в стороны от хранилища. Адверсивное (напорное) течение переносит растворенные вещества в окружающий грунт. При этом скорость потока и объем утечек возрастают при повышении уровня хвостохранилища во время осадков и паводков.

Важным процессом является диффузия – молекулярное проникновение растворенных компонентов из более концентрированной среды (техногенные воды) в менее минерализованные грунтовые воды. Диффузионный перенос особенно значим при низких скоростях фильтрации, так как позволяет загрязнителям распространяться даже при незначительных утечках.

Химическая суффозия – процесс растворения и вымывания легкоподвижных соединений из массива хвостов – приводит к образованию выщелоченных зон и каналов внутри хвостохранилища. Эти каналы увеличивают проницаемость и создают пути для ускоренной инфильтрации загрязнений. В случае хвостохранилища Ярославского ГОКа основными



Карта составлена по материалам А.П. Дубинского, 1980 г.

Масштаб 1:25 000

Четвертичные полигенетические отложения с карты сняты

Условные обозначения

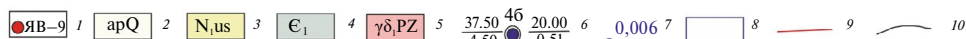


Рис. 3. Гидрогеологическая карта района исследований (по: А.П. Дубинский, 1980 г.) с точками отбора проб. Условные обозначения: 1 – точка отбора пробы воды и ее номер; 2 – водоносный горизонт аллювиально-пролювиальных четвертичных отложений. (песок, гравий, дресва, щебень с прослоями глины); 3 – водоносный комплекс усть-суйфунской свиты миоцена (пески, гравийники, галечники, песчаники, алевролиты с прослоями глины); 4 – водоносная зона терригенно-карбонатных и метаморфических образований нижнего кембрия (известняки, сланцы, алевролиты, песчаники); 5 – водоносная зона палеозойских интрузивных образований (граниты, гранодиориты, порфириды); 6 – эксплуатационная скважина водозабора. Цифры у знака скважины: вверху – номер; дробь слева: в числителе – дебит (л/с), в знаменателе – понижение (м); дробь справа: в числителе – уровень (м), в знаменателе – минерализация (г/дм³); 7 – направление, уклон потока подземных вод и его величина (м); 8 – контур второго пояса зоны санитарной охраны; 9 – разломы различного генезиса и морфологии; 10 – граница водоносных горизонтов и зон

растворимыми компонентами являются гипс и флюорит. Гипс ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) относительно легко переходит в раствор, повышая сульфатную жесткость воды. Флюорит (CaF_2) менее растворим, но при кислотности, создаваемой окислением сульфидных минералов, возможно высвобождение иона F^- . Таким образом, внутри хвостохранилища за годы хранения происходят гипергенные процессы – окисление сульфидов, выщелачивание солей, гидролиз силикатов. Эти процессы изменяют химию поровых вод: повышается минерализация, накапливаются сульфаты, фториды, металлы. Водообмен с атмосферой (осадки, испарение) также влияет на концентрацию загрязнителей: испарение концентрирует соли, а инфильтрация дождевой воды может, с одной стороны, разбавлять растворы, с другой – вымывать новые порции загрязнений.

При миграции в породах часть загрязнителей может задерживаться за счет адсорбции и ионообмена на поверхности минералов грунта. Так, глинистые и органические частицы способны поглощать катионы тяжелых металлов, уменьшая их подвижность. Катионный обмен между твердой (грунт) и жидкой (вода) фазами существенно влияет на состав подземных вод и может ограничивать миграцию ряда металлов. Однако эффективность сорбции зависит от pH среды: при кислых значениях (ниже ~5) адсорбция многих металлов снижается, и они легче мигрируют в растворенной форме. Если же воды нейтральные или щелочные, гидроокиси металлов могут выпадать в осадок, осаждая, например, Fe^{3+} , Al^{3+} , а сопутствующие элементы соосаждаются [24].

Редокс-условия также влияют на формы и подвижность загрязнителей. В присутствии кислорода (окислительная обстановка) происходят реакции окисления сульфидов (FeS_2 , ZnS и др.), что приводит к образованию серной кислоты и повышенному содержанию сульфатов и металлов в подземных водах. В анаэробных восстановительных условиях, наоборот, подвижность некоторых элементов (например, урана, сурьмы, мышьяка в форме As(V)) может снижаться из-за восстановления до малорастворимых форм.

Таким образом, сочетание гидродинамических (напор фильтрации, диффузия) и геохимических (растворение, окисление, адсорбция) механизмов определяет миграцию примесей из хвостохранилищ. В случае Ярославского хвостохранилища ожидаемыми индикаторами техногенного влияния в подземных водах являются повышенные концентрации элементов, содержащихся в флюоритовых рудах, прежде всего фтора, лития, бериллия, а также тяжелых металлов, сопутствующих вмещающим породам.

Гидрогеологическая характеристика района работ

По гидрогеологическому районированию Приморского края участок работ локализуется в Маньчжурском гидрогеологическом массиве 1-го порядка Пограничного гидрогеологического массива 2-го порядка. В пределах района по литолого-стратиграфическому признаку и условиям залегания выделяются следующие водоносные горизонты, приуроченные к поровым и трещинным коллекторам (см. рис. 3).

Водоносный горизонт аллювиально-пролювиальных четвертичных отложений ($арQ$). Отложения слагают дно временных водотоков (овраги, балки, пади) и в долинах рек Илистая, Абрамовка, Березянка, Волкуша и их притоков. Залегает первым от поверхности. Питание горизонта осуществляется поверхностными водами во время паводков за счет атмосферных осадков, а также подтоком подземных вод из пород, слагающих борта речных долин. Отложения представлены дресвой, гравием, песком, щебнем с прослоями глин. Мощность обводненных отложений не превышает 0,5–5 м.

Водоносный комплекс отложений усть-суйфунской свиты миоцена (N_{us}) имеет распространение в северной части района. Комплекс представлен рыхлыми или слаболигифицированными породами: песками, гравийниками, галечниками, нередко с глинистым заполнителем, линзами и прослоями глин, а также песчаниками, алевролитами. В пределах района мощность отложений изменяется от 6 до 40 м. Комплекс залегает первым от поверхности и подстилается отложениями усть-давыдовской свиты миоцена. Водообильность отложений в пределах района довольно высокая.

Водоносная зона терригенно-карбонатных и метаморфических образований нижнего кембрия ($Є$) имеет широкое распространение в районе работ. Образования представлены

известняками, кварцево-серицитовыми и серицитовыми сланцами, алевролитами, песчаниками. Трещиноватость наблюдается на всю вскрытую мощность до 100 м.

Трещинные и трещинно-пластовые воды приурочены к метаморфическим и кристаллическим сланцам. Воды вскрыты скважинами на глубине 2,47–13,82 м. Воды безнапорные или обладают небольшим напором. Режим вод относительно стабилен. Дебит скважин составляет 0,32–6,0 л/с при понижении 2,5–11,9 м, удельный дебит – 0,13–0,77 л/с, коэффициент фильтрации – 0,3–2,8 м/сут. Обводненные сланцы имеют большую площадь распространения и, контактируя с известняками, неизменно их подпитывают.

Водоносная зона палеозойских интрузивных образований (γδPZ) в районе имеет ограниченное распространение. Образования представлены гранитами, гранодиоритами, порфиритами.

Согласно гидрогеологической карте, все изученные природные источники подземных вод приурочены к водоносной зоне терригенно-карбонатных и метаморфических образований кембрия.

Результаты и обсуждение

Химический состав техногенных и природных вод

Анализ проб показал существенное различие между водами хвостохранилища (техногенные воды) и природными подземными водами, используемыми для питья. Минерализация вод хвостохранилища варьирует от 567,8 до 1593,6 мг/дм³, т. е. от пресных до слабосолоноватых по классификации минерализации. Реакция среды слабощелочная (рН = 7,3–8,1). Для сравнения, подземные воды из родников и колодцев имеют минерализацию 110–675,9 мг/дм³, т. е. от ультрапресных до пресных, при рН ~ 7,0 (табл. 1). Повышенная минерализация некоторых проб подземных вод (до 676 мг/дм³) может указывать на смешение с техногенными водами или естественное минеральное питание из пород.

Таблица 1
Основной химический состав вод хвостохранилища и подземных источников (мг/л)

Номер пробы	Тип вод	рН	М	HCO ₃	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	F ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Li ⁺
ЯВ-1 (хвост.)	Техногенные	8,0	723,9	360,0	124	21,9	0,77	11,1	11,5	7,32	173	13,9	0,41
ЯВ-2 (шурф)		7,5	1593,6	487,2	620	23,4	<0,1	8,36	85,7	23,1	317	28,1	0,77
ЯВ-3 (хвост.)		7,9	763,6	373,4	129	30,2	0,21	10,1	19,4	7,16	171	22,8	0,35
ЯВ-4 (хвост.)		7,9	567,8	269,9	111	16,5	0,40	7,34	7,14	6,03	140	9,18	0,29
ЯВ-5 (хвост.)		7,9	1245	393,9	432	36,7	<0,1	13,8	17,4	13,7	313	23,7	0,76
ЯВ-6 (скважина)	Природные	6,6	175,4	119,0	12,2	3,28	0,28	<0,3	19,6	8,79	11,5	0,74	<0,01
ЯВ-7 (колодец)		6,9	261,5	163,2	31,5	5,15	0,16	<0,3	40,4	8,55	12,0	0,53	<0,01
ЯВ-8 (родник)		6,9	110	70,8	9,05	2,54	0,21	0,79	16,9	4,67	4,92	0,11	<0,01
ЯВ-9 (родник)		6,9	675,9	179,8	225	70,6	5,08	0,94	134	20,3	39,4	0,79	<0,01

Примечание: хвост. – пробы воды хвостохранилища; шурф – проба поровой воды из шурфа в теле хвостов; родник, колодец, скважина – природные источники поселка.

По катионно-анионному составу техногенные воды представлены преимущественно гидрокарбонатными натриевыми, гидрокарбонатно-сульфатными натриевыми и хлоридно-гидрокарбонатно-сульфатными натриевыми типами (рис. 4). В хвостовых водах отмечается аномально высокая доля фторида – до **6% от суммы анионов**, тогда как в природных водах содержание F^- не превышает 1–1,5 мг/л (~10% ПДК). Также в составе техногенных вод обнаружены значимые концентрации лития: около **1% от суммы катионов**, что эквивалентно десяткам миллиграммов на литр Li^+ . Для подземных вод вне зоны влияния такие количества лития нехарактерны (фоновые значения $Li^+ < 0,1$ мг/л). Наличие столь заметных долей фтора и лития подтверждает вклад выщелачивания флюоритовых руд и слюдистых минералов хвостов в химию вод хвостохранилища.

Из табл. 1 видно, что техногенные воды характеризуются повышенным содержанием сульфатов (до 620 мг/л) и натрия (до 317 мг/л), тогда как в природных водах преобладают гидрокарбонаты кальция. Проба воды из шурфа имеет наиболее высокую концентрацию сульфата, что свидетельствует о более тесном контакте с твердыми отходами и процессах окисления сульфидов внутри хвостов (отмечено максимальное содержание серы в растворе).

Подземные воды родников, колодца и скважины в целом соответствуют гидрокарбонатному кальциево-магниевому типу, характерному для грунтовых вод, сформировавшихся на карбонатных породах (см. рис. 4). Минерализация в них ниже, чем в хвостах, однако в роднике (ЯВ-9) отмечены сравнительно высокая минерализация (676 мг/л) и повышенные хлориды (70,6 мг/л) и сульфаты (225 мг/л) по сравнению с водами родника (ЯВ-8), колодца (ЯВ-7) и скважины (ЯВ-6). Это может отражать естественную вариацию – влияние состава пород вышележащего отвала.

Распространение микроэлементов и токсичных компонентов

Особое внимание уделялось содержанию в водах токсичных элементов 1–2-го классов опасности, таких как бериллий (Be), мышьяк (As), кадмий (Cd), а также литий (Li) и другие металлоиды. В воде хвостохранилища ожидаемо отмечаются макси-

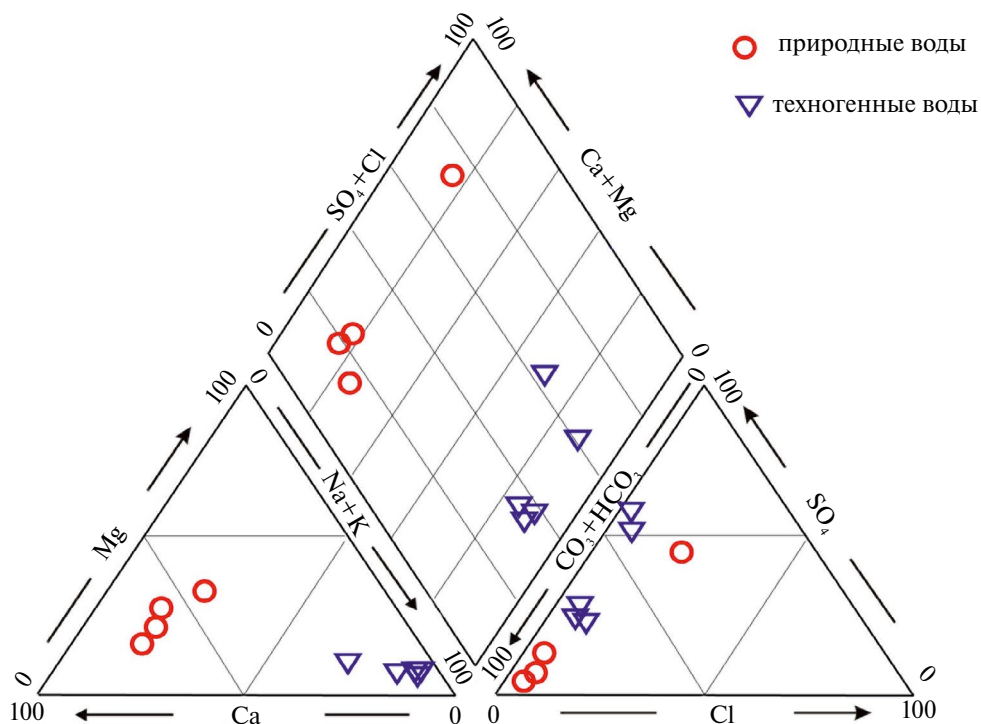


Рис. 4. Соотношение основных катионов и анионов в техногенных и природных водах пгт Ярославский

мальные концентрации мышьяка (1437 мкг/л), серы (111 981 мкг/л), лития (872,4 мкг/л), марганца (466,6 мкг/л), цинка (516,6 мкг/л), рубидия (196,6 мкг/л), стронция (620,2 мкг/л), урана (10,87 мкг/л), цезия (8,538 мкг/л), бериллия (3,89 мкг/л), никеля (2,68 мкг/л), кадмия (2,25 мкг/л), высокие значения бария и молибдена (табл. 2, рис. 5). Эти величины существенно (в разы) превышают фоновые концентрации данных элементов в грунтовых водах.

Таблица 2

Состав микроэлементов в исследованных пробах техногенных вод хвостохранилищ и природных подземных вод на территории пгт Ярославский в 2022 г. (мкг/л)

Элемент	ЯВ-1	ЯВ-2	ЯВ-3	ЯВ-4	ЯВ-5	ЯВ-6	ЯВ-7	ЯВ-8	ЯВ-9
	Техногенные					Природные подземные			
Li	488,5	872,4	419,5	371,3	856,8	12,97	9,60	0,33	2,65
Be	0,27	3,89	1,70	0,099	0,034	0,004	0,004	0,032	0,009
B	149,7	354,7	153,9	134,1	395,1	≤19	≤19	≤19	24,32
Al	47,95	58,21	50,33	425,6	94,69	1,78	3,50	8,11	9,56
P	32,52	25,56	24,46	17,79	15,88	19,77	3,77	3,30	9,83
S	23810	111981	22878	21124	75853	2100	5296	1504	37808
Sc	0,025	0,078	0,041	0,011	0,020	0,055	0,055	0,039	0,046
Ti	0,503	0,570	0,487	0,521	0,520	0,127	0,149	0,225	0,188
V	0,515	0,866	0,309	0,542	2,19	0,041	0,006	0,091	0,095
Cr	0,106	0,140	0,106	0,122	0,103	0,011	0,014	0,037	0,091
Mn	12,37	466,6	3,06	5,74	0,475	2,03	129,21	0,308	1,54
Fe	61,04	10,68	34,53	16,19	2,81	4,78	15,64	3,13	3,33
Co	0,154	0,524	0,104	0,082	0,060	0,057	0,458	0,051	0,410
Ni	1,99	2,68	0,931	1,62	0,677	0,394	0,503	0,781	1,989
Cu	4,263	4,080	2,528	14,49	4,628	0,201	0,147	0,928	0,952
Zn	16,24	516,6	3,98	2,46	18,04	1,99	359,	5,448	6,046
Ga	0,044	0,026	0,026	0,075	0,044	≤0,0018	0,004	≤0,0018	0,003
Ge	0,031	0,041	0,027	0,019	0,050	0,026	0,028	0,007	0,005
As	661,8	39,64	338,1	432,7	1437	0,458	2,97	0,231	1,527
Se	0,198	0,653	0,186	0,197	0,498	0,036	≤0,017	0,045	0,149
Rb	72,80	196,6	64,77	60,93	185,1	1,81	1,22	0,086	1,16
Sr	158,1	620,2	186,1	115,1	271,7	131,9	277,3	81,08	451,3
Zr	0,162	0,293	0,153	0,134	0,171	0,019	0,050	0,048	0,055
Nb	0,004	0,004	0,003	0,003	0,008	0,000	0,001	0,002	0,001
Mo	62,62	108,6	53,29	37,39	261,4	0,116	0,349	0,073	0,268
Ag	1,063	0,071	0,097	0,158	0,683	0,016	0,007	0,002	0,005
Cd	0,109	2,25	0,050	0,041	0,218	0,012	0,005	0,011	0,064
Sn	0,168	0,062	0,051	0,092	0,048	0,008	0,014	0,009	0,017
Sb	0,876	2,00	0,615	0,975	5,156	0,110	0,160	0,445	0,409
Te	0,033	0,013	0,016	0,032	0,018	≤0,0041	≤0,0041	≤0,0041	≤0,0041

Таблица 2. Окончание

Эле- мент	ЯВ-1	ЯВ-2	ЯВ-3	ЯВ-4	ЯВ-5	ЯВ-6	ЯВ-7	ЯВ-8	ЯВ-9
	Техногенные					Природные подземные			
Cs	0,550	8,538	0,495	0,356	2,229	0,238	0,074	0,001	0,484
Ba	23,11	28,01	44,16	19,99	18,79	6,52	37,57	19,75	26,91
Hf	0,005	0,010	0,004	0,004	0,005	0,001	0,002	0,001	0,002
Ta	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
W	30,77	0,799	4,61	20,73	93,2	0,031	0,014	0,007	0,015
Tl	0,025	1,017	0,017	0,006	0,115	0,001	0,009	0,006	0,027
Pb	0,682	0,559	0,137	0,151	0,174	0,018	0,045	0,610	0,507
Bi	0,022	0,006	0,013	0,010	0,006	0,000	0,001	0,000	0,001
Th	0,017	0,014	0,012	0,005	0,001	0,000	0,000	0,001	0,001
U	1,32	10,87	1,070	1,16	5,39	0,012	0,347	0,010	1,25

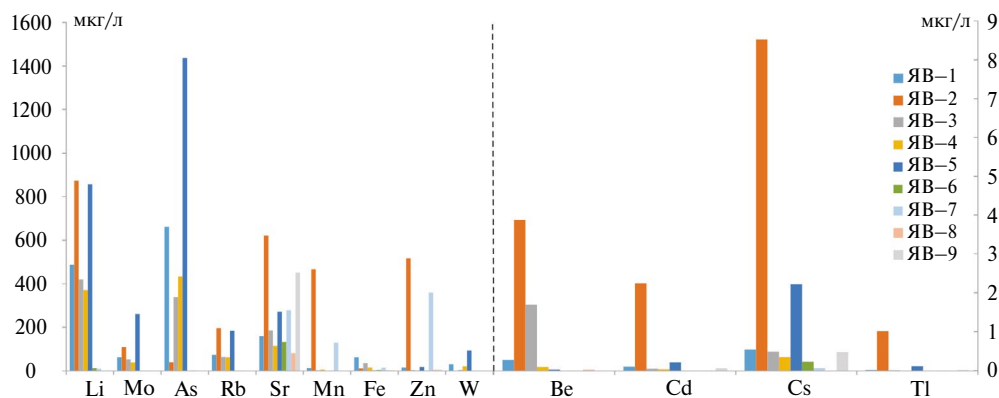


Рис. 5. Распределение микроэлементов в природных и техногенных водах пгт Ярославский, мкг/л: ЯВ-1–ЯВ-5 – техногенные воды хвостохранилища Ярославского ГОКа; ЯВ-6–ЯВ-9 – природные подземные воды

Следует отметить, что многие из обнаруженных в хвостах элементов относятся к опасным для здоровья: As и Cd – канцерогены 1-го класса, Be – высокотоксичен, Li при значительных дозах воздействует на нервную систему и почки. В связи с этим потенциальное попадание этих компонентов в источники питьевой воды вызывает беспокойство.

При сравнении полученных концентраций микроэлементов в водах нецентрализованных источников водоснабжения, используемых жителями для питьевых целей, с нормативными значениями для питьевого и хозяйственного назначения¹ выявлено небольшое превышение содержания марганца в одном источнике питьевой воды (ЯВ-7). На рис. 6 схематично показано сравнение концентраций некоторых ключевых элементов (Mn, As, Li, Be, Cd, Pb) в пробах природных подземных вод с нормативными уровнями (100% соответствует ПДК). Видно, что по большинству компонентов доля от ПДК составляет менее 50% и лишь Mn в колодце (ЯВ-7) превышает 100%. В воде общественного колодца по ул. Заречной содержание марганца достигло 129 мкг/л, что в 1,3 раза выше ПДК (100 мкг/л). Марганец относится ко 2-му классу опасности: его избыточное потребление может приводить к неврологическим

¹ СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности (или безвредности) для человека факторов среды обитания. Введены 28.01.2021.

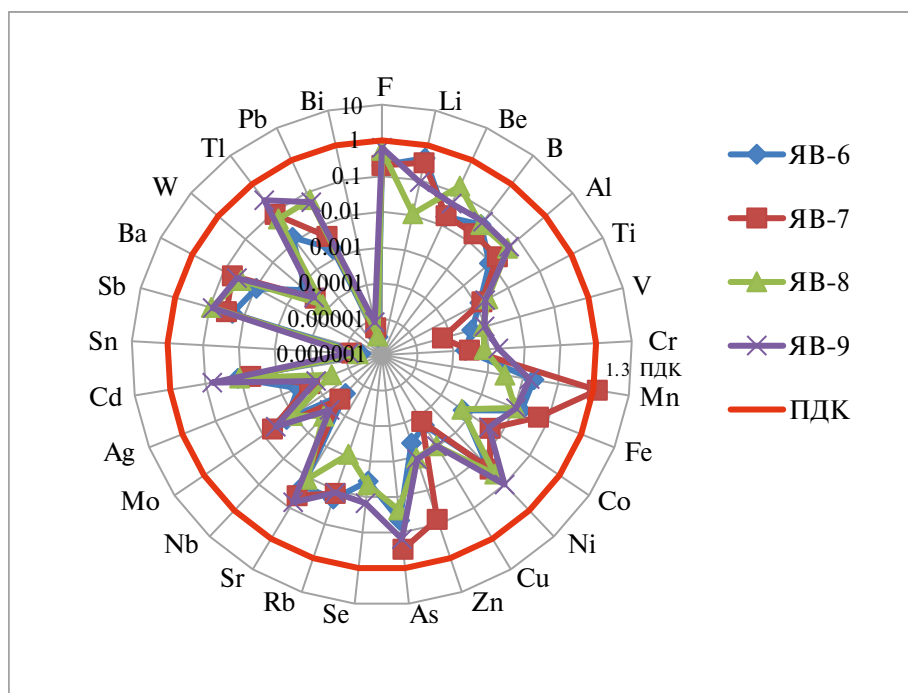


Рис. 6. Радialная диаграмма концентраций микроэлементов в подземных водах пгт Ярославский

расстройствам при долгосрочном накоплении. Помимо марганца в той же пробе колодезной воды отмечены повышенные относительно других источников концентрации железа, цинка, мышьяка, бария, лития и кобальта. Однако содержания этих элементов не превышают ПДК, т. е. формально находятся в пределах нормы. Так, концентрация As в колодце ~3 мкг/л (при ПДК 10 мкг/л), Cd <1 мкг/л (ПДК 3 мкг/л), Li ~30 мкг/л (ПДК для питьевой воды – 30 мкг/л). В родниках концентрации тяжелых металлов и токсичных элементов еще ниже, зачастую на уровне пределов обнаружения. Таким образом, эта наглядная оценка подтверждает относительную благополучность ситуации по состоянию на период обследования, качество воды в обследованных источниках в настоящее время отвечает гигиеническим требованиям по изученным элементам. Колодец демонстрирует несколько более высокое содержание ряда элементов, что, возможно, связано как с техногенным влиянием (близость хвостохранилища), так и с природной геохимической аномалией в районе.

Присутствие в воде колодца даже невысоких концентраций таких элементов, как As, Be, Li, тем не менее вызывает необходимость токсикологического анализа их потенциального воздействия. Многие из этих элементов кумулятивны, т.е. способны накапливаться в организме при продолжительном употреблении воды. Например, литий при концентрациях более 0,1 мг/л может со временем накапливаться в щитовидной железе [25], мышьяк даже в низких дозах имеет канцерогенное действие при многолетнем приеме. В связи с этим требуется проведение оценки риска для здоровья.

Отсутствие значительного техногенного загрязнения подземных вод на данный момент может объясняться несколькими факторами: во-первых, естественная фильтрация и сорбция в толщах грунтов могла задержать большую часть тяжелых элементов на пути к источникам; во-вторых, нельзя исключать и то, что гидрогеологические условия (например, направление подземного стока) таковы, что инфильтрационные потоки из хвостохранилища пока не достигли конкретных родников. Однако вероятно, что техногенный след уже проявляется: косвенным указанием служит упомянутое превышение Mn и общее повышение минерального фона колодезной воды. Для окончательного вывода необходимы расширенные исследования, включая трассировку вод, изотопный анализ, длительный мониторинг концентраций.

Оценка токсикологического риска

Рассмотрим токсикологические свойства основных выявленных загрязнителей и потенциальный риск для населения при их поступлении с питьевой водой. Ключевыми элементами, вызывающими озабоченность, являются мышьяк (As), кадмий (Cd), бериллий (Be), свинец (Pb), ртуть (Hg) (последние два обнаружены в следовых количествах) – все они отнесены к 1-му классу опасности (чрезвычайно опасные вещества) по воздействию на организм. По классификации Международного агентства по изучению рака [16] мышьяк и его соединения отнесены к группе 1 (канцероген для человека), кадмий и бериллий – также канцерогены для человека. Канцерогенное и мутагенное действие этих металлов подробно рассмотрено, например, в труде В.В. Худодея [17] и монографиях IARC [16]. Бериллий опасен в первую очередь при ингаляции (вызывает бериллиоз легких), однако и при поступлении с водой он способен приводить к поражению кишечника и развитию злокачественных опухолей у экспериментальных животных [26]. Санитарные нормы РФ регламентируют присутствие бериллия в воде питьевой систем централизованного, в том числе горячего, и нецентрализованного водоснабжения, воде подземных и поверхностных водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования, воде плавательных бассейнов, аквапарков, в питьевой воде не выше 0,0002 мг/л.

Мышьяк (As) даже при концентрациях порядка десятков микрограммов на литр повышает риск рака кожи, внутренних органов и оказывает системное токсическое действие (хронический арсеникоз). Установленная Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ) и российскими СанПиН норма 0,01 мг/л основана на минимизации канцерогенного риска. В рассматриваемых водах As не превышает 0,003 мг/л, т. е. вклад в канцерогенный риск незначителен, однако близость источника мышьяка (хвостохранилища) требует постоянного контроля, поскольку даже временное превышение норм может иметь отдаленные последствия.

Кадмий (Cd) – сильный почечный и печеночный токсикант, накопление которого приводит к остеопорозу и почечной недостаточности. ПДК Cd в воде очень низка (0,003 мг/л) именно из-за высокой опасности. В пробах подземных вод Cd <0,001 мг/л, т. е. непосредственной угрозы нет. Однако в хвостовых водах концентрация Cd на два порядка выше (до 0,05–0,1 мг/л, согласно данным лаборатории), что создает риск при возможном попадании этих вод в колодцы.

Литий (Li) не относится к типичным канцерогенам или токсикантам 1-го класса, однако его соединения оказывают влияние на нервную систему и функцию почек. Литий применяется как психотропный препарат, и длительное употребление воды с повышенным Li может приводить к изменению психоэмоционального состояния. Недавние исследования также связывают избыток лития в воде с риском нарушений функции щитовидной железы. ВОЗ не установила норматив по Li, но некоторые страны рекомендуют ориентироваться на концентрацию не выше 0,07 мг/л. В колодце Li около 0,03 мг/л, что можно считать безопасным уровнем, однако в воде хвостохранилища – более 0,5 мг/л. Таким образом, литий следует учитывать в мониторинге.

Фтор (F⁻) присутствует в хвостохранилище в существенных количествах. Фториды в питьевой воде в концентрации 1–1,5 мг/л полезны для профилактики кариеса, но при превышении ~2 мг/л приводят к флюорозу (поражение зубной эмали), а >5 мг/л – к поражению костей. В родниках рассматриваемой территории фтор не превышает 1 мг/л, однако близость крупного резервуара с фторсодержащими отходами требует контроля: потенциальная утечка концентрированных фторидных вод может быстро привести к недопустимым уровням F⁻ в колодцах.

Суммарно текущие риски для здоровья населения оцениваются как приемлемые, поскольку фактические концентрации токсикантов (As, Cd, Pb, Be и др.) ниже нормативных порогов. Индекс опасности (отношение концентрации к ПДК) для большинства веществ <1, и суммарный индекс загрязнения Zс для воды колодца остается низким (порядка 2–3 условных единиц по ключевым компонентам). Канцерогенный риск (вероятность развития рака за жизнь при данном содержании канцерогенов) также оценивается как находящийся ниже допустимого уровня $1 \cdot 10^{-5}$, поскольку концентрации As, Cd очень малы.

Тем не менее потенциальный риск существует в случае изменения ситуации: аварийного поступления крупных масс загрязненной воды или постепенного роста концентраций по мере истощения буферной емкости грунтов. Особенно следует учитывать опасность кумулятивного эффекта, – долговременное употребление даже слабо загрязненной воды может привести к накоплению вредных веществ в организме. Поэтому необходима разработка системы управления рисками и мероприятий по предотвращению ухудшения качества воды.

Рекомендации по мониторингу и управлению рисками

Результаты исследования диктуют необходимость принятия превентивных мер для защиты водных ресурсов пгт Ярославский. Во-первых, рекомендуется организовать систематический мониторинг подземных вод в зоне влияния хвостохранилища. Следует осуществлять регулярный (не реже 2 раз в год) отбор проб из всех используемых источников (родники, колодцы, скважины) и их химический анализ на широкий спектр элементов, включая тяжелые металлы и специфичные компоненты хвостов (F⁻, Li, Be). Желательно также пробурить специальные наблюдательные скважины между хвостохранилищем и поселком для отслеживания качества грунтовых вод на пути возможной миграции загрязнений. Создание сети наблюдательных пунктов позволит заблаговременно обнаружить ухудшение качества воды до того, как загрязнение достигнет питьевых источников.

Во-вторых, необходимо уделять внимание техническому состоянию хвостохранилища. Рекомендуется систематическое проведение обследования дамб, дна и дренажной системы хвостохранилища с целью выявления признаков просачивания, разуплотнения или суффозии. При необходимости следует выполнять работы по укреплению дамб (подсыпка, бетонирование трещин, усиление противофильтрационного экрана).

Учитывая возрастающую частоту экстремальных метеорологических явлений (ливни, паводки) в Приморье, важно повысить устойчивость гидротехнического сооружения к возможному переливу и размыву. В последние годы на территории края отмечаются сильные наводнения, увеличившие нагрузку на подобные объекты. В случае разрушения дамбы может произойти катастрофический вынос накопленных за десятилетия загрязнений на рельеф и в реки. Поэтому превентивные меры должны включать создание системы аварийного водоотвода (каналы для отвода паводковых вод от хвостохранилища) и резервных емкостей для аварийного сброса вод хвостохранилища.

В-третьих, рекомендуется разработать и внедрить план управления рисками для населения поселка. Такой план должен предусматривать оповещение жителей в случае обнаружения превышения нормативов в воде или угрозы аварии на хвостохранилище. Желательно также провести разъяснительную работу с населением о потенциальных рисках стихийного использования родников без контроля качества.

Наконец, следует рассмотреть возможность утилизации хвостохранилища в долгосрочной перспективе. Современные технологии позволяют извлекать из старых хвостов ценные компоненты (в случае Ярославского ГОКа – тот же литий, бериллий и др.) и одновременно снижать токсичность остального массива отходов. Пока же необходимо поддерживать существующие защитные меры и не ослаблять мониторинговый контроль.

Заключение

Проведенное исследование позволило оценить современное состояние подземных вод пгт Ярославский под влиянием объекта накопленного вреда – хвостохранилища ГОКа. Химический состав техногенных вод хвостохранилища отличается повышенной минерализацией (до 1,6 г/л), преобладанием сульфат-натриевых солей и присутствием токсичных элементов (Li, Be, As, Cd и др.) в концентрациях, превышающих фоновые значения в десятки раз. Под действием гипергенных процессов в хвостах происходит переход опасных компонентов в водную фазу. Подземные воды – источники нецентрализованного водоснабжения – по составу принадлежат к гидрокарбонатному кальциевому классу, имеют минерализацию 0,1–0,68 г/л и в целом отвечают гигиеническим нормативам по содержа-

нию контролируемых элементов. Выявлено лишь небольшое превышение по марганцу (1,3 ПДК) в воде колодца; концентрации остальных потенциально опасных компонентов находятся ниже ПДК, несмотря на близость хвостохранилища. Таким образом, на момент исследования альтернативные источники водоснабжения населения пгт Ярославский можно считать безопасными по химическому составу.

В то же время установлено, что многие токсичные элементы (As, Be, Cd и др.) присутствуют в системе «хвостохранилище – подземные воды», пусть и в низких концентрациях, но их наличие подтверждает миграцию загрязнителей. Это создает потенциальную угрозу, которая может реализоваться при изменении гидрогеологических условий. Усиление инфильтрации, связанное, например, с экстремальными осадками или возможным повреждением дамбы, способно привести к резкому росту концентраций опасных веществ в родниках, колодцах и скважинах. В условиях участвовавших паводков в Приморье такая ситуация весьма вероятна. Поэтому необходимо уделить самое серьезное внимание мониторингу и превентивным мерам. Рекомендовано организовать постоянный контроль качества воды, расширить перечень определяемых загрязнителей и оперативно внедрять защитные меры при первых признаках ухудшения обстановки. Также предложены технические решения по стабилизации хвостохранилища и снижению рисков аварийных выбросов.

Настоящее исследование демонстрирует важность комплексного научного подхода при оценке влияния объектов накопленного вреда на окружающую среду. Применение методов гидрогеохимического анализа в сочетании с токсикологической оценкой позволяет выявить скрытые угрозы и обосновать систему мероприятий, направленных на обеспечение экологической безопасности населения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Юрченко С.Г., Шулькин В.М. Особенности химического состава питьевых вод г. Владивосток // Вестник ДВО РАН. 2010. № 5. С. 107–112.
2. Трунова И.Е., Зарецкая С.В. Гигиеническая оценка качества питьевой воды во Владивостоке // Тихоокеанский медицинский журнал. 2006. № 3. С. 64–66.
3. Тарасенко И.А., Зиньков А.В. Экологические последствия минералого-геохимических преобразований хвостов обогащения Sn–Ag–Pb–Zn руд (Приморье, Дальнегорский район). Владивосток: Дальнаука, 2001. 194 с.
4. Bortnikova S.B., Gas'kova O.L., Prisekina N.A. Geochemical estimation of the potential danger of waste rocks from the Veduginskoe deposit // Geochemistry International. 2010. Vol. 48, No. 3. P. 280–294.
5. Тарасенко И.А., Харитоновна Н.А., Оводова Е.В., Зиньков А.В., Корзун А.В. Трансформация минералого-геохимического состава отходов обогащения и ее влияние на формирование высокоминерализованных вод (Приморский край, Россия) // Тихоокеанская геология. 2017. Т. 36, № 2. С. 106–118.
6. Крупская Л.Т., Орлов А.М., Голубев Д.А., Колобанов К.А., Филатова М.А. Оценка экологической опасности накопленных отходов переработки минерального сырья закрытых горных предприятий в Приамурье и Приморье // Горные науки и технологии. 2020. Т. 5, № 3. С. 208–223. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-3-208-223>
7. Бржанов Р.Т., Софронова Л.И. Хвостовые отложения – источник экологических проблем // Труды университета. 2021. № 1 (82). С. 72–77. https://doi.org/10.52209/1609-1825_2021_1_72
8. Злобин Н.И. Оценка загрязнения водных объектов заповедника «Денежкин Камень» от Шемурского месторождения // XXI век. Техносферная безопасность. 2021. Т. 6, № 4. С. 395–407. <https://doi.org/10.21285/2500-1582-2021-4-395-407>
9. Курбонов М.Д., Расторгуев А.В. Обоснование прогнозов миграции для Дигмайского хвостохранилища // Вестник Филиала Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в городе Душанбе. 2022. Т. 1, № 1 (21). С. 129–137.
10. Семячков А.И., Почечун В.А., Семячков К.А. Гидрогеоэкологические условия техногенных подземных вод в объектах размещения отходов // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 168–179. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.24>
11. Бударина В.А., Лисецкий Ф.Н., Косинова И.И., Курышев А.А. Особенности трансформации подземной гидросферы в пределах Стойленского горнопромышленного комплекса // Геология, география и глобальная энергия. 2024. № 3 (94). С. 13–22. https://doi.org/10.54398/20776322_2024_3_13

12. Комаров М.А., Алискеров В.А., Кусевич В.И., Заверткин В.Л. Горнопромышленные отходы – дополнительный источник минерального сырья // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2007. № 4. С. 3–9.
13. Гордиенко П.С., Ярусова С.Б., Крысенко Г.Ф. и др. Переработка флюоритсодержащего минерального сырья и отходов Ярославского горно-обогатительного комбината: монография. М.: РИОР, ИНФРА-М, 2018. 115 с. (Научная мысль). <https://doi.org/10.12737/1734-0>
14. Фатов А.С., Лихникевич Е.Г. Гидрохимическая технология переработки хвостов обогащения Ярославского ГОКа – реального источника литиевой продукции // Труды Кольского научного центра РАН. 2018. Т. 9, № 2–1. С. 371–374.
15. Овчинников Л.Н. Прикладная геохимия. М.: Недра, 1990. 348 с.
16. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Vol. 58: Beryllium, Cadmium, Mercury, and Exposures in the Glass Manufacturing Industry. Lyon: IARC, 1993. P. 41–117.
17. Худoley В.В. Канцерогены: характеристики, закономерности, механизмы действия. СПб.: Нестор, 1999. 420 с.
18. CICAD № 32. Beryllium and Beryllium Compounds. Geneva: WHO, 2001. 71 p.
19. Добровольский В.В. География микроэлементов. Глобальное рассеяние. М.: Мысль, 1983. 272 с.
20. Эйхлер В. Яды в нашей жизни. М.: Мир, 1993. 192 с.
21. Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов: справочник: В 6 кн. / под ред. Э.К. Буренкова. М.: Недра, 1994. Кн. 1: s-элементы. 304 с.
22. Tarasenko I.A., Zin'kov A.V., Kholodov A.S., Riaz M., Petukhov V.I., Popov N.Yu., Tsatsakis A., Golokhvast K.S. Concentrating mill wastes are the source of pollution of human environment and natural ecosystems with heavy metals: a case study in Primorsky Krai, Russian Federation // Journal of Chemistry. 2020. Vol. 2020. 6570126. <https://doi.org/10.1155/2020/6570126>
23. Шарипов Д.Ш. Гидродинамические и гидростатические силы как факторы, влияющие на устойчивость хвостохранилищ // Геоэкология. 2021. Т. 44, № 1. С. 63–72. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-1-63-72>
24. Абдрахманов Р.Ф., Попов В.Г., Тугуши И.Н. Обменно-адсорбционные процессы в подземной гидросфере. Уфа: БНЦ УрО АН СССР, 1992. 156 с.
25. Николаев Е.Е., Голенков А.В., Мадьянов И.В. Применение препаратов лития в психиатрической практике в контексте влияния на тиреоидный статус // Acta Medica Eurasica. 2023. № 2. С. 124–138. <https://doi.org/10.47026/2413-4864-2023-2-124-138>
26. Филов В.А. Бериллий и его соединения: окружающая среда, токсикология, гигиена // Рос. хим. журнал. 2004. Т. 48, Вып. 2. С. 76–86.

REFERENCES

1. Yurchenko S.G., Shul'kin V.M. Osobennosti khimicheskogo sostava pit'evykh vod g. Vladivostok = [Features of the chemical composition of drinking water in the city of Vladivostok]. *Vestnik of the FEB RAS*. 2010;(5):107–112. (In Russ.).
2. Trunova I.E., Zaretskaya S.V. Gigienicheskaya otsenka kachestva pit'evoy vody vo Vladivostoke = [Hygienic assessment of drinking water quality in Vladivostok]. *Tikhookeanskiy Meditsinskiy Zhurnal*. 2006;(3):64–66. (In Russ.).
3. Tarasenko I.A., Zinkov A.V. Ekologicheskie posledstviya mineralogo-geokhimicheskikh preobrazovaniy khvostov obogachivaniya Sn–Ag–Pb–Zn rud (Primorye, Dal'negorskiy rayon) = [Ecological consequences of mineralogical-geochemical transformations of Sn–Ag–Pb–Zn ore enrichment tailings (Primorye, Dal'negorsk district)]. Vladivostok: Dal'nauka; 2001. 194 p. (In Russ.).
4. Bortnikova S.B., Gaskova O.L., Prisekina N.A. Geochemical estimation of the potential danger of waste rocks from the Veduginskoe deposit. *Geochemistry International*. 2010;48(3):280–294.
5. Tarasenko I.A., Kharitonova N.A., Ovodova E.V., Zin'kov A.V., Korzun A.V. Transformatsiya mineralogo-geokhimicheskogo sostava otkhodov obogachivaniya i yeye vliyanie na formirovaniye vysokomineralizovannykh vod (Primorskiy kray, Rossiya) = [Transformation of the mineralogical and geochemical composition of tails and its influence on the high mineralization water origination (Primorye region, Russia)]. *Tikhookeanskaya Geologiya*. 2017;36(2):106–118. (In Russ.).
6. Krupskaya L.T., Orlov A.M., Golubev D.A., Kolobanov K.A., Filatova M.A. Otsenka ekologicheskoy opasnosti nakoplennykh otkhodov pererabotki mineraloidnogo syr'ya zakrytykh gornyykh predpriyatiy

v Priamur'e i Primorye = [Assessment of environmental hazard of accumulated mineral processing waste of closed mining enterprises in the Amur river region and Primorye]. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2020;5(3):208–223. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-3-208-223>

7. Brzhanov R.T., Sofronova L.I. Khvostovye otlozheniya – istochnik ekologicheskikh problem = [Tailings as a source of environmental problems]. *Trudy Universiteta*. 2021;(1):72–77. (In Russ.). https://doi.org/10.52209/1609-1825_2021_1_72

8. Zlobin N.I. Otsenka zagriazneniya vodnykh ob'ektov zapovednika “Denezhkin Kamen” ot Shemurskogo mestorozhdeniya = [Assessment of the level of pollution of water bodies of the Denezhkin Kamen reserve by the Shemur field]. *XXI century. Technosphere safety*. 2021;6(4):395–407. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2500-1582-2021-4-395-407>

9. Kurbnov M.D., Rastorguev A.V. Obosnovanie prognozov migratsii dlya Digmaiskogo khvostokhranilishcha = [Justification of migration forecasts for the Digmaisk tailings storage]. *Vestnik Filiala Moskovskogo Gosudarstvennogo Universiteta imeni M.V. Lomonosova v gorode Dushanbe*. 2022;1(1):129–137. (In Russ.).

10. Semyachkov A.I., Potchun V.A., Semyachkov K.A. Gidrogeokologicheskie usloviya tekhnogennykh podzemnykh vod v ob'ektakh razmeshcheniya otkhodov = [Hydrogeocological conditions of technogenic groundwater in waste disposal sites]. *Journal of Mining Institute*. 2023;260:168–179. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.24>

11. Budarina V.A., Lisetskiy F.N., Kosinova I.I., Kurychev A.A. Osobennosti transformatsii podzemnoy gidrosfery v predelakh Stoylenskogo gorno-promyshlennogo kompleksa = [Features of the transformation of the underground hydrosphere in the limits of the Tula mining complex]. *Geology, Geography and Global Energy*. 2024;(3):13–22. (In Russ.). https://doi.org/10.54398/20776322_2024_3_13

12. Komarov M.A., Aliskerov V.A., Kusevich V.I., Zavertkin V.L. Gorno-promyshlennyye otkhody – dopolnitel'nyy istochnik mineraloidnogo syr'ya = [Mining industrial waste as an additional source of mineral resources]. *Mineral'nye Resursy Rossii. Ekonomika i Upravlenie*. 2007;(4):3–9. (In Russ.).

13. Gordienko P.S., Yarusova S.B., Krysenko G.F. et al. Pererabotka flyuoritsoderzhashchego mineraloidnogo syr'ya i otkhodov Yaroslavskogo gorno-obogatitel'nogo kombinata: monografiya = [Processing of fluorite-containing minerals and waste from the Yaroslavl Mining and Beneficiation Plant: monograph]. Moscow: RIOR, INFRA-M; 2018. 115 p. (In Russ.). <https://doi.org/10.12737/1734-0>

14. Fatov A.S., Likhnikievich E.G. Gidrokhimicheskaya tekhnologiya pererabotki khvostov obogachivaniya Yaroslavskogo GOK – real'nogo istochnika litievoy produktsii = [Hydrochemical technology for processing of Yaroslavl GOK enrichment tailings as a real source of lithium products]. *Trudy Kol'skogo Nauchnogo Tsentra RAN*. 2018;9(2-1):371–374. (In Russ.).

15. Ovchinnikov L.N. Prikladnaya geokhimiya = [Applied geochemistry]. Moscow: Nedra; 1990. 348 p. (In Russ.).

16. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Vol. 58: Beryllium, Cadmium, Mercury, and Exposures in the Glass Manufacturing Industry. Lyon: IARC; 1993. P. 41–117.

17. Khudoley V.V. Kantserogeny: kharakteristiki, zakonomernosti, mekhanizmy deystviya = [Carcinogens: Characteristics, patterns, and mechanisms of action]. St. Petersburg: Nestor; 1999. 420 p. (In Russ.).

18. CICAD № 32. Beryllium and Beryllium Compounds. Geneva: WHO; 2001. 71 p.

19. Dobrovol'skiy V.V. Geografiya mikroelementov. Global'noye rasseyaniye = [Geography of trace elements. Global dispersion]. Moscow: Mysl'; 1983. 272 p. (In Russ.).

20. Eikhler V. Yady v nashey zhizni = [Poisons in our life]. Moscow: Mir; 1993. 192 p. (In Russ.).

21. Ivanov V.V. Ekologicheskaya geokhimiya elementov: Spravochnik: V 6 kn. = [Ecological geochemistry of elements: Handbook: in 6 vols]. Moscow: Nedra; 1994. Vol. 1: s-elements. 304 p. (In Russ.).

22. Tarasenko I.A., Zin'kov A.V., Kholodov A.S., Riaz M., Petukhov V.I., Popov N.Yu., Tsatsakis A., Golokhvast K.S. Concentrating mill wastes are the source of pollution of human environment and natural ecosystems with heavy metals: a case study in Primorsky Krai, Russian Federation. *Journal of Chemistry*. 2020;2020:6570126. <https://doi.org/10.1155/2020/6570126>

23. Sharipov D.Sh. Gidrodinamicheskie i gidrostaticheskie sily kak faktory, vliyayushchie na ustoychivost' khvostokhranilishch = [Hydrodynamic and hydrostatic forces as factors affecting tailing dump stability]. *Geoecology*. 2021;44(1):63–72. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-1-63-72>

24. Abdrahmanov R.F., Popov V.G., Tugushi I.N. Obmenno-adsorbtsionnye protsessy v podzemnoy gidrosfere = [Exchange and adsorption processes in the underground hydrosphere]. Ufa: BNC UrO AN SSSR; 1992. 156 p. (In Russ.).

-
25. Nikolaev E.E., Golenkov A.V., Madyanov I.V. The use of lithium medications in psychiatric practice in the context of their effect on the thyroid status. *Acta Medica Eurasica*. 2023;2:124–138. <https://doi.org/10.47026/2413-4864-2023-2-124-138>
26. Filov V.A. Berylliy i yego soedineniya: okruzhayushchaya sreda, toksikologiya, gigiena = [Beryllium and its compounds: Environment, toxicology, hygiene]. *Rossiiskii Khimicheskii Zhurnal*. 2004;48(2):76–86. (In Russ.).