

РАЗДЕЛ I ГЕОЛОГИЯ. СЕЙСМИКА. ГИС [GEOLOGY. SEISMOLOGY. GIS]

УДК: 504.75; 556.3

DOI: 10.24412/2658-4441-2023-3-39-58

О.И. КАЛЬНАЯ¹, А.А. ХВАЩЕВСКАЯ²

¹ *Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН (Кызыл, Россия)*

² *Томский политехнический университет (Томск, Россия)*

ДИНАМИКА ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОВЕРХНОСТНЫХ И ПОДЗЕМНЫХ ВОД В РАЙОНЕ ХОВУ-АКСЫНСКОГО РУДНОГО УЗЛА

В настоящей статье приведена динамика изменения гидрохимического состава поверхностных, подземных и рудничных вод в районе Хову-Аксынського рудного узла. При написании статьи использованы результаты полевых наблюдений и аналитических исследований непосредственно авторов работы за ряд лет, а также данные литературных источников и фондовых материалов. Работами установлено, что присутствие рудообразующих тяжёлых металлов и мышьяка во всех видах вод в районе исследований определяется как природными (Хову-Аксынское арсенидно-кобальтовое месторождение, состав переотложенных продуктов коры выветривания), так и антропогенными факторами (хвостохранилища комбината Тувакобальт). В настоящее время карты-накопители комбината рекультивированы, в исследуемом районе ведётся мониторинг состояния компонентов окружающей среды силами станции агрохимической службы Тувинская.

Ключевые слова: Хову-Аксынський рудний узел, комбинат Тувакобальт, хвостохранилища, поверхностные, подземные и рудничные воды, гидрохимический состав, рудообразующие тяжёлые металлы, мышьяк.

Рис. 8. Табл. 5. Библ. 29 назв. С. 39–58.

*Работа выполнена в рамках работ по Государственному заданию
ТувИКОПР СО РАН, научная тема 222020400035-4*

O.I. KALNAYA¹, A.A. KHVASCHEVSKAYA²

¹ *Tuvinian Institute for Exploration of Natural Resources of SB RAS (Kyzyl, Russia)*

² *Tomsk Polytechnic University (Tomsk, Russia)*

DYNAMICS OF HYDROCHEMICAL PARAMETERS OF SURFACE AND UNDERGROUND WATERS WITHIN THE KHOVU-AKSYNSKY ORE CLUSTER

This article presents the changes dynamics of the hydrochemical composition of surface, underground and mine waters in the area of the Khovu-Aksynsky ore cluster. The results of field observations and analytical studies of the authors for several years as well as data from literary sources and unpublished geological reports were used in the present paper. The works have established that the presence of ore-forming heavy metals and arsenic in all types of waters within the study area is determined by both natural (Khovu-Aksynsky arsenide-cobalt deposit, the composition of redeposited

weathering crust products) and anthropogenic factors (wastes of the Tuvakobalt plant). At the present time the Tuvakobalt's wastes storage have been recultivated. Today the monitoring for environmental components state is being carried out by the Tuvinskaya agrochemical service station.

Keywords: Khovu-Aksynsky ore cluster, Tuvakobalt plant, wastes storage, surface, underground and mine waters, hydrochemical composition, ore-forming heavy metals, arsenic.

Figures 8. Tables 5. References 29. P. 39–58.

ВВЕДЕНИЕ. Хову-Аксыйский рудный узел располагается в структурах южного обрамления Тувинского прогиба и приурочен к сложно построенному тектоническому узлу, в котором интенсивно проявлены разновозрастные магматические и гидротермальные процессы (Лебедев, 1998).

В административном отношении Хову-Аксыйское арсенидно-кобальтовое месторождение расположено в Чеди-Хольском кожууне (районе) Республики Тыва, в географическом — в пределах бассейна р. Элегест, которая является наиболее крупным левым притоком р. Верхний Енисей.

С 1970 по 1991 гг. на базе месторождения работал комбинат Тувакобальт. В результате за 20 лет производственной деятельности на промплощадке в пяти хвостохранилищах, называемых «картами», и десятке траншей складировано более 2 млн м³ хвостов гидрометаллургического передела. За время хранения отходов их первоначальный состав (как минеральный, так и геохимический) существенно изменился под влиянием окисляющих и разрушающих факторов: арсениды в значительной степени окислились, произошло их замещение неустойчивыми вторичными минералами, существенная часть химических элементов из твёрдого вещества перешла в поровые растворы. Запасы мышьяка в хвостохранилищах составляют не менее 75 тыс. т при концентрации около 3,3%. Мышьяк является одним из наиболее токсичных компонентов, приобретающим высокую мобильность при окислительном и восстановительном выщелачивании вещества руд, отвалов и отходов обогащения. Хранилища находятся в непосредственной близости от р. Элегест, впадающей в р. Верхн. Енисей и служили (до рекультивации) серьёзным источником экологической угрозы загрязнения компонентов окружающей среды не только регионального значения.

Предметом наших исследований являлись поверхностные, подземные и рудничные воды в пределах Хову-Аксыйского рудного узла. Цель работы — определение степени влияния данного рудного узла и хвостохранилищ комбината Тувакобальт на химический состав вод и их экологическое состояние, оценка количественного загрязнения всех видов вод мышьяком и тяжёлыми металлами, входящими в состав руд месторождения и хранящимися в хвостохранилищах, а также выяснение путей миграции данных элементов. Кроме этого, в статье приводятся данные о содержании в водах мышьяка и тяжёлых металлов, почерпнутых из опубликованных материалов и фондовых источников, и проведён сравнительный анализ динамики гидрохимического состава вод.

Геологическое строение Хову-Аксыйского рудного узла подробно приведено в монографиях и статьях (Лебедев, 1998; Лебедев и др. 2009; Лебедев, 2010, 2015, 2017, 2018; Забелин, 2016, 2018).

Экологическая проблема, связанная с хвостохранилищами (картаминакопителями) комбината Тувакобальт освещена в монографии (Бортникова и др., 2006) и многочисленных статьях (Гаськова и др., 2003; Ондар и др., 2010; Лебедев и др., 2012; Кальная и др., 2018; Монгуш и др., 2018; Кальная, Аюнова, 2019; Кальная и др., 2019; Гуркова и др., 2019; Платонова и др., 2021; Bortnikova et al., 2021) и других.

МЕТОДИКА РАБОТ. В ходе выполнения полевых работ производился отбор поверхностных, подземных и рудничных вод в периоды 2017, 2018 и 2021 гг.

Поверхностные воды в районе Хову-Аксынского рудного узла, хвостохранилищ комбината Тувакобальт, а также в целом в бассейне р. Элегест (в верхнем, среднем и нижнем течении) опробовались в 2017, 2018 и 2021 гг. с целью выяснения фоновое гидрохимического состояния поверхностных водотоков, в т. ч. количественных показателей содержания мышьяка и тяжёлых металлов. Нумерация проб последовательная.

2017 г.: *проба № 1* — верховье р. Элегест; *проба № 2* — р. Элегест выше пос. Сайлыг; *проба № 3* — р. Элегест у моста в пос. Сайлыг; *проба № 4* — р. Элегест ниже очистных сооружений пгт. Хову-Аксы; *проба № 5* — р. Элегест перед слиянием с р. Унгеш; *проба № 6* — р. Элегест у пос. Чал-Кежиг.

2018 г.: *проба № 7* — р. Элегест, 100 м выше моста в пос. Сайлыг; *проба № 8* — р. Элегест, 50 м ниже моста в пос. Сайлыг; *проба № 9* — р. Элегест ниже очистных сооружений пгт. Хову-Аксы; *проба № 10* — р. Элегест у моста в пос. Чал-Кежиг.

2021 г.: *проба № 11* — ручей без названия, выше штольни «Капитальная»; *проба № 12* — ручей без названия на участке «Северный», выше штольни № 2; *проба № 13* — р. Хондерге; *проба № 14* — оз. Доржу-Холь; *проба № 15* — р. Элегест, верхнее течение.

Точки отбора водных проб в 2017–2018 гг. отображены на *рисунке 1*, в 2021 г. — на *рисунке 2*.

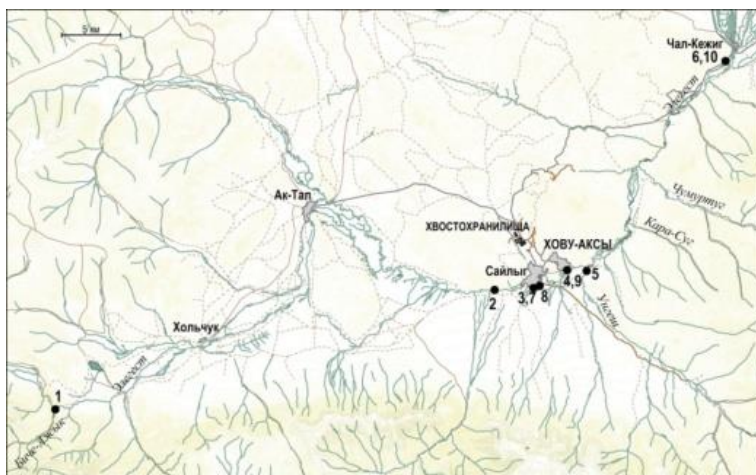


Рисунок 1. Точки отбора водных проб из поверхностных водотоков в 2017 и 2018 гг.



Рисунок 2. Точки отбора водных проб из поверхностных водотоков в 2021 г.

Пробы воды, отобранные в 2017 г., анализировались в секторе физико-химических исследований ТувИКОПР СО РАН (Кызыл), в 2018 г. анализ воды проводился в Проблемной научно-исследовательской лаборатории Томского политехнического университета (Томск) (аттестат аккредитации № РОСС RU. 0001.511901 от 09.09.2013 г.). Вода, отобранная в 2021 г., исследовалась в Аналитической лаборатории ООО «Тувинская ГРЭ» (Кызыл) (аттестат аккредитации № ААС. А.00164, действителен до 25.07.2022 г.).

Подземные воды в районе исследования опробовались в январе и в июне 2018 г. Пробы отбирались из скважин, пробуренных в пос. Сайлыг для целей водоснабжения населения. Посёлок расположен ниже хвостохранилищ по рельефу, в устьевой части лога, впадающего в долину р. Элегест. Также опробовался открытый колодец, расположенный в посёлке. Кроме этого, были отобраны фоновые пробы из абиссинского колодца в частном доме, расположенном по правому берегу р. Элегест, вне влияния карт-накопителей комбината. Положение пос. Сайлыг относительно карт-накопителей отобрано на *рисунке 3* (Кальная, Аюнова, 2019).

Расположение опробованных скважин и колодцев отобрано на *рисунке 4*.



Рисунок 3. Расположение пос. Сайлыг относительно карт-накопителей комбината Тувакобальт

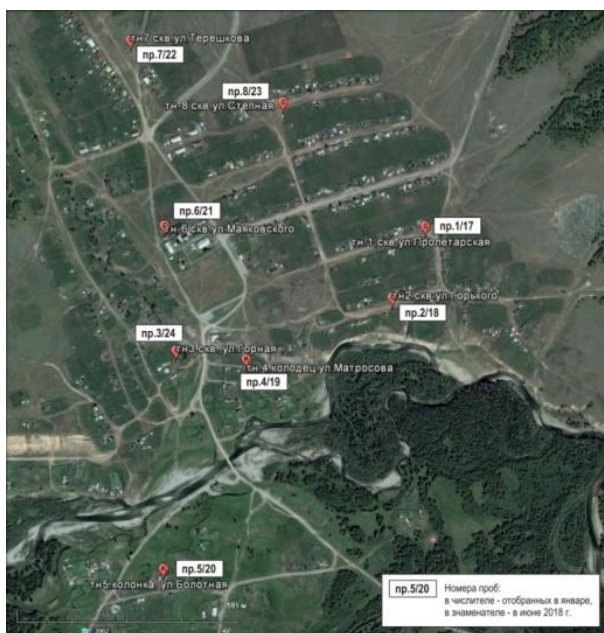


Рисунок 4. Схема расположения опробованных скважин и колодцев в пос. Сайлыг, номера отобранных проб воды в январе и в июне 2018 г.

Рудничные воды. В 2021 г. сотрудниками ТувИКОПР СО РАН было проведено опробование рудничных вод, вытекающих из заброшенных штолен на участке «Северный», и ручьёв, протекающих в пределах этого же участка. Точки отбора проб из штолен представлены на *рисунке 5*.

Все пробы воды отбиралась в соответствии с ГОСТ 31861-2012 (2019) в пластиковые бутылки, объём каждой пробы составлял 2 л. В воде определялись следующие компоненты: минерализация, сухой остаток, макрокомпонентный состав (катионы и анионы), в т.ч. железо общее, азотсодержащие компоненты (нитрат-ион, нитрит-ион, аммоний-ион), жёсткость общая, карбонатная и некарбонатная, углекислота свободная, кремнекислота, окисляемость перманганатная, водородный показатель (рН), тяжёлые металлы (цинк, медь, свинец, никель, марганец, кобальт, хром), нефтепродукты, фенолы, взвешенные вещества.

Результаты анализа поверхностных и рудничных вод сравнивались с требованиями, предъявляемыми к рыбохозяйственным водоёмам (Правила..., 1991; Гидрохимические показатели..., 2007).

Результаты анализа подземных вод сравнивались с предельно-допустимыми концентрациями (ПДК) для вод хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования (СанПиН 1.2.3685-21, 2021).

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ. Гидрохимический состав поверхностных и подземных вод во многом зависит от геологического строения местности, в частности, от состава пород. Контактная с породами и минералами, воды обогащаются определёнными химическими элементами. Рудные узлы являются поставщиками, если так можно сказать, рудообразующих химических элементов в поверхностные и подземные воды.

Рудные минералы Хову-Аксынского арсенидно-кобальтового месторождения представлены никелином (NiAs), раммельсбергитом (NiAs_2), сафлоритом ($(\text{Co,Fe})\text{As}_2$), шмальтин-хлоантитом (шмальтин — CoAs_{3-2} ; хлоантит — NiAs_{3-2} , лёллингитом (FeAs_2). Это арсениды, содержащие 52–71 % мышьяка, 1–17,5 % кобальта и 1,1–30 % никеля, железа. На завершающей стадии гидротермального процесса рудообразования Хову-Аксынского месторождения наибольшая роль принадлежала мышьяковистой блёклой руде — теннангиту ($\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$) с повышенным содержанием серебра и ртути, а также халькопириту (CuFeS_2) и борниту (Cu_3FeS_4) (Забелин, 2016).

Зона окисления на месторождении распространяется на глубину 40–70 м и служит источником формирования ореолов рассеяния рудообразующих элементов в рыхлых подпочвенных отложениях и в почвах, в растениях, а также принимает участие в образовании потоков рассеяния элементов в подземных водах, поверхностных водотоках и их донных отложениях (Забелин, 2016).

Кроме природных объектов, на гидрохимический состав вод и их экологическое состояние влияют и антропогенные факторы. В данном случае, это фильтрация атмосферных осадков в водоносные горизонты через открытые карты

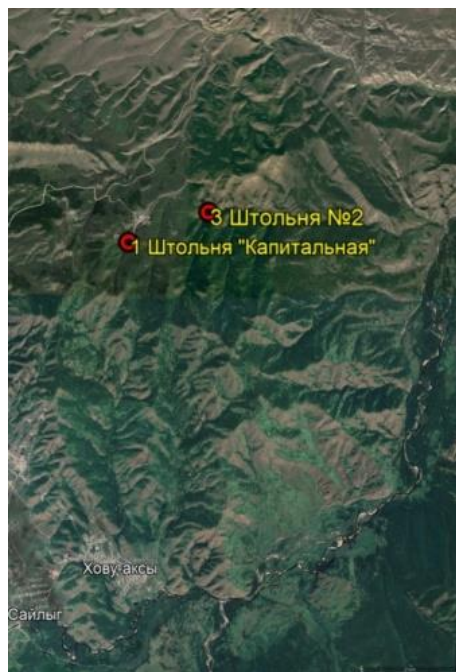


Рисунок 5. Точки отбора рудничных водных проб из штолен в июне 2021 г.

накопители комбината Тувакобальт, сброс неочищенных сточных вод пгт. Хову-Аксы непосредственно в р. Элегест.

В течение ряда лет проблема влияния токсичных элементов на подземные и поверхностные воды в районе арсенидно-кобальтового месторождения Хову-Аксы и хвостохранилищ комбината являлась предметом изучения: сотрудников Тувинской геологоразведочной экспедиции (далее — ТГРЭ), проводивших режимные наблюдения в данном районе (Качурин и др., 1967 ф.; Поляков, Магдиг, 1971 ф.; Угрюмов, Топрокова, 1986 ф.; Никитина, 2004 ф., 2016 ф.); научных сотрудников Сибирского отделения РАН (Бортникова и др., 2006; Bortnikova et al., 2021); сотрудников ТувГУ (Ондар и др., 2010; и др.); сотрудников ТувИКОПР СО РАН (Кальная, Аюнова, 2019; Платонова и др., 2020; и др.).

Ниже приведены результаты ретроспективного анализа состояния поверхностных, подземных и рудничных вод в районе Хову-Аксынского рудного узла.

Поверхностные воды. В 1970 г. были выполнены работы (Поляков, Магдиг, 1971 ф.) по исследованию поверхностных, подземных и рудничных вод в районе Хову-Аксынского арсенидно-кобальтового месторождения на предмет содержания в них мышьяка.

Опробовались такие поверхностные водотоки, как р. Элегест (в нескольких точках), ручьи Азик, Унгеш, Сорог, Чыланнгы, Худеш, Он-Кажаа.

Установлено, что содержание мышьяка в пробах вод, отобранных из ручьёв Чыланнгы и Худеш в районе Северного рудника, превышало санитарную норму и составляло в среднем 0,051–0,103 мг/л. В остальных водотоках содержание мышьяка не превышало ПДК.

В р. Элегест было отмечено повышенное содержание мышьяка (0,03–0,05 мг/л) в весенний период снеготаяния. В остальные периоды 1970 г. (лето, осень, зима) содержание мышьяка в р. Элегест не превышало норму (по требованиям 1970 г.) и находилось в пределах 0,008–0,022 мг/л (Поляков, Магдиг, 1971 ф.).

Данные гидрохимического и экологического состояния поверхностных вод за 2017–2018 гг. приведены в *таблице 1*.

По результатам химических анализов за указанные годы воды ультрапресные с минерализацией 0,143–0,197 г/л, очень мягкие и мягкие (общая жёсткость колеблется в пределах 0,8–2,4 мг-экв/л), водная среда нейтральная и слабощелочная (рН=6,69–8,02). По химическому составу — преимущественно гидрокарбонатные натриево-кальциевые и кальциево-натриевые. Обобщённая формула солевого состава имеет вид:

$$M_{0,143-0,197} \frac{HCO_3(74-88)CO_3(0-17)SO_4(3-8)Cl(0-3)NO_2(0-3)NO_3(0-1)}{Ca(27-72)(Na+K)(33-65)Mg(4-21)NH_4(0-2)}.$$

Максимальное количество загрязняющих компонентов (хоть и не превышающих ПДК для вод рыбохозяйственных водоёмов) определяются в пробе воды №4 отобранной в 2017 г. ниже очистных сооружений в пгт. Хову-Аксы (*см. табл. 1*). Содержание нефтепродуктов составило 0,0091 мг/л (0,182 ПДК), фенолов — 0,0039 мг/л (3,9 ПДК), АПАВ — 0,007 мг/л (0,07 ПДК). В 2018 г. загрязняющие компоненты техногенного характера в р. Элегест определены в единичной пробе №10, отобранной у пос. Чал-Кежиг (*см. рис. 1*), где содержание фенолов составило 0,0016 мг/л или 1,6 ПДК. Нефтепродукты и АПАВ в 2018 г. в р. Элегест в районе исследований определены на пределе чувствительности прибора (*см. табл. 1*).

Наибольшее количество мышьяка в р. Элегест за два года опробования (0,0077 мг/л) отмечено в воде, отобранной из реки в пос. Сайлыг в 2017 г. (проба №3), который находится в устьевой части лога с расположенными выше по рельефу хвостохранилищами комбината Тувакобальт (*см. рис. 1, табл. 1*). В 2018 г. содержание мышьяка в р. Элегест у пос. Сайлыг составило 0,0012 мг/л.

Таблица 1. Гидрохимические показатели поверхностных вод, 2017 и 2018 гг.

№ проб	Дата отбора	Минерализация, г/л	pH	Жёсткость общ., мг-экв/л	Формула солевого состава	As, мг/л	Нефтепродукты, мг/л	Фенолы, мг/л	АПАВ, мг/л
1	09.06.2017	0,179	6,69	1,1	$\frac{HCO_3\ 87CO_3\ 9SO_4\ 3NO_2\ 1NO_3\ 1}{(Na + K)51Ca30Mg17NH_4\ 1}$	0,0030	≤0,005	≤0,0005	не обн.
2	09.06.2017	0,180	6,70	1,2	$\frac{HCO_3\ 87CO_3\ 9SO_4\ 3NO_2\ 1}{(Na + K)48Ca43Mg9}$	0,0014	≤0,005	≤0,0005	не обн.
3	09.06.2017	0,180	6,75	0,8	$\frac{HCO_3\ 83CO_3\ 9SO_4\ 7NO_3\ 1}{(Na + K)65Ca31Mg4}$	0,0077	0,003	≤0,0005	не обн.
4	09.06.2017	0,197	7,20	2,4	$\frac{HCO_3\ 77CO_3\ 15SO_4\ 4NO_2\ 3Cl\ 1}{(Na + K)61Ca27Mg12}$	0,0048	0,0091	0,0039	0,007
5	09.06.2017	0,145	7,02	2,3	$\frac{HCO_3\ 85CO_3\ 11SO_4\ 3NO_3\ 1}{(Na + K)50Ca27Mg21NH_4\ 2}$	0,0037	0,0022	не обн.	не обн.
6	09.06.2017	0,159	8,02	0,9	$\frac{HCO_3\ 83CO_3\ 10SO_4\ 6NO_3\ 1}{(Na + K)56Ca29Mg15}$	не обн.	≤0,005	≤0,0005	не обн.
7	03.06.2018	0,175	7,52	1,6	$\frac{HCO_3\ 76CO_3\ 13SO_4\ 7Cl\ 3NO_3\ 1}{Ca51(Na + K)39Mg10}$	0,0011	≤0,005	≤0,001	≤0,025
8	03.06.2018	0,151	7,42	1,7	$\frac{HCO_3\ 88SO_4\ 8Cl\ 3NO_3\ 1}{Ca72(Na + K)14Mg13NH_4\ 1}$	0,0012	≤0,005	≤0,001	≤0,025
9	03.06.2018	0,194	7,87	1,6	$\frac{HCO_3\ 75CO_3\ 17SO_4\ 4Cl\ 3NO_3\ 1}{(Na + K)49Ca42Mg9}$	0,00099	≤0,005	≤0,001	≤0,025
10	03.06.2018	0,143	7,87	1,35	$\frac{HCO_3\ 74CO_3\ 14SO_4\ 8Cl\ 3NO_3\ 1}{Ca54(Na + K)33Mg12NH_4\ 1}$	0,00086	≤0,005	0,0016	≤0,025

Примечание. АПАВ — анионные поверхностно-активные вещества; не обн. — не обнаружено.

Несколько повышенное содержание мышьяка в пробе №3 за 2017 г. (0,0077 мг/л) по сравнению с фоновым содержанием (0,0055 мг/л; Никитина, 2016 ф.) может быть связано с поступлением данного элемента из размывавшихся карт-накопителей в подземные воды верхнеплейстоценово-голоценового делювиально-пролювиального горизонта, выполняющего днище лога, и далее — в поверхностные воды р. Элегест за счёт разгрузки подземных вод. Ниже по течению содержание мышьяка в р. Элегест уменьшается до 0,0037 мг/л в 2017 г. (проба №5) и до 0,00086 мг/л в 2018 г. (проба №10) (см. рис. 1, табл. 1).

Результаты исследований гидрохимического и экологического состояния поверхностных вод бассейна р. Элегест, проведённые авторами в 2021 г., приведены в таблице 2.

По результатам химических анализов за 2021 г. воды пресные и ультрапресные с минерализацией 0,09–0,37 г/л, от очень мягких и мягких (общая жёсткость 1,0–2,7 мг-экв/л) до умеренно жёстких (4,40 мг-экв/л — ручей на участке Северном), водная среда нейтральная (pH = 6,56–7,48). По химическому составу воды преимущественно гидрокарбонатные, реже — хлоридно-гидрокарбонатные магниевые-

кальциевые и натриево-кальциевые. Обобщённая формула солевого состава имеет вид:

$$M_{0,09-0,37} \frac{HCO_3(56-92)Cl(3-27)SO_4(4-17)NO_3(0-3)}{Ca(52-71)Mg(10-37)(Na+K)(2-30)NH_4(1-15)}.$$

В 2021 г. содержание нефтепродуктов отмечено только в одной пробе — в ручье возле штольни «Капитальной» (проба № 11), в количестве, не превышающем ПДК. В остальных пробах загрязняющие компоненты техногенного характера определены на пределе чувствительности прибора (см. табл. 2).

Максимальное количество мышьяка отмечено в ручье возле штольни «Капитальная» — 0,0079 мг/л, где частично складированы отвалы мышьяксодержащих пород.

Таблица 2. Гидрохимические показатели поверхностных вод, 2021 г.

№ проб	Дата отбора	Минерализация, г/л	pH	Жёсткость общ., мг-экв/л	Формула солевого состава	As, мг/л	Нефтепродукты, мг/л	Фенолы, мг/л	АПАВ, мг/л
11	11.06	0,17	6,56	1,7	$\frac{HCO_3 81 SO_4 10 Cl 7 NO_3 3}{Ca 71 NH_4 15 Mg 10 (Na + K) 4}$	0,0079	0,011	не обн.	не обн.
12	11.06	0,37	7,29	4,40	$\frac{HCO_3 92 SO_4 4 Cl 3 NO_3 1}{Ca 58 Mg 37 NH_4 3 (Na + K) 2}$	0,0057	≤0,005	не обн.	не обн.
13	11.06	0,27	7,33	2,2	$\frac{HCO_3 89 SO_4 6 Cl 5}{Ca 52 (Na + K) 30 Mg 16 NH_4 2}$	0,0056	≤0,005	≤0,0005	≤0,025
14	11.06	0,27	7,48	2,7	$\frac{HCO_3 56 Cl 27 SO_4 17}{Ca 56 (Na + K) 27 Mg 16 NH_4 1}$	≤0,005	≤0,005	≤0,0005	≤0,025
15	11.06	0,09	7,40	1,0	$\frac{HCO_3 70 Cl 18 SO_4 12}{Ca 61 Mg 26 (Na + K) 10 NH_4 3}$	≤0,005	≤0,005	≤0,0005	≤0,025

Примечание. АПАВ — анионные поверхностно-активные вещества; не обн. — не обнаружено.

По данным наблюдений ТГРЭ (которые велись в течение ряда лет) за химическим составом вод р. Элегест выше пос. Сайлыг на участке водозабора поверхностных вод для нужд пгт. Хову-Аксы, воды р. Элегест имеют гидрокарбонатный кальциевый и магниевый-кальциевый состав с минерализацией 0,24–0,34 г/л, pH — 8,0–8,3. Содержание мышьяка в 2004 г. не превышало 0,005 мг/л, в последующие годы находилось в пределах <0,005–0,0055 мг/л (при ПДК мышьяка для вод рыбохозяйственных водоёмов 0,05 мг/л на период обследования) (Никитина, 2004 ф., 2016 ф.).

Подземные воды. В районе расположения скважин выделяются следующие водоносные подразделения:

1. Водоносный голоценовый аллювиальный горизонт, аQ_{IV};
2. Водоносный верхнеплейстоценовый-голоценовый делювиально-пролювиальный горизонт, дрQ_{III-IV};
3. Водоносная нижнедевонская зона трещиноватости вулканогенно-осадочных пород, D_{1kn}.

Скважиной 3334 по ул. Терешковой вскрыт смешанный водоносный комплекс: делювиально-пролювиальный горизонт (дрQ_{III-IV}) и девонская зона трещиноватости (D_{1kn}), которая отдельно нами не рассматривается.

Водоносный верхнеплейстоцен-голоценовый делювиально-пролювиальный горизонт (дрQ_{III-IV}). Из делювиально-пролювиального водоносного горизонта взяты пробы воды №№ 1–3, 6–8 (зима) и №№ 17–18, 21–24 (лето), анализ которых выявил в

них повышенную минерализацию (по пробам зимнего периода — 0,3–0,68 г/л, летнего периода — 0,29–0,67 г/л), а также достаточно высокую жёсткость (3,2–7,1 мг-экв/л — воды от умеренно жёстких до жёстких) за счёт повышенного содержания ионов магния и кальция. По гидрохимическому составу подземные воды преимущественно гидрокарбонатные кальциево-магниевые и смешанного катионного состава с преобладанием или большим содержанием ионов магния. Обобщённая формула солевого состава имеет вид:

$$M_{0,30-0,68} \frac{HCO_3(42-85)Cl(11-30)SO_4(3-30)NO_3(0-5)}{Mg(37-48)Ca(25-48)(Na+K)(15-28)}$$

Содержание тяжёлых металлов и мышьяка в подземных водах делювиально-пролювиального водоносного горизонта приведено в *таблице 3*.

Таблица 3. Содержание тяжёлых металлов и мышьяка в подземных водах делювиально-пролювиального водоносного горизонта (дрQ_{III-IV}) в январе и июне 2018 г.

№ проб	Дата отбора	Место отбора пробы	Содержание тяжёлых металлов и мышьяка, мг/л (в скобках — в единицах ПДК для питьевых вод)							
			As	Zn	Cu	Pb	Cd	Ni	Mn	Co
1	20.01	Скв. 3288 ул. Пролетарская	0,0076 (0,152)	0,005 (0,005)	0,0046 (0,0046)	0,0029 (0,096)	≤0,001 (не обн.)	≤0,005 (не обн.)	0,0033 (0,033)	≤0,005 (не обн.)
17	03.06		0,011 (0,22)	0,0009 (0,0002)	0,00056 (0,000056)	0,00002 (0,007)	0,000003 (0,003)	0,00002 (0,0002)	0,0011 (0,011)	0,00034 (0,00034)
2	20.01	Скв. 3336 ул. Горького	≤0,005 (не обн.)	0,0038 (0,0038)	0,004 (0,004)	0,002 (0,067)	≤0,001 (не обн.)	≤0,005 (не обн.)	0,0039 (0,039)	≤0,005 (не обн.)
18	03.06		0,0037 (0,074)	0,0027 (0,0005)	0,00078 (0,00078)	0,00002 (0,007)	0,000006 (0,006)	≤0,00005 (не обн.)	0,00055 (0,0055)	0,00033 (0,00003)
3	20.01	Скв. 3335 ул. Горная	0,0082 (0,164)	0,0011 (0,0011)	0,006 (0,006)	0,002 (0,067)	≤0,001 (не обн.)	0,0059 (0,059)	0,003 (0,03)	≤0,005 (не обн.)
24	03.06		0,0054 (0,118)	0,00094 (0,0002)	0,00034 (0,00034)	0,000026 (0,001)	≤0,001 (не обн.)	0,000033 (0,00033)	0,00064 (0,0064)	0,00014 (0,00014)
6	20.01	Скв. 3284 ул. Маяковского	0,01 (0,02)	0,0027 (0,0027)	0,0048 (0,0048)	≤0,002 (не обн.)	≤0,001 (не обн.)	≤0,005 (не обн.)	0,001 (0,01)	≤0,005 (не обн.)
21	03.06		0,0045 (0,09)	0,0014 (0,00028)	0,0056 (0,0056)	0,00004 (0,0013)	≤0,001 (не обн.)	0,00007 (0,0007)	0,00027 (0,0027)	0,00009 (0,00009)
8	20.01	Скв. 3286 ул. Степная	0,0074 (0,148)	≤0,001 (не обн.)	0,0025 (0,0025)	0,0021 (0,07)	≤0,001 (не обн.)	≤0,005 (не обн.)	0,0048 (0,048)	≤0,005 (не обн.)
23	03.06		0,0035 (0,07)	0,00071 (0,00014)	0,00034 (0,00034)	0,000043 (0,0013)	0,000005 (0,0005)	0,00011 (0,0011)	0,00042 (0,0042)	0,00009 (0,00009)
7	20.01	Скв. 3334 ул. Терешковой	0,013 (0,26)	≤0,001 (не обн.)	0,0032 (0,0032)	0,002 (0,067)	≤0,001 (не обн.)	≤0,005 (не обн.)	0,0024 (0,024)	≤0,005 (не обн.)
22	03.06		0,0095 (0,19)	0,0014 (0,00028)	0,0013 (0,0013)	0,000039 (0,0013)	≤0,001 (не обн.)	0,00013 (0,0013)	0,00079 (0,0079)	0,00082 (0,00082)

Примечание. не обн. — не обнаружено.

Из определявшихся в воде химических элементов (As, Zn, Cu, Pb, Cd, Ni, Mn, Co) рудообразующими являются никель, кобальт, медь, мышьяк. В результате проведённых исследований выявлено, что:

- в подземных водах делювиально-пролювиального водоносного горизонта присутствие никеля в зимний период отмечено только в скважине по ул. Горной — 0,0059 мг/л (0,059 ПДК для питьевых вод) (*см. рис. 4, табл. 3, проба № 3*). В летних пробах содержание никеля отмечается в пределах 0,00002–0,00013 мг/л при ПДК для питьевых вод, равном 0,1 мг/л. Закономерности в распределении содержания никеля в скважинах по потоку подземных вод от хвостохранилищ не обнаружено;
- кобальт в подземных водах в зимний период не обнаружен. В июне содержание кобальта отмечено в пределах 0,000014–0,00034 мг/л при ПДК, равном 1,0 мг/л. Закономерности в распределении содержания кобальта в скважинах по потоку подземных вод от хвостохранилищ не обнаружено;

- ионы меди определяются в пределах 0,0025–0,0060 мг/л в зимний период и в пределах 0,00034–0,0013 мг/л в летний период. Зимой максимальное содержание меди (0,0060 мг/л) отмечено в скв. 3335 по ул. Горной (см. рис. 4, табл. 3), летом — в скв. 3334 по ул. Терешковой — 0,0013 мг/л. Явной закономерности в распределении содержания меди в скважинах по потоку подземных вод от хвостохранилищ не обнаружено.

Максимальные показатели содержания, как по абсолютной величине, так и по величине ПДК, отмечаются в зимний период для мышьяка. Наибольшее его количество — 0,0130 мг/л (1,3 ПДК) — определяется в скважине, наиболее приближенной к хвостохранилищам бывшего комбината (скв. по ул. Терешковой; см. рис. 4, табл. 3, проба № 7). Относительно повышенные содержания мышьяка в скважинах по убыванию от карт-накопителей, тяготеют к тальвегу лога, т. е. к наиболее пониженной части подземного потока (см. рис. 4):

проба № 7, скв. по ул. Терешковой — 0,0130 мг/л (1,3 ПДК);

проба № 6, скв. по ул. Маяковского — 0,0100 мг/л (1,0 ПДК);

проба № 3, скв. по ул. Горная — 0,0082 мг/л (0,082 ПДК).

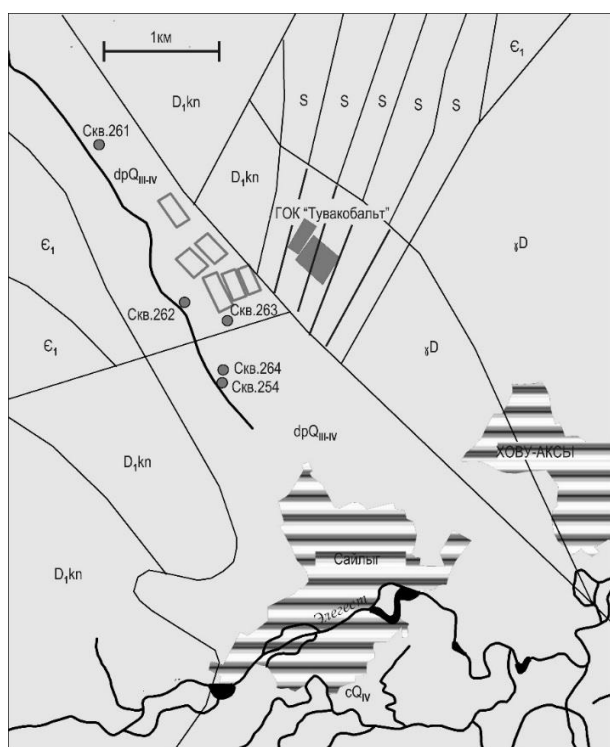


Рисунок 6. Схема геологического строения и расположение наблюдательных скважин гидрогеологического поста в районе комбината Тувакоальт

Можно предположить, что в зимний период 2018 г. наблюдалось некоторое движение мышьяковистых соединений в подземных водах от хвостохранилищ к долине р. Элегест.

В июне содержание мышьяка в подземных водах находилось в пределах 0,011–0,0035 мг/л, причём наибольшее содержание элемента отмечено в скв. 3288 по ул. Пролетарской, максимально удалённой от тальвега лога (см. рис. 4). В целом, в летний период закономерности в распределении содержания мышьяка в скважинах по потоку подземных вод от хвостохранилищ не обнаружено. Содержание мышьяка в подземных водах делювиально-пролювиального водоносного горизонта в единичном случае превышает предельно-допустимую концентрацию (0,01 мг/л) для

питьевых вод (СанПиН 1.2.3685-21, 2021). Состояние подземных вод в районе карт-накопителей (хвостохранилищ) в 80-е годы прошлого столетия изучалось сотрудниками ТГРЭ. Для ведения наблюдений был организован гидрогеологический пост, состоящий из 5 скважин, одна из которых (скв. 261) была пробурена выше хвостохранилищ по рельефу и являлась фоновой. На рисунке 6 отображено схематическое геологическое строение района комбината Тувакоальт и расположение гидрогеологических наблюдательных скважин.

Задачей режимных наблюдений являлось обнаружение загрязняющих веществ (тяжёлых металлов и мышьяка) в подземных водах и установления скорости их распространения. По данным наблюдений ТГРЭ за период с 1984 по 1990 гг., содержание мышьяка в фоновой скв. 261 колебалось от «не обнаружено» до 0,02 мг/л, в наблюдательных скважинах также не превышало 0,02 мг/л.

Таким образом, можно сделать вывод, что содержание мышьяка в подземных водах в районе комбината Тувакобальт в размере 0,02 мг/л является фоновым и определяется присутствием в районе исследования арсенидно-кобальтового месторождения. Подземные воды в районе месторождения, контактируя с арсенидными рудами, а также продуктами коры выветривания, обогащаются мышьяком.

Концентрация мышьяка в скважинах пос. Сайлыг, определённая авторами работы в 2017–2018 гг., не превышает фоновые показатели многолетних наблюдений ТГРЭ.

Водоносный голоценовый аллювиальный горизонт (aQ_{IV}). Пробы из аллювиального горизонта были взяты в пос. Сайлыг на улицах Матросова и Болотной. Опробование на ул. Матросова проводилось из открытого колодца глубиной около 5 м зимой (проба № 4) и летом (проба № 19) 2018 г. Колодец расположен в пойме р. Элегест, под террасовидным уступом в устье лога, в 280 м от реки. Вода из колодца характеризуется как прозрачная (мутность менее 1,0 ЕМ/л), без вкуса, без запаха, цветностью 5°. По данным лабораторных исследований содержание анионов и катионов не превышает норм для питьевых вод. Железо общее составляет 0,10 мг/л (проба № 4) и 0,046 мг/л (проба № 19) при ПДК = 0,3 мг/л.

Большое содержание в воде ионов кальция и магния определяют высокую жёсткость воды, которая под влиянием сезонных факторов может изменяться. Отмечено, что зимой воды характеризуются как умеренно жёсткие (общая жёсткость 4,00 мг-экв/л, при ПДК 7,0 мг-экв/л) и слабощелочные (рН = 7,62, при ПДК от 6,5 до 8,5). Летом воды жёсткие (общая жёсткость 3,85 мг-экв/л) и нейтральные рН = 7,32). В целом, воды пресные с минерализацией 0,41 г/л (проба № 4) и 0,43 г/л (проба № 19) и по химическому составу — гидрокарбонатные смешанного катионного состава с преобладанием ионов кальция.

Из определявшихся тяжёлых металлов свинец, кадмий, никель и кобальт в воде не обнаружены. Содержание цинка, меди и марганца не превышает норм для питьевых вод. Содержание мышьяка составляет менее 0,005 мг/л (проба № 4) и 0,0027 мг/л (проба № 19) при ПДК 0,01 мг/л (табл. 4, см. рис. 4.).

Таблица 4. Содержание тяжёлых металлов и мышьяка в водах аллювиального голоценового водоносного горизонта (aQ_{IV}) в январе и июне 2018 г.

Номера проб	Место отбора	Дата отбора	Содержание тяжёлых металлов и мышьяка, мг/л (в скобках — в единицах ПДК для питьевых вод)							
			As	Zn	Cu	Pb	Cd	Ni	Mn	Co
4	Колодец ул. Матросова	20.01	≤0,005 (не обн.)	≤0,005 (не обн.)	0,0068 (0,0068)	≤0,002 (не обн.)	≤0,001 (не обн.)	≤0,005 (не обн.)	0,002 (0,02)	≤0,005 (не обн.)
19		03.06	0,0027 (0,054)	0,0027 (0,054)	0,00072 (0,00072)	0,000064 (0,0021)	0,0000034 (0,00034)	0,00015 (0,0015)	0,0018 (0,018)	0,000041 (0,000041)
5	Колодец ул. Болотная	20.01	≤0,005 (не обн.)	≤0,005 (не обн.)	0,0054 (0,0054)	≤0,002 (не обн.)	≤0,001 (не обн.)	≤0,005 (не обн.)	0,0017 (0,017)	≤0,005 (не обн.)
20		03.06	0,0016 (0,032)	0,0016 (0,032)	0,00019 (0,00019)	0,000049 (0,0016)	≤0,000001 (не обн.)	0,00002 (0,0002)	0,00025 (0,0025)	0,000012 (0,000012)

Примечание. не обн. — не обнаружено.

Опробование на ул. Болотной проводилось из скважины, расположенной на правом берегу р. Элегест (частный дом, абиссинский колодец) зимой (проба № 5) и летом (проба № 20) 2018 г. Вода характеризуется как прозрачная (мутность менее 1,0 ЕМ/л), без вкуса, без запаха, цветностью 5°. По данным лабораторных исследований содержание анионов и катионов не превышает норм для питьевых вод.

Железо общее содержится в количестве 0,09 мг/л (проба № 5) и 0,032 мг/л (проба № 20) при ПДК = 0,3 мг/л. Воды мягкие зимой (общая жёсткость 1,60 мг-экв/л) и очень мягкие летом (общая жёсткость 1,36 мг-экв/л) при ПДК = 7,0 мг-экв/л. Водная среда слабощелочная (рН = 7,84 зимой и 8,08 летом). Воды ультрапресные с минерализацией от 0,14 г/л (проба № 5) до 0,17 г/л (проба № 20), по химическому составу гидрокарбонатные магниевые-кальциевые зимой и карбонат-гидрокарбонатные кальциево-натриевые летом.

Из определявшихся тяжёлых металлов зимой в воде обнаружены только медь и марганец в незначительных количествах, не превышающих ПДК для питьевых вод. В летний период содержание тяжёлых металлов определено в минимальных количествах (см. табл. 4).

Содержание мышьяка определяется зимой как менее 0,005 мг/л (проба № 5), и летом в размере 0,0016 мг/л (проба № 20) (см. табл. 4).

Рудничные воды. Как указывалось ранее, рудничные воды исследовались в 1970 г. (Поляков, Магдиг, 1971 ф.) и в 2021 г. сотрудниками ТувИКОПР СО РАН.

В 1970 г. было установлено, что в рудничных водах, отобранных из штолен №№ 1, 2, 4 мышьяк содержался в количестве, значительно превышающем санитарные нормы (ПДК—0,01 мг/л). Наибольшая концентрация мышьяка отмечалась в застойных рудничных водах — 0,8–25,0 мг/л, в меньшем количестве — в проточных рудничных водах — 0,32–11,5 мг/л.

Рассмотрим результаты работ за 2021 г.

Штольня «Капитальная» расположена в логу в пределах участка «Северный». На западном склоне в борту лога ряд заброшенных штолен. Днище лога корытообразное, шириной до 50 м. Склоны поросли лиственницей, берёзой, ивой. Крутизна склонов составляет 35°. В левом борту лога у его днища — бетонный портал штольни «Капитальная» (рис. 7).



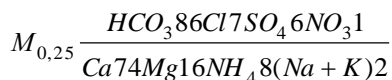
Рисунок 7. Вход в штольню «Капитальная»
(место отбора пробы № 1 в июне 2021 г.)

Проба № 1 отобрана из ручья, вытекающего из штольни «Капитальная» 11.06.2021 г.

По данным полевых исследований вода практически стоячая, желтоватого цвета, без запаха, температура 12°С. По данным лабораторных исследований вода без запаха (0 баллов), цветность составила 133,0°, мутность — 1,2 ЕМ/л.

Воды мягкие, общая жёсткость составляет 2,80 мг-экв/л, карбонатная — 2,7 мг-экв/л, некарбонатная — 0,10 мг-экв/л. Окисляемость перманганатная повышенная и составляет 36,0 мгО₂/л. Водная среда нейтральная (рН = 6,99).

Воды пресные с минерализацией 0,25 г/л, по химическому составу гидрокарбонатно-кальциевые, формула солевого состава имеет вид:



Из катионов отмечается большое содержание аммоний-иона — 4,72 мг/л (9,44 ПДК). Содержание остальных катионов и анионов не превышает норм. Из определявшихся тяжёлых металлов отмечаются превышения по следующим элементам: цинк — 0,0177 мг/л (1,77 ПДК); медь — 0,3701 мг/л (370,1 ПДК).

Кадмий, никель, кобальт, хром не обнаружены. Содержание свинца и марганца не превышают норм. Мышьяк содержится в количестве 0,011 мг/л (1,1 ПДК).

Штольня № 2 расположена в 2,5 км севернее штольни «Капитальная» (см. рис. 3). Вход в штольню забетонирован, перед входом отвал отработанных пород. Из-под отвалов вытекает мощный ручей (рис. 8). Ширина потока 0,3 м, глубина — 0,1 м, скорость течения — 0,3 м/с. Расход ручья равен:

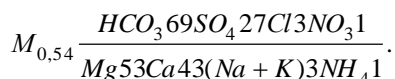
$$Q = 0,3 \times 0,1 \times 0,3 = 0,009 \text{ м}^3/\text{с} = 9 \text{ л/с}$$

Проба № 3 была отобрана из ручья, вытекающего из штольни № 2 на участке «Северный». По данным полевых исследований вода прозрачная, без цвета, без запаха, температура 4°C. По данным лабораторных исследований вода без запаха (0 баллов), цветность составила 5,01°, мутность — менее 1,0 ЕМ/л. Воды жёсткие, общая жёсткость составляет 6,90 мг-экв/л, карбонатная — 5,0 мг-экв/л, некарбонатная — 1,90 мг-экв/л. Окисляемость перманганатная повышенная — 28,80 мгО₂/л. Водная среда слабощелочная, близкая к нейтральной, pH = 7,54.



Рисунок 8. Ручей из штольни № 2 (место отбора пробы № 3 в июне 2021 г.)

Воды повышенной минерализации — 0,54 г/л, по химическому составу сульфатно-гидрокарбонатные кальциево-магниевые, формула солевого состава имеет вид:



Из катионов отмечается повышенное содержание аммоний-иона (2,08 ПДК), магния (1,15 ПДК), железа общего (1,0 ПДК). Содержание остальных катионов и анионов не превышает норм. Из определявшихся тяжёлых металлов отмечаются превышения по следующим элементам: цинк — 0,0404 мг/л (4,04 ПДК), медь — 0,1782 мг/л (178,2 ПДК), свинец — 0,0175 мг/л (2,9 ПДК).

Кадмий, никель, кобальт, хром не обнаружены. Содержание марганца не превышает норм. Мышьяк содержится в количестве 0,0086 мг/л (0,86 ПДК).

Исследования рудничных вод в 2021 г. показали, что содержания мышьяка в водах из штолен за период с 1970 по 2021 г. (период сравнения 51 год) значительно уменьшилось: в 1970 г. было 0,32–25,0 мг/л, в 2021 г. — 0,0086–0,011 мг/л.

Вместе с тем, в рудничных водах отмечается очень высокое содержание меди — 178,2–370,1 ПДК, а также незначительные превышения цинка — 1,77–4,04 ПДК и свинца — 2,9 ПДК. Такие рудообразующие тяжёлые металлы, как никель и кобальт в рудничных водах в 2021 г. не обнаружены.

РЕЗУЛЬТАТЫ ГИДРОХИМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПОВЕРХНОСТНЫХ И ПОДЗЕМНЫХ ВОД В РАЙОНЕ ХОВУ-АКСЫНСКОГО РУДНОГО УЗЛА С 2022 ПО 2023 ГГ. В 2021 г. проведены работы по рекультивации карт-накопителей комбината Тувакобальт. В настоящее время (2022–2023 гг.) эколого-гидрохимический мониторинг поверхностных и подземных вод в районе Хову-Аксынского рудного узла проводится силами агрохимической станции «Тувинская».

В ходе мониторинга опробуются подземные воды в скважине № 3334, расположенной в пос. Сайлыг по ул. Терешковой, и поверхностные воды в следующих точках:

- р. Элегест, поверхностный водозабор для водоснабжения пгт. Хову-Аксы;
- р. Элегест в пос. Сайлыг, у моста через реку;
- р. Элегест в пгт. Хову-Аксы по ул. Дачная.

В *таблице 5* приведены данные по содержанию в поверхностных и подземных водах тяжёлых металлов, мышьяка и нефтепродуктов (как вещества техногенного характера), любезно предоставленные Министерством лесного хозяйства и природопользования Республики Тыва по результатам экологического мониторинга.

Таблица 5. Содержание химических элементов и нефтепродуктов в поверхностных и подземных водах в районе Хову-Аксынского рудного узла в 2022–2023 гг.

Место отбора пробы	Дата отбора	Содержание химических элементов, мг / л										
		Fe	Pb	Mn	Cd	Zn	Cu	Co	Ni	Hg, мкг/л	As	нефтепродукты
р. Элегест, водозабор для пгт. Хову-Аксы	I кв. 2022	≤0,1	0,03	0,06	≤0,005	0,1	0,02	≤0,05	≤0,01	0,2	0,002	0,005
	III кв. 2022	0,14	0,0078	≤0,05	≤0,005	0,016	0,062	≤0,05	0,012	≤0,2	0,0035	0,016
	IV кв. 2022	0,287	0,0058	≤0,05	≤0,005	0,013	0,04	0,05	≤0,01	≤0,2	0,0028	0,021
	II кв. 2023	0,19	0,007	≤0,05	≤0,005	0,144	0,025	≤0,05	0,022	≤0,2	0,0028	0,022
р. Элегест, у моста в пос. Сайлыг	II кв. 2022	≤0,1	0,09	0,09	≤0,005	≤0,005	0,04	≤0,05	0,02	0,2	0,004	0,004
	III кв. 2022	0,18	0,0062	≤0,05	≤0,005	0,017	0,036	≤0,05	0,014	≤0,2	0,0046	0,017
	IV кв. 2022	0,283	0,0044	≤0,05	≤0,005	0,119	0,028	≤0,05	≤0,01	≤0,2	0,004	0,036
	II кв. 2023	0,2	0,0069	≤0,05	≤0,005	0,154	0,051	≤0,05	0,015	≤0,2	0,0028	0,022
р. Элегест, пгт. Хову-Аксы, ул. Дачная	II кв. 2022	≤0,1	0,07	0,09	≤0,005	≤0,005	0,04	≤0,05	0,03	0,2	0,004	≤0,005
	III кв. 2022	0,23	0,006	≤0,05	≤0,005	0,011	0,032	≤0,05	0,027	≤0,2	0,003	≤0,005
	IV кв. 2022	0,354	0,0064	≤0,05	≤0,005	0,022	0,032	≤0,05	≤0,01	≤0,2	0,0034	0,022
	II кв. 2023	0,23	0,0067	≤0,05	≤0,005	0,01	0,042	≤0,05	0,018	≤0,2	0,003	0,024
Скв. 334, пос. Сайлыг, ул. Терешковой	II кв. 2022	0,12	0,08	0,07	≤0,005	≤0,005	0,02	≤0,05	≤0,01	0,2	0,003	0,005
	III кв. 2022	0,12	0,0069	≤0,05	≤0,005	0,02	0,03	≤0,05	0,011	≤0,2	0,0042	≤0,005
	IV кв. 2022	0,452	0,006	≤0,05	≤0,005	0,077	0,053	0,064	≤0,01	≤0,2	0,0026	≤0,005
	II кв. 2023	0,29	0,0064	≤0,05	≤0,005	0,105	0,038	≤0,05	0,015	≤0,2	0,0018	0,025

Содержание тяжёлых металлов и мышьяка в поверхностных водах р. Элегест за 2022–2023 гг. и результаты предыдущих исследований по величинам сопоставимы и находятся в пределах одного порядка (см. табл. 1, 2, 5).

Содержание мышьяка в скв. 3334 по ул. Терешковой стало значительно ниже (0,0018–0,0042 мг/л) по сравнению с результатами предыдущих исследований (0,013 мг/л, Кальная, Аюнова, 2019) и не превышает современных требований к питьевым водам в соответствии с СанПиН 1.2.3685-21 (2021). Предполагаем, что рекультивация карт-накопителей комбината в данном случае сыграла положительную роль, фильтрация атмосферных осадков через хвостохранилища и вынос тяжёлых металлов и мышьяка в подземные воды значительно уменьшились.

Надо отметить, что практически во всех пробах поверхностных вод отмечается присутствие нефтепродуктов, не превышающих ПДК. Тем не менее, данный факт свидетельствует об определённой степени загрязнения поверхностных вод продуктами техногенного характера.

Выводы

I. *Поверхностные воды.* Основные показатели химического состава поверхностных вод, полученные авторами данной работы в 2017–2018 гг. и в 2021 г. и по ряду наблюдений ТГРЭ сопоставимы. Так же сопоставимы результаты содержания мышьяка и ТМ в поверхностных водах за период 2022–2023 гг. по результатам мониторинга, ведущегося после рекультивации хвостохранилищ комбината Тувакобальт.

Кроме этого, авторы работы склоняются к тому, что, хоть и в незначительных количествах, мышьяк всё же до рекультивации карт-накопителей в 2021 г. поступал в поверхностные воды р. Элегест в результате разгрузки подземных вод верхнеплейстоценово-голоценового делювиально-пролювиального водоносного горизонта, в поле развития которого расположены хвостохранилища комбината Тувакобальт с мышьяк-содержащими соединениями.

Фоновое содержание мышьяка в р. Элегест может быть обусловлено разгрузкой подземных вод, циркулирующих в пределах Хову-Аксынского рудного узла и содержащих ионы мышьяка, в поверхностные воды рассматриваемого бассейна.

Содержание в поверхностных водах нефтепродуктов свидетельствует о существовании антропогенной нагрузки на р. Элегест.

II. *Подземные воды.* В подземных водах верхнеплейстоценово-голоценового делювиально-пролювиального водоносного горизонта содержание мышьяка до рекультивации хвостохранилищ определялось в пределах от менее 0,005 мг/л (не обнаружено) до 0,013 мг/л, в аллювиальных подземных водах мышьяк содержался в пределах от менее 0,005 мг/л (не обнаружено) до 0,0027 мг/л, что в единичных случаях превышало предельно-допустимую концентрацию (0,01 мг/л) для питьевых вод (СанПиН 1.2.3685-21, 2021).

1. В январе 2018 г. отмечено, что относительно повышенные содержания мышьяка в скважинах по убыванию от карт-накопителей тяготеют к тальвегу лога, т. е. к наиболее пониженной части подземного потока. Можно предположить, что в этот период времени наблюдалось некоторое движение мышьяковистых соединений в подземных водах от хвостохранилищ к долине р. Элегест, что подтверждалось несколько повышенным содержанием мышьяка в пробе № 3 (0,0077 мг/л), отобранной из реки в пос. Сайлыг, где происходит разгрузка подземных вод.

2. По результатам гидрохимического мониторинга после рекультивации карт-накопителей содержание мышьяка в скв. 3334 по ул. Терешковой уменьшилось с 0,013 мг/л (2018 г.) до 0,0018–0,0042 мг/л (2022–2023 гг.), что связано с рекультивацией карт-накопителей комбината Тувакобальт.

3. Присутствие мышьяка в подземных водах в районе исследований определяется как природными (Хову-Аксынское арсенидно-кобальтовое месторожде-

ние, состав переотложенных продуктов коры выветривания), так и антропогенными факторами (хвостохранилища комбината Тувакобальт).

4. Проведённый для оценки экологического состояния подземных вод бассейновый анализ лога Хову-Аксы совместно с полевыми морфометрическими исследованиями и гидрогеохимическим опробованием (Кальная и др., 2019; Платонова и др., 2020, 2021) позволяет моделировать условия накопления и аккумуляции природного и антропогенного загрязнения в различных бассейнах.

III. *Рудничные воды.* Исследования рудничных вод в 2021 г. показали, что содержания мышьяка в водах из штолен за период 1970–2021 гг. (период сравнения 51 год) значительно уменьшилось: 1970 г. — 0,32–25,0 мг/л, 2021 г. — 0,0086–0,011 мг/л.

*Работа выполнена в рамках работ по Государственному заданию
ТувИКОПР СО РАН, научная тема 222020400035-4.*

ЛИТЕРАТУРА

- Бортникова С.Б., Гаськова О.Л., Бессонова Е.П.* Геохимия техногенных систем / Отв. ред. Г.Н. Аношин. – Новосибирск: ИГМ СО РАН, 2006. – 169 с.
- Гаськова О.Л., Бортникова С.Б., Бессонова Е.П.* Почвенные аномалии в районе хранилища отходов комбината Тувакобальт, Хову-Аксы, Тыва // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2003. – № 11. – С. 115–120.
- Гидрохимические показатели состояния окружающей среды: справочные материалы / Под ред. Т.В. Гусевой.* – М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2007. – 192 с.
- ГОСТ 31861-2012.* Вода. Общие требования к отбору проб. – М.: Стандартинформ, 2019. – 32 с.
- Гуркова Е.А., Аюнова О.Д., Волобаев А.А., Кальная О.И.* К вопросу об оценке загрязнения почв отходами горно-обогатительного комбината Тувакобальт (Тува) // Устойчивое развитие горных территорий. – 2019. – № 2. – С. 142–153.
- Забелин В.И.* Распределение токсичных химических элементов в природных и антропогенных средах на территории бывшего ГОКа Тувакобальт // Состояние и освоение и природных ресурсов Тывы и сопредельных регионов Центральной Азии. Эколого-экономические проблемы природопользования / Отв. ред. докт. геол.-мин. наук В.И. Лебедев. – Кызыл: ТувИКОПР СО РАН, 2016. – С. 119–128.
- Забелин В.И.* Негативное экологическое наследие завершённой в XX веке добычи полезных ископаемых: проблемы бывшего ГОК Тувакобальт // Технологии гражданской безопасности. – 2018. – Т. 15. – № 2 (56). – С. 58–62.
- Кальная О.И., Монгуш С.П., Гуркова Е.А., Аюнова О.Д.* Отходы комбината Тувакобальт как источник экологической напряжённости в Республике Тыва // Экологический вестн. Северного Кавказа. – 2018. – Т. 14. – № 4. – С. 64–70.
- Кальная О.И., Платонова С.Г., Аюнова О.Д., Скрипко В.В., Копылова Ю.Г., Хацевская А.А.* Роль бассейновой организации территории в формировании гидрохимического состава подземных вод в районе Хову-Аксынского арсенидно-кобальтового месторождения (Тыва) // Московский экономический журн. – 2019. – № 1. – С. 144–156.
- Кальная О.И., Аюнова О.Д.* Эколого-гидрохимическое состояние подземных вод в районе арсенидно-кобальтового месторождения Хову-Аксы // Природные ресурсы, среда и общество: Электрон. науч. журн. Вып. 1 (1) / Отв. ред. канд. социол. наук Т.М. Ойдуп [Электрон. ресурс: 2019]. – Кызыл: ТувИКОПР СО РАН, 2019. – С. 9–14. – Режим доступа: <http://tikopr-journal.ru/images/2019/01/ART/1-2019-Kalnaya.pdf>, свободный.
- Качурин Л.С., Медведев В.Д., Шелковникова О.* Результаты гидрогеологических работ в районе медно-никель-кобальтового месторождения Хову-Аксы: Окончательный отч. о работах Хову-Аксынской ГРП-18 за 1965–1966 гг. – Хову-Аксы, 1967 ф. – 238 с. (Тыв. фил. ФБУ «ТФГИ по СФО», Инв. № 1687).
- Лебедев В.И.* Рудномагматические системы эталонных арсенидно-кобальтовых месторождений / Отв. ред. докт. геол.-мин. наук А.А. Оболенский. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1998. – 136 с.

- Лебедев В.И., Бурдин Н.В., Лебедев Н.И., Лебедева М.Ф., Лебедева С.В.* Возможность возрождения кобальтового производства в Туве // Современные наукоёмкие технологии. – 2009. – № 2. – С. 12–19.
- Лебедев В.И.* Кобальтоносные структуры Тувы // Состояние и освоение природных ресурсов Тувы и сопредельных регионов Центральной Азии. Геоэкология природной среды и общества: Вып. 10, 11 / Отв. ред. докт. геол.-мин. наук В.И. Лебедев. – Кызыл: ТуВИКОП СО РАН, 2010. – С. 63–74.
- Лебедев В.И., Бурдин Н.В., Лебедева М.Ф., Бурдин В.Н.* Острая экологическая обстановка с картами захоронения комбината Тувакобальт // Мир науки, культуры, образования. – 2012. – № 5. – С. 70–71.
- Лебедев В.И.* Арсенидное кобальтовое месторождение Хову-Аксы: проблемы возрождения уникального кобальтового производства в Туве // Уникальные исследования XXI века [Электрон. ресурс]. – 2015. – № 3 (3). – С. 15–25. – Режим доступа: http://www.docme.ru/doc/1560727/arsenidnoe-kobal_tovoe-mestorozhdenie-hovu-aksy-problemy-v_svoobodnyy, свободный.
- Лебедев В.И.* Проблемы возрождения уникального кобальтового производства в Туве // Евразийское науч. объедин. – 2017. – Т. 2. – № 3 (25). – С. 158–162.
- Лебедев В.И.* Кобальтовые месторождения Тувы и сопредельных регионов Центральной Азии / Отв. ред. докт. геол.-мин. наук, проф. А.С. Борисенко. – Барнаул: Новый формат, 2018. – 203 с.
- Монгуш С.П., Кальная О.И., Аюнова О.Д.* Экологическая напряжённость: Хову-Аксынское месторождение (на примере Тувакобальт) // Экспериментальные и теоретические исследования в современной науке: проблемы, пути решения: Материалы XVI Всерос. науч.-практ. конф. (26.11.2018, Ростов на Дону): в 3-х ч. – Ростов на Дону: ИУБиП, 2018. – Ч. 2. – С. 325–330.
- Никитина И.С.* Государственный мониторинг подземных вод на территории Республики Тыва в 2004 году: Информационный отч. Гидрогеологической партии за 2004 г. – Кызыл, 2004 ф. – 150 с. (Тыв. фил. ФБУ «ТФГИ по СФО», Инв. № 2441).
- Никитина И.С.* Ведение наблюдений на пунктах наблюдательной сети за опасными экзогенными геологическими процессами и подземными водами, камеральная обработка и подготовка материалов для оценки состояния недр по территории Республики Тыва: Отчёт о результатах работ по объекту. – Кызыл, 2016 ф. – 165 с.
- Ондар У.В., Лосев В.Н., Очур-оол А.О., Ондар С.О., Шыырапай У.В., Смагунова А.Н.* Загрязнение мышьяком природных объектов в районе комбината Тувакобальт // Вестн. Красноярского гос. пед. ун-та им. В.П. Астафьева. – Красноярск: КГПУ, 2010. – № 3. – С. 254–259.
- Платонова С.Г., Кальная О.И., Скрипко В.В.* Пространственная дифференциация гидрохимического состава подземных вод в бассейне лога Хову-Аксы // Природные ресурсы, среда и общество: Электрон. науч. журн. Вып. 3 (7) / Отв. ред. канд. социол. наук Т.М. Ойдул [Электрон. ресурс: 2020]. – Кызыл: ТуВИКОП СО РАН, 2020. – С. 20–26. – Режим доступа: <http://tikopr-journal.ru/images/2020/03/ART/03.pdf>, свободный.
- Платонова С.Г., Кальная О.И., Скрипко В.В., Копылова Ю.Г., Хвациевская А.А.* Геоэкологическая оценка состояния подземных вод с использованием бассейнового подхода (на примере района Хову-Аксынского месторождения, Тыва) // География и природные ресурсы. – 2021. – № 1. – С. 149–157.
- Поляков М.Л., Магдиг Н.Я.* Исследование поверхностных, подземных и рудничных вод и почв района месторождения Хову-Аксы на содержание мышьяка: Отчёт по науч. исслед. работе: (тема: миграция мышьяка). – Хову-Аксы, 1971 ф. – 35 с. (Тыв. фил. ФБУ «ТФГИ по СФО», Инв. № 2292).
- Правила охраны поверхностных вод (Типовые положения). Приложение № 3: Перечень ПДК показателей загрязнения в воде водоёмов рыбохозяйственного, хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования [Электрон. ресурс]. – М., 1991. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/901855941?marker=7EE0KI>, свободный.*
- СанПиН 1.2.3685-21.* Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания [Электрон. ресурс]. – М., 2021. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/573500115?marker=6560IQ>, свободный.

Угрюмов А.Г., Топоркова Т.А. Изучение режима подземных вод и контроль за их охраной от истощения и загрязнения: Отч. Гидрорежимного отряда за 1983–1986 гг. – Кызыл, 1986 ф. – 186 с. (Тыв. фил. ФБУ «ТФГИ по СФО», Инв. № 1880).

Bortnikova S.B., Yurkevich N.V., Gaskova O.L., Volynkin S.S., Edelev A.V., Grakhova S.P., Kalnaya O.I., Khusainova A. Sh., Khvashchevskaya A.A., Saeva O.P., Podolynnaya V.A., Kurovskaya V.V. Arsenic and heavy metal speciation in abandoned arsenide tailings: dissolved, soluble and volatile modes of occurrences during 20-year storage // *Chemical Geology*. – 2021. – Vol. 586. – Available at: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2021.120623>.

REFERENCES

- Bortnikova S.B., Gas'kova O.L., Bessonova Ye.P. *Geokhimiya tekhnogennykh sistem* [Geochemistry of technogenic systems] / ed. by G.N. Anoshin. Novosibirsk, IGM SB RAS Publ., 2006, 169 p. (In Russ.)
- Gas'kova O.L., Bortnikova S.B., Bessonova Ye.P. Pochvennyye anomalii v rayone khranilishcha otkhodov kombinata Tuvakobal't, Khovu-Aksy, Tyva [Soil anomalies in the area of the Tuvakobalt waste storage, Khovu-Aksy, Tyva]. *Poverkhnost'. Rentgenovskiy, sinkhrotronnyy i neytronnyy issledovaniya = Surface. X-ray, synchrotron and neutron studies*, 2003, no. 11, pp. 115–120. (In Russ.)
- Gidrokhimicheskiye pokazateli sostoyaniya okruzhayushchey sredy: spravochnyye materialy* [Hydrochemical indicators of the state of the environment: reference materials] / ed. by T.V. Guseva. Moscow, FORUM INFRA-M Publ., 2007, 192 p. (In Russ.)
- GOST 31861-2012. Voda. Obshchiye trebovaniya k otboru prob* [GOST 31861-2012. Water. General requirements for sampling]. Moscow, Standartinform Publ., 2019, 32 p. (In Russ.)
- Gurkova Ye.A., Ayunova O.D., Volobayev A.A., Kal'naya O.I. K voprosu ob otsenke zagryazneniya pochv otkhodami gorno-obogatitel'nogo kombinata Tuvakobal't (Tuva) [The issue of assessing soil pollution by wastes from the Tuvakobalt mining plant (Tuva)]. *Ustoychivoye razvitiye gornyykh territoriy = Sustainable development of mountainous territories*, 2019, no. 2, pp. 142–153. (In Russ.)
- Zabelin V.I. Raspredeleniye toksichnykh khimicheskikh elementov v prirodnykh i antropogennykh sredakh na territorii byvshego GOKa Tuvakobal't [Distribution of toxic chemical elements in natural and anthropogenic environments on the territory of the former Tuvacobalt mining company]. *The state and development of natural resources of Tuva and adjacent regions of Central Asia. Ecological and economic problems of environmental management* / ed. by V.I. Lebedev. Kyzyl, TuvIENR SB RAS Publ., 2016, pp. 119–128. (In Russ.)
- Zabelin V.I. Negativnoye ekologicheskoye naslediyе zavershonnoy v XX veke dobychi poleznykh iskopayemykh: problemy byvshego GOK Tuvakobal't [Negative environmental inheritance of mineral extraction completed in the 20th century: problems of the former Tuvacobalt mining company]. *Tekhnologii grazhdanskoй bezopasnosti = Civil Safety Technologies*, 2018, vol. 15, no. 2 (56), pp. 58–62. (In Russ.)
- Kal'naya O.I., Mongush S.P., Gurkova Ye.A., Ayunova O.D. Otkhody kombinata Tuvakobal't kak istochnik ekologicheskoy napryazhennosti v Respublike Tyva [Wastes from the Tuvakobalt plant as a source of environmental tension in the Republic of Tyva]. *Ekologicheskyy vestnik Severnogo Kavkaza = Ecological Bulletin in North Caucasus*, 2018, vol. 14, no. 4, pp. 64–70. (In Russ.)
- Kal'naya O.I., Platonova S.G., Ayunova O.D., Skripko V.V., Kopylova Yu.G., Khvashchevskaya A.A. Rol' basseynovoy organizatsii territorii v formirovaniy gidrokhimicheskogo sostava podzemnykh vod v rayone Khovu-Aksynskogo arsenidno-kobal'tovogo mestorozhdeniya (Tyva) [The role of the basin organization of the territory in the formation of the hydrochemical composition of groundwater in the area of the Khovu-Aksynsky n arsenide-cobalt deposit (Tyva)]. *Moskovskiy ekonomicheskyy zhurnal = Moscow Economic Journal*, 2019, no. 1, pp. 144–156. (In Russ.)
- Kal'naya O.I., Ayunova O.D. Ekologo-gidrokhimicheskoye sostoyaniye podzemnykh vod v rayone arsenidno-kobal'tovogo mestorozhdeniya Khovu-Aksy [Ecological hydrochemical state of groundwater in the area of the Khovu-Aksy arsenide-cobalt deposit]. *Prirodnyye resursy, sreda i obshchestvo = Natural resources, environment and society*, 2019, no. 1 (1), pp. 9–14. Available at: <http://tikopr-journal.ru/images/2019/01/ART/1-2019-Kalnaya.pdf>. (In Russ.)

- Kachurin L.S., Medvedev V.D., Shelkovnikova O. *Rezultaty gidrogeologicheskikh rabot v rayone medno-nikel'-kobal'tovogo mestorozhdeniya Khovu-Aksy* [Results of hydrogeological work in the area of the Khovu-Aksynsky copper-nickel-cobalt deposit]: *Final report on the work of the Khovu-Aksynsky hydraulic fracturing station-18 for 1965–1966*. Khovu-Aksy, 1967, 238 p. (Tyvinian branch of the Federal Budgetary Institution «Territorial Funds of Geological Information for the Siberian Federal District», inv. no. 1687). (In Russ.)
- Lebedev V.I. *Rudnomagmaticheskiye sistemy etalonnykh arsenidno-kobal'tovykh mestorozhdeniy* [Ore-magmatic systems of arsenide-cobalt deposits] /ed. by A.A. Obolenskiy. Novosibirsk, Publishing House of SB RAS, 1998, 136 p. (In Russ.)
- Lebedev V.I., Burdin N.V., Lebedev N.I., Lebedeva M.F., Lebedeva S.V. *Vozmozhnost' vozrozhdeniya kobal'tovogo proizvodstva v Tuve* [Possibility of reviving cobalt production in Tuva]. *Sovremennyye naukoymkiye tekhnologii = Modern science-intensive technologies*, 2009, no. 2, pp. 12–19. (In Russ.)
- Lebedev V.I. *Kobal'tonosnyye struktury Tuvy* [Cobalt-rich structures of Tuva]. *Sostoyaniye i osvoyeniye prirodnykh resursov Tuvy i sopredel'nykh regionov Tsentral'noy Azii. Geoekologiya prirodnoy sredy i obshche-stva* [The state and exploration of natural resources of Tuva and adjacent regions of the Central Asia. Geocology of environment and society]: Issue. 10, 11 / ed. by V.I. Lebedev. Kyzyl, TuvIENR SB RAS Publ., 2010, pp. 63–74. (In Russ.)
- Lebedev V.I., Burdin N.V., Lebedeva M.F., Burdin V.N. *Ostraya ekologicheskaya obstanovka s kartami zakhroneniya kombinata Tuvakobal't* [Acute ecological situation with burial maps of the Tuvacobalt plant]. *Mir nauki, kul'tury, obrazovaniya = World of science, culture, education*, 2012, no. 5, pp. 70–71. (In Russ.)
- Lebedev V.I. *Arsenidnoye kobal'tovoye mestorozhdeniye Khovu-Aksy: problemy vozrozhdeniya unikal'nogo kobal'tovogo proizvodstva v Tuve* [The Khovu-Aksynsky arsenide cobalt deposit: problems of reviving the unique cobalt production in Tuva]. *Unikal'nyye issledovaniya XXI veka = Unique research of the XXI century*, 2015, no. 3 (3), pp. 15–25. Available at: http://www.docme.ru/doc/1560727/arsenidnoe-kobal_tovoe-mestorozhdenie-hovu-aksey-roblemy-v. (In Russ.)
- Lebedev V.I. *Problemy vozrozhdeniya unikal'nogo kobal'tovogo proizvodstva v Tuve* [Problems of reviving the unique cobalt production in Tuva]. *Yevraziyskoye nauchnoye ob'yedineniye = Eurasian Scientific Association*, 2017, vol. 2, no. 3 (25), pp. 158–162. (In Russ.)
- Lebedev V.I. *Kobal'tovyeye mestorozhdeniya Tuvy i sopredel'nykh regionov Tsentral'noy Azii* [Cobalt deposits of Tuva and adjacent regions of Central Asia] / ed. by A.S. Borisenko. Barnaul, New format Publ., 2018, 203 p. (In Russ.)
- Mongush S.P., Kal'naya O.I., Ayunova O.D. *Ekologicheskaya napryazhonnost': Khovu-Aksynskoye mestorozhdeniye (na primere Tuvakobal't)* [Environmental tension: the Khovu-Aksynsky deposit (Tuvakobalt case study)]. *Ekspierimental'nyye i teoreticheskiye is-sledovaniya v sovremennoy nauke: problemy, puti resheniya* [Experimental and theoretical research in modern science: problems, solutions]: Materials of the XVI All-Russian Scientific and Practical Conference (11.26.2018, Rostov-on-Don): in 3 parts. Rostov-on-Don, Southern University Publ., 2018, part 2, pp. 325–330. (In Russ.)
- Nikitina I.S. *Gosudarstvennyy monitoring podzemnykh vod na territorii Respubliki Tyva v 2004 godu* [State monitoring of groundwater in the Republic of Tyva in 2004]: Information report of the Hydrogeological Expedition for 2004. Kyzyl, 2004, 150 p. (Tyvinian branch of the Federal Budgetary Institution «Territorial Funds of Geological Information for the Siberian Federal District», inv. no. 2441). (In Russ.)
- Nikitina I.S. *Vedeniye nablyudeniy na punktakh nablyudatel'noy seti za opasnymi ekzogennymi geologicheskimi protsessami i podzemnymi vodami, kameral'naya obrabotka i podgotovka materialov dlya otenki sostoyaniya nedr po territorii Respubliki Tyva* [Monitoring at observation network stations for dangerous exogenous geological processes and groundwaters, laboratory processing and preparation of materials for assessing the subsoil condition on the territory of the Republic of Tyva]: Report on the results of work on the facility. Kyzyl, 2016, 165 p. (In Russ.)
- Ondar U.V., Losev V.N., Ochur-ool A.O., Ondar S.O., Shyyrapay U.V., Smagunova A.N. *Zagryazneniye mysh'yakom prirodnykh ob'yektov v rayone kombinata Tuvakobal't* [Arsenic contamination of natural objects in the area of the Tuvacobalt plant]. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. V.P. Astaf'yeva = Bulletin of the Krasnoyarsk State Pedagogical University named after V.P. Astafiev*. Krasnoyarsk, KSPU Publ., 2010, no. 3, pp. 254–259. (In Russ.)

- Platonova S.G., Kal'naya O.I., Skripko V.V. Prostranstvennaya differentsiatsiya gidrokhimi-cheskogo sostava podzemnykh vod v bassejne loga Khovu-Aksy [Spatial differentiation of the hydrochemical composition of groundwaters within the Khovu-Aksynsky basin]. *Prirodnyye resursy, sreda i obshchestvo = Natural resources, environment and society*, 2020, no. 3 (7), pp. 9–14. Available at: <http://tikopr-journal.ru/images/2020/03/ART/03.pdf>. (In Russ.)
- Platonova S.G., Kal'naya O.I., Skripko V.V., Kopylova Yu.G., Khvashchevskaya A.A. Geoekologicheskaya otsenka sostoyaniya podzemnykh vod s ispol'zovaniyem basseynovogo podkhoda (na primere rayona Khovu-Aksynskogo mestorozhdeniya, Tyva) [Geoecological assessment of the groundwaters condition using the basin approach (the Khovu-Aksynsky basin case study, Tyva)]. *Geografiya i prirodnyye resursy = Geography and natural resources*, 2021, no. 1, pp. 149–157. (In Russ.)
- Polyakov M.L., Magdig N.Ya. *Issledovaniye poverkhnostnykh, podzemnykh i rudnichnykh vod i pochv rayona mestorozhdeniya Khovu-Aksy na sodержaniye mysh'yaka* [Study of surface, underground and mine waters and soils of the Khovu-Aksynsky deposit area for arsenic content]: Research report: (topic: arsenic migration). Khovu-Aksy, 1971, 35 p. (Tyvinian branch of the Federal Budgetary Institution «Territorial Funds of Geological Information for the Siberian Federal District», inv. no. 2292). (In Russ.)
- Pravila okhrany poverkhnostnykh vod* (Tipovyie polozeniya). Prilozheniye № 3: Perechen' PDK pokazateley zagryazneniya v vode vodoyomov rybokhozyaystvennogo, khozyaystvenno-pit'yevogo i kul'turno-bytovogo vodopol'zovaniya [Protection regulations for surface waters (Model regulations). Appendix no. 3: List of maximum permissible concentrations of pollution indicators in fishery, household and drinking waters and cultural and domestic water use]. Moscow, 1991. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/901855941?marker=7EE0KI>. (In Russ.)
- SanPiN 1.2.3685-21. *Gigiyenicheskiye normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov srede obitaniya* [SanPiN 1.2.3685-21. Hygienic standards and requirements for the safety and (or) harmlessness of environmental factors to humans]. Moscow, 2021. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/573500115?marker=6560IQ>. (In Russ.)
- Ugryumov A.G., Toporkova T.A. *Izucheniye rezhima podzemnykh vod i kontrol' za ikh okhranoy ot istoshcheniya i zagryazneniya* [Study of groundwaters and protection control from depletion and pollution]: Report of the Hydroregime Squad for 1983–1986. Kyzyl, 1986, 186 p. (Tyvinian branch of the Federal Budgetary Institution «Territorial Funds of Geological Information for the Siberian Federal District», inv. no. 1880). (In Russ.)
- Bortnikova S.B., Yurkevich N.V., Gaskova O.L., Volynkin S.S., Edelev A.V., Grakhova S.P., Kal'naya O.I., Khusainova A.Sh., Khvashchevskaya A.A., Saeva O.P., Podolynnaya V.A., Kurovskaya V.V. Arsenic and heavy metal speciation in abandoned arsenide tailings: dissolved, soluble and volatile modes of occurrences during 20-year storage. *Chemical Geology*, 2021, vol. 586. – Available at: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2021.120623>.