

## ГЕОЭКОЛОГИЯ

Научная статья  
УДК 504.1(571.55)  
doi: 10.17223/25421379/35/8

### ТЕХНОЗЕМЫ ХВОСТОХРАНИЛИЩ ВОЛЬФРАМОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ВОСТОЧНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ: ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ, ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ



Баир Намжилович Абрамов<sup>1</sup>, Тимур Гармажапович Цыренов<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> *Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Чита, Россия*

<sup>1</sup> *b\_abramov@mail.ru*

<sup>2</sup> *master.of.pistols@mail.ru*

**Аннотация.** В техноземах вольфрамовых месторождений Восточного Забайкалья, по данным рентгенофлуоресцентного метода, выявлены следующие значения превышения ПДК почв: As (14–169), Pb (1,0–36,7), Zn (3,5–39,13), Cu (2,7–110,6). Выявлено, что по показателю загрязненности почв населенные пункты, связанные с отработкой вольфрамовых месторождений, относятся к низкой степени загрязненности ( $Z_c < 16$ ). Установлено, что среди хвостохранилищ вольфрамовых месторождений наибольшей токсичностью характеризуются техноземы хвостохранилища Букукинского месторождения ( $ГЭр = 1818$ ), наименьшей токсичностью – хвостохранилища Спокойнинского месторождения ( $ГЭр = 98$ ). При этом токсичность техноземов хвостохранилищ вольфрамовых месторождений Восточного Забайкалья, по оценке потенциальной токсичности рудных месторождений, соответствует токсичности вольфрамовых месторождений.

**Ключевые слова:** *вольфрамовые месторождения, хвостохранилище, концентрации вольфрама, техногенные месторождения, токсичность, Восточное Забайкалье*

**Источник финансирования:** работа выполнена в рамках государственного задания ИПРЭК СО РАН при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FUF2021-0006.

**Для цитирования:** Абрамов Б.Н., Цыренов Т.Г. Техноземы хвостохранилищ вольфрамовых месторождений Восточного Забайкалья: геохимические особенности, воздействие на окружающую среду // Геосферные исследования. 2025. № 2. С. 101–113. doi: 10.17223/25421379/35/8

Original article  
doi: 10.17223/25421379/35/8

### TECHNOZEMS OF TUNGSTEN DEPOSIT TAILINGS DUMPS IN EASTERN TRANSBAIKALIA: GEOCHEMICAL FEATURES, ENVIRONMENTAL IMPACT

Bair N. Abramov<sup>1</sup>, Timur G. Tsyrenov<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> *Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology, SB RAS, Chita, Russia*

<sup>1</sup> *b\_abramov@mail.ru*

<sup>2</sup> *master.of.pistols@mail.ru*

**Abstract.** The analysis of elemental composition concentrations in the tailings of tungsten deposits showed significant exceedances of MPC of toxic elements of the first and second hazard class. The following exceedances of MPC were obtained: As (14–169), Pb (1–36.7), Zn (3.5–39.13), Cd (8.0–7.5), Cu (2.7–110.6). At the same time, in soil samples the same elements have the following exceedances of MPC: As (0–15), Pb (0.7–1.1), Zn (2.1–3.1), Cd (0–27), Cu (6–10). Calculation of potential toxicity of technozems of tungsten deposits by the method according to R.V. Goleva et al. [Goleva et al., 2001] showed that the greatest environmental hazard is characterised by the tailing dump of Bukukinsky deposit ( $GEr = 1596$ ), the lowest – by the tailing dump of Spokoininsky deposit ( $GEr = 95$ ). In drainage waters of Bukukinsky and Antovogorsky deposits significant excess of values of ratios of average contents of elements to their contents in leaching waters was revealed. Thus, in drainage waters of Bukukinsky deposit the following excesses were obtained: Cd – 306 times, Zn – 289, Pb – 75,3; of Antovogorsky deposit – Cd – 241,5 times, Zn – 84,4; Pb – 5,7. It is explained by more intensive transition into solution by oxidative dissolution of Cd and Zn sulphides in comparison with other sulphides. Calculations show that the total soil contamination indices of settlements associated with the mining of tungsten deposits have low values of soil contamination degree ( $Z_c < 16$ ). High concentrations of tungsten (more than 0.01%) in tailing dumps, except for Spokoininsky deposit, allow to consider as technogenic deposits of tungsten.

**Keywords:** tungsten deposits, tailing dump, tungsten concentrations, technogenic deposits, toxicity, Eastern Transbaikalia

**Source of financing:** The work was carried out within the framework of the state assignment of the Institute of Natural Resources and Ecology of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project No. FUF2021-0006.

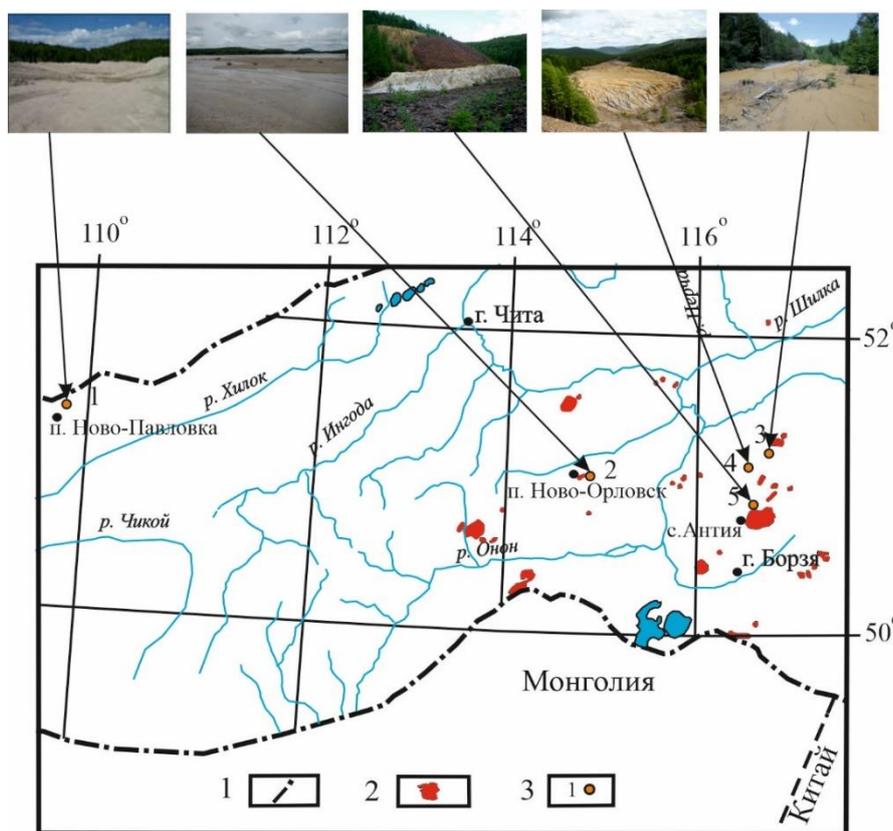
**For citation:** Abramov B.N., Tsyrenov T.G. (2025) Technozems of tungsten deposit tailings dumps of the Eastern Transbaikalia: geochemical features, environmental impact. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 2. pp. 101–113. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/35/8

### Введение

На территории Восточного Забайкалья известно несколько сотен месторождений и рудопроявлений вольфрама, наиболее крупные из них – Антоновогорское, Спокойнинское, Букукинское, Белухинское и Бом-Горхонское (рис. 1).

В металлогении Восточного Забайкалья месторождения вольфрама занимают одно из ведущих мест, что связано с широким развитием на его территории вольфрамоносных гранитоидов кукульбейского комплекса (J<sub>3</sub>). Значительная часть этих место-

рождений уже отработана, некоторые из них отработываются в настоящее время, являясь источником постоянного техногенного загрязнения окружающей среды. Так, отработка Букукинского месторождения велась с 1915 по 1962 г., Белухинского – с 1926 по 1962 г., Антоновогорского – с 1940 по 1960 г., Бом-Горхонского – с 1986 по 2020 г., Спокойнинского месторождения – с 1940 г. до начала текущего столетия, затем после непродолжительного перерыва вновь была возобновлена в 2011 г. Населенные пункты (н.п.) в районах Белухинского и Букукинского месторождений отсутствуют.



**Рис. 1. Схема размещения выходов вольфрамовых месторождений Восточного Забайкалья**

1 – государственные и административные границы; 2 – выходы интрузий кукульбейского комплекса (J<sub>3</sub>); 3 – вольфрамовые месторождения: 1 – Бом-Горхонское, 2 – Спокойнинское, 3 – Белухинское, 4 – Букукинское, 5 – Антоновогорское

**Fig. 1. Outcrops location scheme of tungsten deposits in Eastern Transbaikalia**

1 – state and administrative boundaries; 2 – outcrops of intrusions of the Kukulbey complex (J<sub>3</sub>); 3 – tungsten deposits: 1 – Bom-Gorkhonsky, 2 – Spokoininsky, 3 – Belukhinsky, 4 – Bukukinsky, 5 – Antonovogorsky

Хвостохранилища отходов рудообогатения вольфрамовых месторождений Восточного Забайкалья являются как объектами повышенной экологической опасности, так и вероятными источниками рудного минерального сырья. В процессе длительного периода отработки вольфрамовых месторождений

образовались значительные по объему отходы деятельности горно-обогатительных комбинатов (ГОК), значительная часть которых, сконцентрирована в хвостохранилищах (табл. 1). Между тем отвалы вольфрамовых месторождений можно использовать в качестве вторичных ресурсов для извлечения ценных металлов.

Таблица 1

**Хвостохранилища рудных месторождений Восточного Забайкалья [Юргенсон, 1999; данные территориального геологического фонда по Забайкальскому краю (г. Чита)]**

Table 1

**Tailings dumps of ore deposits in Eastern Transbaikalia [Yurgenson, 1999; data of the territorial geo-logical fund for the Transbaikal Territory (Chita)]**

Месторождение	Площадь, га	Объем объекта тыс. м <sup>3</sup> /тыс. т	Среднее содержание WO <sub>3</sub> , %
Антоновогорское	0,3	12/26,4	0,121
Белухинское	0,3	7,5/16,5	0,136
Букуинское	3,6	252/544,5	0,128
Бом-Горхонское	3	117/313,5	0,4
Спокойнинское	100	5115/8180	0,041

Изучением влияния хвостохранилищ рудных месторождений на экологическое состояние окружающей природной среды Восточного Забайкалья занимались многие исследователи. Известно, что многолетнее воздействие рудного материала хвостохранилищ (в т.ч. и вольфрамовых месторождений) на прилегающие территории привело к изменению химического состава элементов окружающей природной среды [Барабанов, 1975; Шварцев, 1998; Юргенсон, 1999; Харитонов и др., 2002; Михайленко, 2006; Мязин, Михайлютина, 2006; Михайлютина, 2007; Пузанов и др., 2012; Птицын, 2014; Абдрахманов, Ахметов, 2016; Винокуров и др., 2016; Чечель, 2017; Абрамов, 2018; Абрамов, Цыренов, 2019; Абрамов, Эпова, Манзырев, 2019; Абрамов и др., 2020; Чечель, Замана, 2020].

Зарубежный опыт изучения хвостохранилищ аналогичных вольфрамовых месторождений по всему миру, в том числе в Китае и Швеции, на предмет потенциального воздействия на окружающую среду, показывает комплексность проблемы влияния рудного материала хвостохранилищ, включая возможность потенциального использования как самого материала хвостов (в качестве строительного материала), так и возможность повторного извлечения вольфрама из хвостохранилищ, а также потенциальные способы рекультивации [Clemente et al., 1993; Han et al., 2012; Lin et al., 2014; Liu et al., 2015; Peng, Yang, Ouyang, 2015; Figueiredo et al., 2018; Mulenshi et al., 2019; Hui et al., 2021; Msumange et al., 2023].

#### Задачи и методы исследований

Основной задачей исследования является установление особенностей распределения химических элементов в техноземах хвостохранилищ вольфрамовых

месторождений Восточного Забайкалья, расчет их потенциальной экологической опасности на окружающую среду, а также расчет концентраций ценных компонентов в техноземах хвостохранилищ с целью возможности их извлечения. Сведения по концентрациям химических элементов в рудах, техноземах хвостохранилищ и в почвах населенных пунктов получены при проведении исследований по базовым проектам Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН с 2000 по 2023 г. Кроме того, использованы опубликованные данные и сведения территориального геологического фонда по Забайкальскому краю (г. Чита). Ввиду отсутствия опубликованных данных по фоновым концентрациям элементов в почвах Восточного Забайкалья, в качестве фоновых образцов были использованы концентрации элементов в почвах, отобранных вне зоны влияния техногенных объектов – на удалении от них от нескольких сотен метров до 2 км в водораздельных частях ландшафтов. Глубина отбора проб составляла 10–25 см. Вес грунтовой пробы составлял 1,0 кг.

Для определения элементного состава в пробах использован рентгенофлуоресцентный метод исследования в аналитических лабораториях Геологического института СО РАН (г. Улан-Удэ), ISP-MS ЗАО «SGS Vostok Limited» (г. Чита). Изучение минерального материала хвостохранилищ проводилось с использованием оптического поляризационного микроскопа Zeiss AXIO ScopeAI (Германия). Для гранулометрического анализа проб хвостохранилищ использовались навески от 20–50 до 300 г. В общей сложности было проведено 56 измерений. Замеры производились на электронных лабораторных весах САРТОГОСМ ВР2100.

В рамках гранулометрического анализа был произведен ситовой анализ комплектом из девяти лабораторных сит из оцинкованной нержавеющей стали фирмы «Виброгрохот» (Россия). Размеры ячеек сит, использованных в анализе, были следующими, мм: 5; 4; 3; 2; 1; 0,5; 0,4; 0,2; 0,094.

### Краткие данные о минеральном составе руд и техноземов вольфрамовых месторождений Восточного Забайкалья

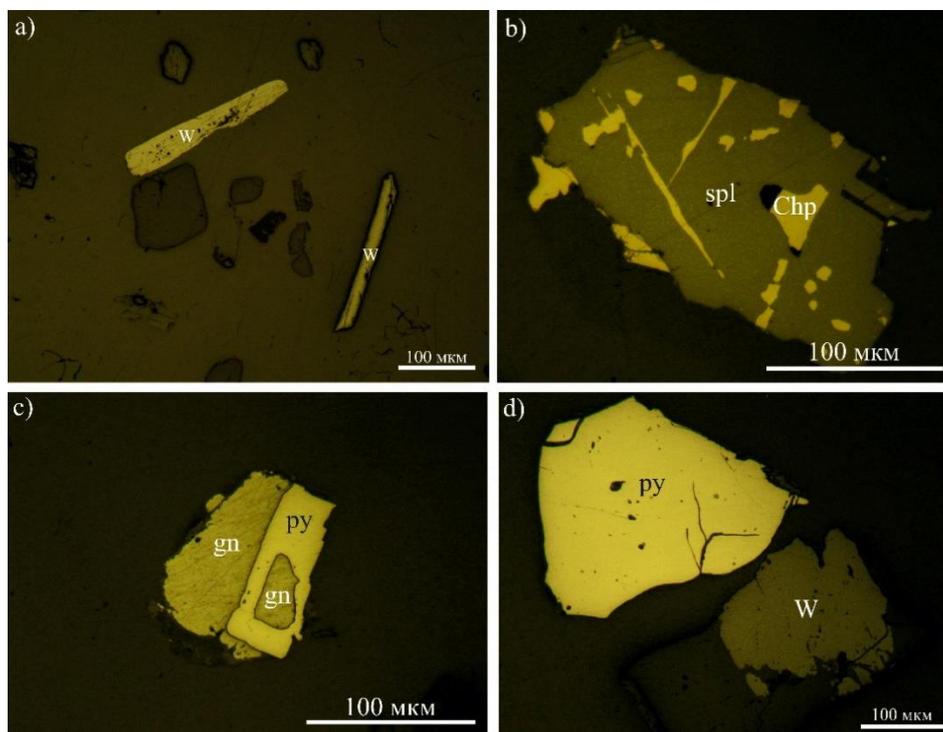
В Восточном Забайкалье образование вольфрамовых связано, главным образом, с процессами формирования интрузий позднемезозойского кукульбейского комплекса ( $J_3$ ), развитых южнее Монголо-Охотского глубинного разлома. Изотопный возраст гранитов кукульбейского комплекса колеблется в диапазоне 150–145 млн лет ( $J_3$ ) [Козлов, 2011].

Формирование вольфрамового оруденения на месторождениях Восточного Забайкалья проходило в несколько стадий. На Букукинском, Антоновогорском и Белухинском вольфрамовых месторождениях выделяются три стадии оруденения: первая стадия – кварц-вольфрамитовая, вторая – кварц-сульфидная, третья – халцедоновидного кварца [Смирнов, 1978]. На Спокойнинском месторождении выделяются два

основных типа оруденения. Ранняя стадия представлена вольфрамоносными и бериллиевыми грейзенами в апикальной части Спокойнинского массива, поздняя стадия – кварц-вольфрамитовыми жилами. Наличие нескольких стадий оруденения свидетельствует о пульсирующем характере формирования рудоносных растворов.

Рудные тела вольфрамовых месторождений представлены кварцево-жильными жилами и зонами грейзенизации. Основными рудными минералами являются вольфрамит, пирит, сфалерит. Второстепенные рудные минералы представлены галенитом, пирротинном, халькопиритом, арсенопиритом, молибденитом [Барабанов, 1975].

Из техноземов хвостохранилищ был выделен тяжелый шлик. Изучение минералов тяжелого шлика по микроскопом показало, что размер зерен сульфидов и вольфрамитов в основном составляет десятые и сотые доли миллиметров (рис. 2). Преобладающий размер частиц рудных минералов составляет 0,01–0,05 мм. Редко отмечаются зерна размерами около 1 мм. Отмечаются следующие рудные минералы по степени распространенности: пирит (75 %), вольфрамит (15 %), менее распространены – халькопирит, галенит, сфалерит, арсенопирит и другие минералы (рис. 2).



**Рис. 2.** Рудные минералы технозёмов хвостохранилищ вольфрамовых месторождений Восточного Забайкалья  
 a – зерна вольфрамита (W), b – структуры распада твердого раствора халькопирита (Chp) в сфалерите (spl), c – включения галенита (gn) в пирите (py), d – зерна пирита (py) и вольфрамита (W)

### Fig. 2. Ore minerals of technozems of tailings of tungsten deposits of Eastern Transbaikalia

a – grains of wolframite (W), b – decomposition structures of solid solution of chalcopyrite (Chp) in sphalerite (spl), c – inclusions of galenite (gn) in pyrite (py), d – grains of pyrite (py) and wolframite (W)

По существу остающиеся в хвостах минералы вольфрама – главным образом мелкие и ультрадисперсные фракции, что затрудняет их переработку. Гранулометрический состав техноземов исследуемых хвостохранилищ показывает, что частицы данного размера встречаются в различных соотношениях от измеряемой навески (в %). Для техноземов Белухинского месторождения частицы размерностью 0,2–0,094 и <0,094 мм в среднем составляют 18,34 %, Букукинского месторождения – 11,91 %, Антоновогорского месторождения – 14,31 %, Спокойнинского месторождения – 42,94% от измеряемой навески. Частицы размерностью от 0,2 до 1 мм составляют 54,53; 50,82; 52,34 и 55,5 % соответственно. В тяжелых шлихах соотношения частиц несколько отличается – частицы размерностью 0,2–0,094 и <0,094 мм в среднем составляют от 2 до 7 %, а 0,2–1 мм – от 70 до 80–85 % от навесок. Примечателен разброс между максимальными и минимальными соотношениями частиц в пробах технозема. Например, частицы хвостохранилища Антоновогорского месторождения размером 0,2–0,094 мм и менее находятся в диапазоне 3,33–29,7 %, в то время как разброс частиц технозема Спокойнинского месторождения составляет 21,07–80 %. Вероятно, подобный разброс обусловлен как качеством отработки добываемого материала месторождений (три из четырех исследованных на гранулометрический состав хвостохранилищ месторождений отработывались до 1960-х гг.), так и непосредственно минеральным составом техноземов.

#### **Геохимические особенности природно-техногенных комплексов вольфрамовых месторождений, оценка их воздействий на окружающую среду**

Природно-техногенные комплексы вольфрамовых месторождений включают в себя природные и техногенные (созданные человеком) составляющие окружающей среды. Техногенными составляющей вольфрамовых месторождений являются территории, изменённые в результате деятельности горно-обогачительных комбинатов. Рассмотрим распределение химических элементов в техноземах вольфрамовых месторождений Восточного Забайкалья. Техноземы хвостохранилищ относительно предельно-допустимых концентраций (ПДК) элементов характеризуются повышенными содержаниями многих, в том числе токсичных элементов (табл. 2). Значения отношений содержаний элементов в техноземах имеют существенные различия. Это объясняется нормативами извлечения (и потерь) ценных элементов при переработке минерального сырья горно-обогачитель-

ными комбинатами. Так, процент извлечения вольфрамита (гюбнерита, ферберита) при гравитационном обогащении составляет для крупно-вкрапленных руд 70–85 %, для средне- и мелковкрапленных – 52–70 % [Методические рекомендации..., 2007].

Значительная разница содержаний элементов в техноземах хвостохранилищ объясняются, главным образом, окислительными процессами преобразования сульфидов под воздействием водных потоков, циркулирующих в хвостохранилищах. При этом выделяются следующие стадии трансформации сульфидов в зоне окисления: сульфиды – сульфаты – карбонаты (окислы). Минералы сульфатной стадии обладают повышенной растворимостью и представляют наибольшую опасность для окружающей среды.

Большая часть химических элементов II и III классов опасности в почвах в ГОСТ Р 70281-2022 отсутствует, несмотря на наличие их в ныне недействующем МУ 2.1.7.730099. Для составления более комплексного вывода об экологическом состоянии почв н.п. дополнительно воспользуемся ссылкой на ныне недействующий нормативный акт, что существенно не отразится на полученных результатах. По классу опасности химические элементы подразделяются на три класса: I класс – As, Cd, Hg, Pb, Zn; II класс – Co, Ni, Mo, Cu, Sn, Sb, Cr; III класс – Ba, V, W, Mn, Sr [ГОСТ Р 70281-2022; МУ 2.1.7.730099].

Сульфиды различных минералов при окислительном растворении имеют разную интенсивность перехода в раствор. Этим объясняются значительные различия средних значений элементов в техноземах хвостохранилищ. Среди рассматриваемых месторождений наибольшими значениями сумм отношений средних содержаний к ПДК ( $\sum X/\text{ПДК}$ ) категорий I и II опасности характеризуется техноземы хвостохранилища Букукинского месторождения ( $\sum X/\text{ПДК}$ ) – 618,1; минимальными значениями техноземы хвостохранилища Спокойнинского месторождения – 36,2 (табл. 3). Среди почв населенных пунктов суммы отношений  $\sum X/\text{ПДК}$  (по убыванию) распределены следующим образом – н.п. Антия (412,5) > н.п. Новоорловск (388,2) > н.п. Новопавловка (154,2).

Установлено, что, при окислительном растворении сульфидов в отвалах, Zn и Cd более интенсивно переходят в раствор, чем Pb [Пузанов и др., 2012]. Данная закономерность подтверждается повышенными значениями концентраций Zn, Cd, Cu и других элементов в водах вытекающих из штолен вольфрамовых месторождений. Относительно среднего химического состава вод выщелачивания, в порядке убывания содержания элементов в водах штольневых дренажей имеет следующий вид: Cd > Cu > Zn > Co > Ni > Pb > U > Fe > Sr > W > Mo [Шварцев, 1998; Чечель, 2017].

Значения ПДК элементов в техноземах зависят от содержаний в них определенных видов рудных минералов, в состав которых входят токсичные элементы.

Руды рассматриваемых месторождений представлены следующими основными рудными минералами: пирит (FeS<sub>2</sub>), вольфрамит (Fe, Mn) WO<sub>4</sub>, арсенопирит Fe(AsS), халькопирит (CuFeS<sub>2</sub>), сфалерит (ZnS), галенит (PbS), молибденит (MoS<sub>2</sub>), антимонит (Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub>), касситерит (SnO<sub>2</sub>), блеклые руды (теннантит Cu<sub>3</sub>AsS<sub>3</sub>, тетраэдрит Cu<sub>3</sub>SbS<sub>3</sub>). Кадмий входит в виде изоморфной примеси в минералы цинка. Расчеты выявили в техноземах следующие значения превышения ПДК: As (14–169), Pb (1–36,7), Zn (3,5–39,1), Cd (2,5–8), Cu (2,7–181). При этом в пробах почв те же элементы имеют следующие превышения ПДК: As (0–15), Pb (0,7–1,1), Zn (2,1–3,1), Cd (0–27), Cu (6–10).

Рассчитаем токсичность технозёмов вольфрамовых месторождений, используя формулу расчета токсичности рудных месторождений по Р.В. Голевой и др. [Голева и др., 2001]. Потенциальная токсичность рудного месторождения рассчитывается по формуле (1):

$$ГЭр = \sum_{i=1}^n (Тл \times В)_1 + \dots + (Тл \times В)_n, \quad (1)$$

где ГЭр – потенциальная токсичность рудного месторождения; Тл – коэффициент литотоксичности элемента; В = X/Q, где X – концентрации элемента, Q – содержание элемента в окружающей среде. При этом коэффициенты литотоксичности (Тл) элементов сгруппированы авторами следующим образом: чрезвычайно опасные (супертотоксичные) Тл = 15: Hg, Cd, Tl, Sr, Ba, Be, U, Ra, Rn, Cs; высокой опасности Тл = 10: Pb, Se, Te, As, Sb, B, F, Th, V, Cr, Ru, Co, Ni; средней опасности Тл = 5: Cu, Zn, S, Bi, Ag, Ba, Mo, In, Ge, Sr, W, Al, Li, Mn, Cs, Cl, Sn, P; незначительной опасности Тл = 1: Nb, Zr, Ti, Na, K, Ta, Ca, Si, Mg, Th.

Таблица 2

Средние содержания элементов в природно-техногенных комплексах вольфрамовых месторождений Восточного Забайкалья, г/т

Table 2

Average content of elements in natural and technogenic complexes of tungsten deposits in Eastern Transbaikalia, ppm

Э	As	Pb	Zn	Cd	Cu	Sn	Mo	Sb	W	Bi	Ba	Sr
КО	I			II				III				
Ф	14	24	57	–	22	13	108	–	385	2,2	609	308
Тл	10	10	5	15	5	5	5	10	5	5	15	15
ПДК	2	32	23	2	3	4,5	0,4	4,5	–	–	–	–
<b>Антоновогорское: руды (n = 12) ГЭр = 2582</b>												
X1	198	120	2741	230	1292	96	17	4	26206	650	22	10
X1/Ф	14,1	5,0	48,1	–	58,7	7,4	0,2	–	68,1	295,5	0,04	0,03
<b>Хвостохранилище (n = 14) ГЭр = 851</b>												
X2	137	109	47	15	332	119	20	7	3020	237	115	25
X1/ X2	1,4	1,1	58,3	15,3	3,9	0,8	0,9	0,6	8,7	2,7	0,2	0,4
X2/Ф	9,8	4,5	0,8	–	15,1	9,2	0,2	–	7,8	107,7	0,2	0,1
I <sub>geo</sub>	2,71	1,60	–0,86	–	3,33	2,61	–3,02	–	2,39	6,17	–2,99	–4,21
X2/ПДК	68,5	3,4	2,04	7,5	110,7	26,4	50	1,6	–	–	–	–
<b>н.п. Антия (n = 2) Z<sub>c</sub> = 2,68 Число жителей – 243</b>												
X3	30	22	48	–	30	10	153	–	504	2	621	306
X3/Ф	2,1	0,9	0,8	–	1,4	0,8	1,4	–	1,3	0,9	1,0	1,0
X3/ ПДК	15,0	0,7	2,1	–	10,0	2,2	382,5	–	–	–	–	–
<b>Букукинское: руды (n = 12) ГЭр = 7273</b>												
X1	192	9957	9727	291	2294	487	370	102	30872	441	104	54
X1/Ф	13,7	414,9	170,7	–	104,3	37,5	3,4	–	80,2	200,5	0,2	0,2
<b>Хвостохранилище (n = 15) ГЭр = 1596</b>												
X2	337	1174	429	13	290	119	91	165	2017	296	350	104
X1/ X2	0,6	8,5	22,7	22,4	7,9	4,1	4,1	0,6	15,3	1,5	0,3	0,5
X3/Ф	24,1	48,9	7,5	–	13,2	9,2	0,8	–	5,2	134,6	0,6	0,3
I <sub>geo</sub>	4,00	5,03	2,33	–	3,14	2,61	–0,83	–	1,80	6,49	–1,38	–2,15
X2/ПДК	168,5	36,7	18,7	6,5	96,7	26,4	227,5	36,7	–	–	–	–
<b>Спокойнинское: руды (n = 5) ГЭр = 3749</b>												
X1	61	2253	236	19	16	45	–	9	1629	1189	62	11
X1/Ф	4,4	93,9	4,1	–	0,7	3,5	–	–	4,2	540,5	0,1	0,04
<b>Хвостохранилище (n = 9) ГЭр = 95</b>												
X2	28	31	80	–	8	45	2	–	579	11	52	42
X1/ X2	2,2	72,7	3	–	2	1	–	–	2,8	108,1	1,2	0,3
X2/Ф	2,0	1,3	1,4	–	0,4	3,5	0,02	–	1,5	5,0	0,1	0,1
I <sub>geo</sub>	0,39	–0,25	–0,13	–	–2,07	1,18	–6,37	–	–0,03	1,71	–4,16	–3,49
X2/ПДК	14,0	1,0	3,5	–	2,7	10,0	5,0	–	–	–	–	–

Э	As	Pb	Zn	Cd	Cu	Sn	Mo	Sb	W	Bi	Ba	Sr
КО	I				II				III			
п. Новорорловск (n = 4) Z <sub>c</sub> = 1,42 Число жителей – 3084												
X3	14	34	50	54	18	–	138	–	495	–	597	236
X3/Ф	1,0	1,4	0,9	–	0,8	–	1,3	–	1,3	–	1,0	0,8
X3/ПДК	7,0	1,1	2,2	27,0	6,0	–	345,0	–	–	–	–	–
<b>Бом-Горхонское:</b> руды (n = 5) ГЭр = 12854												
X1	626	626	19347	167	612	30	141	–	175633	3524	42	24
X1/Ф	44,7	26,1	339,4	–!	27,8	2,3	1,3	–	456,2	1602	0,1	0,1
Хвостохранилище (n = 3) 1083												
X2	78	86	900	16	270	109	68	–	2687	333	524	24
X1/ X2	8,0	7,3	21,5	10,4	2,3	0,3	2,1	–	65,4	10,6	0,1	1
X2/Ф	5,6	3,6	15,8	–	12,3	8,4	0,6	–	7,0	151,4	0,9	0,1
I <sub>geo</sub>	1,89	1,26	3,40	–	3,03	2,48	–1,25	–	2,22	6,66	–0,80	–4,27
X2/ПДК	39,0	2,7	39,1	8,0	90,0	24,2	170,0	–	–	–	–	–
п. Новопавловка (n = 4) Z <sub>c</sub> = 2,70 Число жителей – 3768												
X3	–	27	72	–	22	13	56	–	183	7	693	308
X3/Ф	–	1,1	1,3	–	1,0	1,0	0,5	–	0,5	3,2	1,1	1,0
X3/ПДК	–	0,8	3,1	–	7,3	2,9	140,0	–	–	–	–	–
<b>Белухинское:</b> хвостохранилище (n = 10) ГЭр = 1103												
X2	143	109	157	5	544	58	91	22	973	334	415	188
X2/Ф	10,2	4,5	2,8	–	24,7	4,5	0,8	–	2,5	151,8	0,7	0,6
I <sub>geo</sub>	2,77	1,60	0,88	–	4,04	1,57	–0,83	–	0,75	6,66	–1,14	–1,30
X2/ПДК	71,5	3,4	6,8	2,5	181,3	12,9	228	4,9	–	–	–	–

Примечание: x – среднее арифметическое, s – стандартное отклонение, n – число анализов, прочерк – нет данных, Тл – литотоксичность [Голева и др., 2001], Ф – фоновые пробы [Войткевич и др., 1977], ПДК – предельно допустимые концентрации в почвах, мг/кг [СанПиН 1.2.3685-21], КТ – класс токсичности, ГЭр – потенциальная токсичность [Голева, 2001], I<sub>geo</sub> – индекс геоаккумуляции [Muller, 1969].

Note: x – arithmetic mean, s – standard deviation, n - number of analyses. dash – no data, Tl – lithotoxicity [Goleva et al., 2001], F – background samples [Voytkевич et al., 1977], MPC – maximum permissible concentrations in soils, mg/kg [SanPiN 1.2.3685-21], CT – toxicity class, GEr – potential toxicity [Goleva, 2001], I<sub>geo</sub> – geoaccumulation index [Muller, 1969].

Отмечена следующая закономерность: с увеличением значений отношений содержаний элементов в рудах к содержанию их в техноземах уменьшается токсичность хвостохранилищ, что объясняется процессами перехода элементов в раствор. Данная закономерность в целом подтверждается увеличением суммы отношений средних содержаний токсичных элементов первого, второго и частично третьего класса токсичности элементов в рудах к таковым в техноземах. Такая последовательность наблюдается от Букукунского к Спокойнинскому месторождениям: Букукинское (ГЭр = 1596) ∑ 87,59 → Бом-Горхонское (ГЭр = 1083) ∑ 127,8 → Антоновогорское (ГЭр = 851) ∑ 93,74 → Спокойнинское (ГЭр = 95) ∑ 191,71 (табл. 3).

Степень потенциальной токсичности исследуемых вольфрамовых месторождений Восточного Забайкалья в целом по методике Р.В. Голевой и соавт. [Голева и др., 2001] соответствует степени токсичности вольфрамовых месторождений.

Для изучения степени влияния отдельных тяжелых металлов на химический состав хвостохранилищ рассчитаем индексы геоаккумуляции (I<sub>geo</sub>) по методике, предложенной Мюллером [Muller, 1969]. Для вычислений применялась следующая формула (2):

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_n}{1,5BE_n}, \quad (2)$$

где C<sub>n</sub> – измеренная концентрация соединений тяжелых металлов в образце; BE<sub>n</sub> – среднее геохимическое фоновое значение измеряемых элементов.

Значения индекса подразделяются следующим образом: I<sub>geo</sub> ≤ 0 – практически незагрязненный; 0 < I<sub>geo</sub> ≤ 1 – незагрязненный до умеренно загрязненного; 1 < I<sub>geo</sub> ≤ 2 – умеренно загрязненный; 2 < I<sub>geo</sub> ≤ 3 – средне загрязненный; 3 < I<sub>geo</sub> ≤ 4 – сильно загрязненный; 4 < I<sub>geo</sub> ≤ 5 – сильно загрязненный до чрезмерно загрязненного; I<sub>geo</sub> > 5 – чрезмерно загрязненный.

Согласно проведенным расчетам, в техноземах Букукунского и Бом-Горхонского месторождений к категориям от «умеренно загрязненные» до «чрезмерно загрязненные» относятся семь элементов из изучаемой подборки, в то время как в техноземах Спокойнинского месторождения – два элемента. Во всех исследуемых хвостохранилищах расчеты индекса показали наибольшее влияние Bi на изменение химического состава исследованных проб техноземов. Несмотря на принадлежность данного элемента к III классу токсичности, его накопление в больших количествах в минеральном материале хвостохранилищ может говорить о значительном потенциале

вредного воздействия на почвы прилегающих территорий. Следует отметить, что рассмотренные в исследовании тяжелые металлы I, II и III классов токсичности (As, Pb, Zn, Cu, Sn и W) также оказывают значительное воздействие на химический состав хвостохранилищ, что потенциально приводит к загрязнению почв прилегающих территорий. Исключением является минеральный материал хвостохранилища Спокойнинского месторождения – расчеты показали низкие относительно прочих объектов значения индекса, при этом наибольшую способность к накоплению показали Bi и Sn – здесь полученные индексы были отнесены к категории «умеренно загрязненные».

Для оценки показателя загрязнения почв в населенных пунктах рассчитан суммарный показатель загрязнения ( $Z_c$ ) (3):

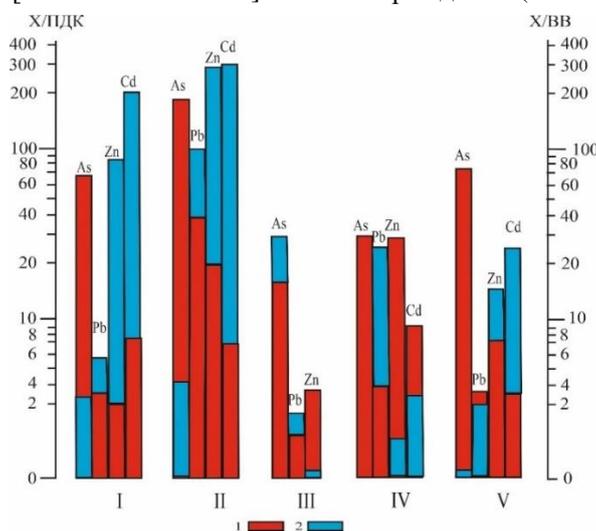
$$Z_c = K_{ci} + \dots + K_{cn} - (n - 1), \quad (3)$$

где  $n$  – количество учитываемых химических элементов;  $K_{ci}$  – коэффициент концентрации  $i$ -го компонента загрязнения, превышающий единицу.  $K_{ci} = C_i/C_{\phi}$ , где  $C_i$  – фактическое содержание  $i$ -го химического элемента в почвах и грунтах, мг/кг;  $C_{\phi}$  – фоновое содержание  $i$ -го химического элемента в почвах и грунтах, мг/кг. Значения, характеризующие суммарное загрязнение  $Z_c$  по степени опасности, имеют следующие диапазоны:  $Z_c < 16$  – низкий уровень;  $16 < Z_c < 32$  – средний, умеренно опасный;  $32 < Z_c < 64$  – высокий, опасный;  $64 < Z_c < 128$  – максимальный, чрезвычайно опасный [СанПиН 1.2.3685-21].

Выявлено, что показатели загрязненности почв населенных пунктов, связанных с обработкой вольфрамовых месторождений, соответствуют низким степеням загрязненности ( $Z_c < 16$ ). Так, загрязненность почв н.п. Новоорловск, расположенного в 1,3 км от хвостохранилища Спокойнинского месторождения, составляет  $Z_c = 1,42$ ; н.п. Антия, расположенного в 11,6 км от хвостохранилища Антоновогорского месторождения, составляет  $Z_c = 2,68$ ; н.п. Новопавловка, находящегося в 6,5 км от хвостов обогащения Бом-Горхонского месторождения, –  $Z_c = 2,70$ .

Для техногенных потоков рассеяния вольфрамовых месторождений характерны преимущественно сульфатный и гидрокарбонатно-сульфатный анионный состав и снижение значений pH в слабокислую и кислую области. Наиболее низкие значения pH характерны для дренажных стоков месторождений (2,9–5,7 Антонова Гора; 2,1–7,0 – Букука) [Чечель, 2021]. В пределах Спокойнинского месторождения формируются преимущественно слабощелочные воды с минерализацией (pH – 6,6–8,8) [Чечель, 2021].

Среди рассматриваемых месторождений наибольшими значениями отношений сумм отношений средних содержаний элементов I и II классов опасности в водах дренажных стоков (X/BB) характеризуются дренажные стоки Букукинского месторождения (X/BB – 683,3), наименьшими значениями дренажные воды Белухинского (X/BB – 38,4) и Спокойнинского месторождений (X/BB – 76,1) (рис. 3).



**Рис. 3. Гистограмма распределения отношений средних значений элементов в техноземах хвостохранилищ к ПДК грунтов (X/ПДК) и отношений средних значений элементов в дренажных водах к средним значениям элементов в водах выщелачивания (X/BB) вольфрамовых месторождений Восточного Забайкалья**

Месторождения: I – Антоновогорское, II – Букукинское, III – Спокойнинское, IV – Бом-Горхонское, V – Белухинское. Содержания элементов: 1 – в техноземах хвостохранилищ, 2 – в дренажных водах

**Fig. 3. Histogram of distribution of ratios of average values of elements in technozems of tailings ponds to MPC of soils (X/MPC) and ratios of average values of elements in drainage water to average values of elements in leaching water (X/BB) of tungsten deposits of Eastern Transbaikalia**

Deposits: I – Antonovogorsky, II – Bukukinsky, III – Spokoininsky, IV – Bom-Gorkhonsky, V – Belukhinsky. Elemental contents: 1 – in tailing pond soils, 2 – in drainage water

Распределение отношений средних содержаний элементов токсичных элементов первого класса опасности в техноземах хвостохранилищ к значениям ПДК этих элементов показывает следующее их расположение в порядке убывания: Антоновогорское  $As > Cd > Pb > Zn$ ; Букукинское  $As > Pb > Zn > Cd$ ; Спокойнинское  $As > Zn > Pb$ ; Бом-Горхонское  $As > Zn > Cd > Pb$ ; Белухинское  $As > Zn > Pb > Cd$ . Анализ данной последовательности свидетельствует о значительных превышениях ПДК в техноземах хвостохранилищ вольфрамовых хвостохранилищ  $As$ ,  $Pb$  и  $Zn$ .

Отношения средних содержаний элементов в дренажных водах к средним значениям элементов в водах выщелачивания по данным месторождениям выглядят следующим образом: Антоновогорское  $Cd > Zn > Pb > As$ ; Букукинское  $Cd > Zn > Pb > As$ ; Спокойнинское  $As > Pb > Zn$ ; Бом-Горхонское  $Pb > Cd > Zn$ ; Белухинское  $Cd > Zn > Pb > As$ . Рассмотрение данной последовательности указывает на значимые способности перехода в раствор при окислении сульфидов  $Cd$  относительно других элементов. Установлено, что при окислительном растворении сульфидов в отвалах  $Zn$  и  $Cd$  более интенсивно переходят в раствор, чем  $Pb$  [Пузанов и др., 2012]. Данная закономерность подтверждается повышенными значениями концентраций  $Zn$ ,  $Cd$ ,  $Cu$  и других элементов в водах вытекающих из штолен вольфрамовых месторождений. Относительно среднего химического состава вод выщелачивания, в порядке убывания, содержания элементов в водах штольневых дренажей имеют следующий вид:  $Cd > Cu > Zn > Co > Ni > Pb > U > Fe > Sr > W > Mo$  [Шварцев, 1998; Чечель, 2017]. Анализ содержания вольфрама в техноземах рассматриваемых месторождений, кроме Спокойнинского, позволяет рассматривать их как техногенные месторождения вольфрама. В мировой практике из хвостохранилищ вольфрамовых месторождений с содержаниями вольфрама 0,01 % и выше происходит добыча вольфрама. Добыча вольфрама из хвостохранилищ производят в следующих месторождениях: Ляньхуашань (Китай), Маунт Карбин (Австралия) [Han et al., 2021].

### Обсуждение результатов исследований

Проведенный анализ концентраций элементного состава хвостохранилищ вольфрамовых месторождений, также расположенных поблизости населенных пунктов показал значительные превышения ПДК токсичных элементов первого и второго класса токсичности. Расчеты выявили, что в отличие от хвостохранилищ рудников, в селитебных почвах превышения ПДК для тех же элементов выглядят следующим образом:  $As$  (0–15),  $Pb$  (0,7–1,1),  $Zn$  (2,1–3,1),  $Cd$  (0–27),  $Cu$  (6–10). Подобные отличия в превышениях можно

объяснить их разной способностью элементов к отложению в почвенных средах.

Не установлено прямой зависимости степени загрязненности почв н.п. от удаленности от хвостохранилищ вольфрамовых месторождений. Это возможно объяснить особенностями геологического строения в районах н.п., почвы которых были образованы за счет выветривания различных по составу пород. Исходя из данных о химическом составе селитебных почв, отмечено увеличение степени загрязненности почв н.п., расположенных вблизи хвостохранилищ в сравнении с н.п., расположенными на удалении от хвостохранилищ. Однако расчеты суммарного показателя загрязнения почв  $Z_c$  населенных пунктов находятся в отрицательном диапазоне значений, а также показывают обратную зависимость от расстояния до хвостохранилищ.

Расчет потенциальной токсичности техноземов вольфрамовых месторождений по методу по Р.В. Голевой и соавт. [Голева и др., 2001] показал, что наибольшей экологической опасностью характеризуются хвостохранилища Букукинское месторождения ( $ГЭр = 1596$ ), наименьшими значениями – Спокойнинское ( $ГЭр = 95$ ). Подсчитанные индексы геоаккумуляции для техноземов показывают, что изменению химического состава также больше подвержены более удаленные от населенных пунктов хвостохранилища.

В дренажных водах Букукинское и Антоновогорское месторождений выявлено значительное превышение значений отношений средних содержаний элементов к содержаниям их в водах выщелачивания. Так, превышение следующих элементов в дренажных водах Букукинское месторождения составляет:  $Cd$  в 306 раз,  $Zn$  – 289,  $Pb$  – 75,3; Антоновогорское месторождения –  $Cd$  в 241,5 раза,  $Zn$  – 84,4;  $Pb$  – 5,7. Это объясняется более интенсивным переходом в раствор при окислительном растворении сульфидов  $Cd$  и  $Zn$  в сравнении с другими сульфидами.

Высокие концентрации вольфрама (более 0,01 %) в хвостохранилищах, кроме Спокойнинского месторождения, позволяют рассматривать как техногенные месторождения вольфрама. Минералогический анализ показал, что преобладающий размер частиц рудных минералов в техноземах составляет 0,01–0,05 мм.

### Заключение

Выявлено, что показатели загрязненности почв населенных пунктов, связанных с обработкой вольфрамовых месторождений, соответствуют низким степеням загрязненности почв ( $Z_c < 16$ ).

В процессе исследований проведен сравнительный анализ распределения элементов в технозомах хвостохранилищ вольфрамовых месторождений Восточного Забайкалья. Выявлено, что концентрации элементов в технозомах хвостохранилищ имеют существенные различия. Выявлено, что наиболее значимыми превышениями ПДК элементов в почвах характеризуются технозома Букукинского и Антоновогорского месторождений. Среди рассматриваемых элементов наиболее значимые превышения ПДК характеризуются As, Cu, Zn, значения которых составляют: As в 169 раз, Cu в 96,7 (Букукинское месторождение); Zn в 39,1 раза (Бом-Горхонское месторождение).

В дренажных водах рассматриваемых месторождений отмечается значительное превышение отношений средних концентраций Cd, Zn к средним значениям вод выщелачивания, что объясняется более интенсивным переходом в раствор Cd, Zn при окисле-

нии рудных частиц в сравнении с другими сульфидами.

Согласно результатам проведенной оценки воздействия хвостохранилищ на окружающую среду, выявлено увеличение степени загрязненности почв н.п., расположенных на удалении от хвостохранилищ, в сравнении с н.п., находящимися вблизи хвостохранилищ.

Это можно объяснить разной геологической обстановкой в рассматриваемых н.п., почвы которых сформированы за счет выветривания различных по составу пород.

Концентрации вольфрама (более 0,01 %) в хвостохранилищах вольфрамовых месторождений Восточного Забайкалья, кроме Спокойнинского месторождения, соответствуют вольфрамовым техногенным месторождениям, что предполагает возможность их отработки.

#### Список источников

- Абдрахманов Р.Ф., Ахметов Р.М.** Гидрогеохимия горнорудных районов // Геохимия. 2016. № 9. С. 829–840.
- Абрамов Б.Н.** Концентрации тяжелых металлов в техногенных ландшафтах Акатувского полиметаллического месторождения (Восточное Забайкалье) // Вестник Воронежского государственного университета: География. Геоэкология. 2018. № 4. С. 67–71.
- Абрамов Б.Н., Еремин О.В., Филенко Р.А., Цыренов Т.Г.** Оценка потенциальной экологической опасности природно-техногенных комплексов рудных месторождений Восточного Забайкалья // Геосферные исследования. 2020. № 2. С. 64–67.
- Абрамов Б.Н., Цыренов Т.Г.** Оценка экологической опасности на окружающую среду хвостохранилищ некоторых сульфидных месторождений Восточного Забайкалья // Успехи современного естествознания. 2019. № 5. С. 35–41.
- Абрамов Б.Н., Эпова Е.С., Манзырев Д.В.** Геоэкологические проблемы отработки рудных месторождений золота в Восточном Забайкалье // География и природные ресурсы. 2019. № 2. С. 103–111.
- Барабанов В.Ф.** Минералогия вольфрамитовых месторождений Забайкалья. Т. 2. Л.: Изд-во ЛГУ, 1975. 360 с.
- Винокуров С.Ф., Гурбанов А.Г., Богатиков О.А., Карамурзов Б.С., Газеев В.М., Лексин А.Б., Шевченко А.В., Доллов С.М., Дударов З.И.** Содержания, сезонные колебания и формы миграции макро- и микроэлементов в поверхностных водах в районе деятельности Тырныаузского вольфрамово-молибденового комбината (ТВМК) и прилегающих территорий (Кабардино-Балкарская Республика) и меры по восстановлению экологической среды // Доклады Академии наук. 2016. Т. 467, № 4. С. 436–467.
- Войткевич Г.В., Мирошников А.Е., Поваренных А.С., Прохоров В.Г.** Краткий справочник по геохимии. М.: Недра, 1977. 184 с.
- Голева Р.В., Иванов В.В., Куприянова И.И., Маринов Б.Н., Новикова М.И., Шпанов Е.П., Шурига Т.Н.** Экологическая оценка потенциальной токсичности рудных месторождений (методические рекомендации). М.: РИЦВИМС, 2001. 53 с.
- ГОСТ Р 70281-2022** Охрана окружающей среды. Почвы. Классификация химических веществ для контроля загрязнения. Официальное издание. М.: РСТ, 2022. 8 с.
- Козлов В.Д.** Особенности редкоэлементного состава и генезиса гранитоидов шахтаминского и кукульбейского редкометалльных комплексов Агинской зоны Забайкалья // Геология и геофизика. 2011. Т. 52, № 5. С. 676–688.
- Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Вольфрамовые руды.** М.: Государственная комиссия по запасам полезных ископаемых (ФГУ ГКЗ), 2007. 42 с.
- Михайленко В.Н.** Проблема техногенных отходов горного производства в России // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2006. № 2. С. 121–123.
- Михайлютина С.И.** Комплексная эколого-геохимическая оценка загрязнения тяжелыми металлами компонентов природной среды горнорудных поселений Восточного Забайкалья: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Иркутск, 2007. 21 с.
- МУ 2.1.7.730099** Почва, очистка населенных мест, бытовые и промышленные отходы, санитарная охрана почвы. Гигиеническая оценка качества почвы населенных мест. М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 1999. 20 с.
- Мязин В.П., Михайлютина С.И.** Комплексная оценка техногенного загрязнения почв и продуктов питания тяжелыми металлами при размещении хвостохранилищ в Восточном Забайкалье // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2006. № 9. С. 164–170.
- Птицын А.Б.** Проблемы освоения техногенных месторождений Забайкалья // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2014. № S3-2. С. 128–130.
- Пузанов А.В., Бабошкина С.В., Горбачев И.В.** Особенности миграции тяжелых металлов в природно-техногенных аномалиях Северо-Западной части Алтая // Геохимия. 2012. № 4. С. 393–402.
- СанПиН 1.2.3685-21** Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115?section=text> (дата обращения: 12.02.2024).

- Смирнов В.И. Рудные месторождения СССР. Т. 3. М.: Недра, 1978. 496 с.
- Харитонов Ю.Ф., Васильев Д.А. и др. Эколого-экономическая оценка горнопромышленного комплекса Читинской области // Ресурсы Забайкалья. Спец. вып. Чита, 2002. С. 42–47.
- Чечель Л.П. Эколого-гидрогеохимические последствия отработки вольфрамовых и молибденовых месторождений Восточного Забайкалья // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328, № 6. С. 52–63.
- Чечель Л.П. Формирование гидрогеохимических полей вольфрамовых месторождений Восточного Забайкалья под влиянием природных и антропогенных факторов : автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Томск, 2021. 21 с.
- Чечель Л.П., Замана Л.В. Геохимическая типизация техногенно-трансформированных вод Бом-Горхонского вольфрамового месторождения (Восточное Забайкалье) // Материалы четвертой Всероссийской конференции с международным участием «Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами». Улан-Удэ, 2020. С. 408–412.
- Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. 2-е изд., испр. и доп. М. : Недра, 1998. 366 с.
- Юргенсон Г.А. Геологические исследования и горнопромышленный комплекс Забайкалья: История, современное состояние, проблемы, перспективы развития. К 300-летию основания Приказа рудокопных дел. Новосибирск : Наука, 1999. 574 с.
- Clemente D., Newling P., Botelho D.S.A., Lejeune G., Barber S., Tucker P. Reprocessing slimes tailings from a tungsten mine // Miner. Eng. 1993. V. 6. P. 831–839.
- Figueiredo J., Vila M.C., Matos K., Martins D., Futuro A., Dinis M.d.L., Góis J., Leite A., Fiúza A. Tailings reprocessing from Cabeço do Pião dam in Central Portugal: A kinetic approach of experimental data // J. Sustainable Min. 2018. V. 17 (3). P. 139–144.
- Han Z., Golev A., Edraki M.A. Review of Tungsten Resources and Potential Extraction from Mine Waste // Minerals. 2021. V. 11 (7). P. 701.
- Hui W., Hao Z., Hongyan T. Wen J., Li A. Heavy metal pollution characteristics and health risk evaluation of soil around a tungsten-molybdenum mine in Luoyang, China // Environ. Earth Sci. 2021. V. 80. P. 293.
- Liu W., Wu T., Li Z., Hao X., Lu A. Preparation and characterization of ceramic substrate from tungsten mine tailings // Construction and Building Materials. 2015. V. 77. P. 139–144. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.094
- Lin C., Li R., Cheng H., Wang J., Shao X. Tungsten Distribution in Soil and Rice in the Vicinity of the World's Largest and Longest-Operating Tungsten Mine in China // PLoS One. 2014. V. 9 (3). e91981.
- Msumange D.A., Msumange J.A., Bru K., Bourgeois F. Tungsten tailings issues and reprocessing solutions // Miner. Miner Mater. 2023. V. 2 (14).
- Mulenshi J., Khavari P., Chehreh Chelgani, S., Rosenkranz J. Characterization and Beneficiation Options for Tungsten Recovery from Yxsjöberg Historical Ore Tailings // Processes. 2019. V. 7 (12). P. 895.
- Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River // GeoJournal. 1969. V. 2(3). P. 108–118.
- Peng K., Yang H., Ouyang J. Tungsten tailing powders activated for use as cementitious material // Powder Technol. 2015. V. 286. P. 678–683.

### References

- Abdrakhmanov R.F., Akhmetov R.M. Hydrogeochemistry at mining districts // *Geokhimiya* [Geochemistry International]. 2016. 54 (9). pp. 829–840. In Russian
- Abramov B.N. *Kontsentratsii tyazhelykh metallov v tekhnogennykh landshaftakh Akatuevskogo polimetallicheskogo mestorozhdeniya (Vostochnoe Zabaykal'e)* [The concentrations of heavy metals in the Akatuevskoye polymetallic deposit technogenic land-scapes (Eastern Transbaikalia)] // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta: Geografiya. Geoekologiya*. 2018. 4. pp. 67–71. In Russian
- Abramov B.N., Eremin O.V., Filenko R.A., Tsyrenov T.G. *Otsenka potentsial'noy ekologicheskoy opasnosti prirodno-tekhnogennykh kompleksov rudnykh mestorozhdeniy Vostochnogo Zabaykal'ya* [Assessment of potential environmental hazards of natural and man-made complexes of ore deposits (Eastern Transbaikalia, Russia)] // *Geosfernye issledovaniya* [Geosphere Research]. 2020. 2. pp. 64–75. In Russian. doi: 10.17223/25421379/15/5
- Abramov B.N., Tsyrenov T.G. *Otsenka ekologicheskoy opasnosti na okruzhayushchuyu sredu khvostokhranilishch nekotorykh sul'fidnykh mestorozhdeniy Vostochnogo Zabaykal'ya* [Environmental hazard assessment on the environment of tailings of some sulfide deposits of Eastern Transbaikalia] // *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [Advances in current natural sciences]. 2019. 5. pp. 35–41. In Russian. doi: 10.18411/1681-7494-2019-5-35-41
- Abramov B.N., Epova E.S., Manzyrev D.V. *Geoekologicheskie problemy obrabotki rudnykh mestorozhdeniy zolota v Vostochnom Zabaykal'e* [Geocological problems of mining gold ore deposits in Eastern Transbaikalia] // *Geografiya i prirodnye resursy* [Geography and natural resources]. 2019. 2. pp. 110–113. In Russian. doi: 10.21782/GIPR0206-1619-2019-2(103-111)
- Barabanov V.F. *Mineralogiya volframitovykh mestorozhdeniy Vostochnogo Zabaykaliya. Tom 2* [Mineralogy of tungsten deposits of East Transbaikalia. Volume 2]. Leningrad: LSU Publishing House. 1975. 360 p. In Russian
- Vinokurov S.F., Gurbanov A.G., Bogatkov O.A., Karamurзов B.S., Gazeev V.M., Leksin A.B., Shevchenko A.V., Dolov S.M., Dudarov Z.I. Contents, seasonal variations, and forms of migration of major and minor elements in surface waters in the area of the Tyrnauz tungsten–molybdenum combine (TTMC) and adjacent areas (Kabardino-Balkarian republic, Russian Federation) and actions for recovery of the ecological environment // *Doklady Earth Sciences*. 2016. 467 (2). pp. 436–467. In Russian.
- Voytkovich G.V., Miroshnikov A.E., Povarennykh A.S., Prokhorov V.G. *Kratkiy spravochnik po geokhimii* [Geochemistry Quick Guide]. Moscow: Nedra. 1977. 184 p. In Russian
- Goleva R.V., Ivanov V.V., Kupriyanova I.I., Marinov B.N., Novikova M.I., Shpanov E.P., Shuriga T.N. *Ekologicheskaya otsenka potentsial'noy toksichnosti rudnykh mestorozhdeniy (metodicheskaya rekomendatsiya)* [Environmental assessment of potential toxicity of ore deposits (methodological recommendations)]. Moscow: RITSVIMS. 2001. 53 p. In Russian
- GOST R 70281-2022. *Okhrana okruzhayushchey sredy. Pochvy. Klassifikatsiya khimicheskikh veshchestv dlya kontrolya zagryazneniya. Otsial'noe izdanie* [State Standard 70281-2022 Environmental protection. Soils. Classification of chemical substances for pollution control]. Moscow: Russian Standards Publ. 2022. 8 p. In Russian

Mikhailenko V.N. *Problema tekhnogennykh otkhodov gornogo proizvodstva v Rossii* [The problem of technogenic wastes of mining production in Russia] // *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining informational and analytical bulletin]. 2006. 2. pp. 121–126. In Russian

Mikhailutina S.I. *Kompleksnaya ekologo-geokhimicheskaya otsenka zagryazneniya tyazhelymi metallami komponentov prirodnoy sredy gornorudnykh poseleniy Vostochnogo Zabaykal'ya: avtoreferat dissertatsii* [Complex ecological and geochemical assessment of heavy metal pollution of environmental components of mining settlements in Eastern Transbaikalia: dissertation abstract]. Irkutsk. 2007. 21 p. In Russian

MU 2.1.7.730099. *Pochva, ochistka naselennykh mest, bytovye i promyshlennyye otkhody, sanitarnaya okhrana pochvy. Gigienicheskaya otsenka kachestva pochvy naselennykh mest* [Methodological guidelines 2.1.7.730-99 Soil, cleaning of settlements, domestic and industrial waste, sanitary protection of soil. Hygienic assessment of the quality of soil in populated areas]. Moscow, Federal Centre of Gosanepidnadzor of the Ministry of Health of Russia Publ. 1999. 20 p. In Russian

Myazin V.P., Mikhailutina S.I. *Kompleksnaya otsenka tekhnogennoy zagryazneniya pochv i produktov pitaniya tyazhelymi metallami pri razmeshchenii khvostokhranilishch v Vostochnom Zabaykal'e* [Complex assessment of technogenic pollution of soils and foodstuffs with heavy metals at the location of tailing dumps in Eastern Transbaikalia] // *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining informational and analytical bulletin]. 2006. 9. pp. 164–170. In Russian

Ptitsyn A.B. *Problemy osvoeniya tekhnogennykh mestorozhdeniy Zabaykal'ya* [Problems of technogenic deposits development in Transbaikalia] // *Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy Sibiri* [Geology and mineral resources of Siberia]. 2014. S3-2. pp. 128–130. In Russian

Puzanov A.V., Baboshkina S.V., Gorbachev I.V. Characteristics of heavy metal migration in the natural anthropogenic anomalies of the North-Western Altai // *Geokhimiya* [Geochemistry International]. 2012. 50 (4). pp. 393–402. In Russian.

SanPiN 1.2.3685-21 *Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredy obitaniya* [SanPiN 1.2.3685-21 Hygienic norms and requirements to ensure safety and (or) harmlessness to humans of environmental factors] [Electronic resource]. 2021. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115?section=text> (Date of accessed 12.02.2024). In Russian

Smirnov V.I. *Rudnye mestorozhdeniya SSSR. Tom 3* [Ore deposits of the USSR. Volume 3]. Moscow: Nedra. 1978. 496 p. In Russian  
Kharitonov Yu.F., Vasiliev D.A. et al. *Ekologo-ekonomicheskaya otsenka gornopromyshlennogo kompleksa Chitinskoy oblasti* [Ecological and economic assessment of the mining complex of Chita region]. *Resursy Zabaykal'ya. Spets.vyp.* – Resources of Transbaikalia. Special issue. 2002. pp. 42–47. In Russian

Chechel' L.P. *Ekologo-gidrogeokhimicheskie posledstviya otrabotki vol'framovykh i molibdenovykh mestorozhdeniy Vostochnogo Zabaykal'ya* [Ecological and hydrochemical consequences of mining tungsten and molybdenum deposits of the eastern Transbaikalia]. *Izvestiya tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University]. Geo Assets Engineering. 2017. 328 (6). pp. 52–63. In Russian

Chechel' L.P. *Formirovanie gidrogeokhimicheskikh poley vol'framovykh mestorozhdeniy Vostochnogo Zabaykal'ya pod vliyaniem prirodnykh i antropogennykh faktorov: avtoreferat dissertatsii* [Hydrogeochemical field forming of tungsten deposits in Eastern Transbaikalia under the influence of natural and anthropogenic factors: dissertation abstract]. Tomsk, 2021. 21 p. In Russian

Chechel' L.P., Zamana L.V. *Geokhimicheskaya tipizatsiya tekhnogenno-transformirovannykh vod Bom-Gorkhonskogo vol'framovogo mestorozhdeniya (Vostochnoe Zabaykal'e)* [Geochemical typification of the Bom-Gorkhon tungsten deposit technogenic-transformed waters (East Transbaikalia)]. *Materialy chetvertoy Vserossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Geologicheskaya evolyutsiya vzaimodeystviya vody s gornymi porodami»* – Proceedings of the fourth all-Russian scientific conference with international participation «Water-Rock Interaction: Geological Evolution». 2020. pp 408–412. In Russian. doi: 10.31554/978-5-7925-0584-1-2020-408-412

Shvartsev, S.L. *Gidrogeokhimiya zony gipergeneza: 2-e izd., ispravl. i dop.* [Hydrogeochemistry of the hypergenesis zone: 2nd edition, corrected and supplemented.]. Moscow: Nedra. 1998. 366 p. In Russian

Yurgenson G.A. *Geologicheskie issledovaniya i gorno-promyshlennyy kompleks Zabaykal'ya: Istoriya, sovremennoe sostoyanie, problemy, perspektivy razvitiya. K 300-letiyu osnovaniya Prikaza rudokopnykh del* [Geological researches and mining industrial complex of Transbaikalia: History, current state, problems, prospects of development. To the 300th anniversary of the foundation of the Order of Mining]. Novosibirsk: Nauka. 1999. 574 p. In Russian

Clemente D, Newling P, Botelho d.S.A, Lejeune G, Barber S, Tucker P. Reprocessing slimes tailings from a tungsten mine. *Miner. Eng.* 1993. 6. pp. 831–839. doi:10.1016/0892-6875(93)90057-T

Figueiredo J., Vila M.C., Matos K., Martins D., Futuro A., Dinis M.d.L., Góis J., Leite A., Fiúza A Tailings reprocessing from Cabeço do Pião dam in Central Portugal: A kinetic approach of experimental data. *J. Sustainable Min.* 2018. 17(3). pp. 139–144. doi: 10.1016/j.jsm.2018.07.001

Han Z., Golev A., Edraki M.A. Review of Tungsten Resources and Potential Extraction from Mine Waste. *Minerals.* 2021. 11(7): 701. doi: 10.3390/min11070701

Hui W., Hao Z., Hongyan T. Wen J., Li A. Heavy metal pollution characteristics and health risk evaluation of soil around a tungsten-molybdenum mine in Luoyang, China. *Environ. Earth Sci.* 2021. 80: 293. doi: 10.1007/s12665-021-09539-0

Liu W., Wu T., Li Z., Hao X., Lu A. Preparation and characterization of ceramic substrate from tungsten mine tailings. *Construction and Building Materials.* 2015. 77. pp. 139–144. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.094

Lin C., Li R., Cheng H., Wang J., Shao X. Tungsten Distribution in Soil and Rice in the Vicinity of the World's Largest and Longest-Operating Tungsten Mine in China. *PLoS ONE.* 2014. 9(3): e91981. doi: 10.1371/journal.pone.0091981

Msumange D.A., Msumange J.A., Bru K., Bourgeois F. Tungsten tailings issues and reprocessing solutions. *Miner. Mater.* 2023. 2:14. doi: 10.20517/mmm.2023.21

Mulenshi J., Khavari P., Chehreh Chelgani, S., Rosenkranz J. Characterization and Beneficiation Options for Tungsten Recovery from Yxsjöberg Historical Ore Tailings. *Processes.* 2019. 7(12): 895. doi: 10.3390/pr7120895

Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *GeoJournal.* 1969. V. 2(3). pp. 108–118.

Peng K., Yang H., Ouyang J. (2015) Tungsten tailing powders activated for use as cementitious material. *Powder Technol.* 286. pp. 678–683. doi: 10.1016/j.powtec.2015.09.012

**Информация об авторах:**

**Абрамов Б.Н.**, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория геохимии и рудогенеза, Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Чита, Россия.

E-mail: b-abramov@mail.ru

**Цыренов Т.Г.**, младший научный сотрудник, лаборатория геохимии и рудогенеза, Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Чита, Россия.

E-mail: master.of.pistols@mail.ru

*Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.*

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

**Information about the authors:**

**Abramov B.N.**, Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Leading Researcher, Laboratory of Geochemistry and Ore Genesis, In-Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology, SB RAS, Chita, Russia.

E-mail: b-abramov@mail.ru

**Tsyrenov T.G.**, Junior Researcher, Laboratory of Geochemistry and Ore Genesis, Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology, SB RAS, Chita, Russia.

E-mail: master.of.pistols@mail.ru

*Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.*

*The authors declare no conflicts of interests.*

*Статья поступила в редакцию 14.02.2024; одобрена после рецензирования 07.04.2025; принята к публикации 02.06.2025*

*The article was submitted 14.02.2024; approved after reviewing 07.04.2025; accepted for publication 02.06.2025*