

НАКОПЛЕНИЕ ТОКСИЧНЫХ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ РАСТЕНИЯМИ В РАЙОНЕ ЛЮБАВИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЗОЛОТА (ЗАБАЙКАЛЬСКИЙ КРАЙ)

В.П. Макаров¹, Г.А. Юргенсон²

^{1–2} Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН

¹ Лаборатория географии и регионального природопользования

² Лаборатория геохимии и рудогенеза

¹ Ст. науч. сотр., канд. биол. наук; e-mail: vmt2853@mail.ru

² Гл. науч. сотр., проф., д-р геол.-минерал. наук; e-mail: yurgga@mail.ru

Золоторудные месторождения в Забайкалье характеризуются аномально высоким содержанием ряда элементов, особенно As, что отражается на загрязнении почв и растений, влияет на состояние здоровья проживающих здесь людей. Исследования проведены в районе Любавинского месторождения золота с целью выявить содержание ряда токсичных элементов (As, Ba, Be, Bi, Cd, Hg, Pb, Sb и Tl) в почве и растениях. Пробные площади были расположены на хвостохранилище и в природных растительных сообществах. Для определения концентраций микроэлементов в пробах почвы и растений за основу была использована «Методика выполнения измерений содержания металлов в твердых объектах методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой» (1998). Установлено аномально высокое относительно кларка земной коры [Rudnick, Gao, 2003] валовое содержание в грунте хвостохранилища и в почве окружающей территории As, Bi, Hg и Sb, а также превышение гигиенического норматива As в почве на всех пробных площадях, Hg и Sb – в грунте хвостохранилища. Травянистые растения на площади хвостохранилища (*Thermopsis lanceolata*, *Artemisia gmelinii*) характеризовались значительным превышением установленных норм в лекарственном сырье по содержанию As в подземной и надземной частях растений, а за его пределами незначительным превышением, за исключением *Phlojodicarpus sibiricus*, у которого концентрация As в подземной части значительно превышала ПДК. Концентрация исследованных элементов в надземной и подземной частях растений зависела от биологических особенностей растений и характеристики окружающей среды. *P. sibiricus*, *A. gmelinii* характеризовались относительно высокой концентрацией элементов в подземной части растения, а *T. lanceolata* – более высокой концентрацией в надземной части, особенно в соцветиях. Наиболее активно извлекались растениями доступные формы Cd, Sb, Ba, Hg, Tl и Bi. Вблизи Любавинского месторождения не рекомендовано использовать лекарственные и кормовые растения без контроля на содержание в них токсичных элементов.

Ключевые слова: золоторудные месторождения, почвы, флора, биогеохимическая подвижность, транслокация

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.80.6.4

ВВЕДЕНИЕ

Геоэкологическая оценка – это комплекс исследований, направленный на выявление антропогенных изменений природных и природно-антропогенных систем и их компонентов, а также последствий этих изменений, влияющих на экологическое состояние среды, жизнь и деятельность населения. Цель геоэкологической оценки – получение достоверной информации, необходимой для предотвращения, минимизации или ликвидации неблагоприятных экологических последствий хозяйственной деятельности людей, поддержания заданных социально-экономических функций территории и оптимальных условий жизни населения [Емельянов, 2005]. Ландшафтно-геохимический анализ состояния окружающей среды направлен на исследование

миграции загрязняющих веществ в ландшафтах, роли природных факторов в трансформации техногенных потоков, метаболизма поллютантов в ландшафтах под влиянием зонально-провинциальных, региональных и локальных особенностей тех или иных территорий [Касимов, 2013].

В Забайкальском крае повышенное содержание As в компонентах окружающей среды связано с деятельностью горнодобывающих предприятий и природным геохимическим фоном [Михайлова и др., 2020; Дмитриева, 2024; Солодухина, 2012; Солодухина, Юрженсон, 2018; Шеховцов, Белоzerosцева, 2016; Солодухина, Юрженсон, 2017; Юрженсон, Горбань, 2017; Горбань, Юрженсон, 2016; Юрженсон, 2020; Yurgenson, Gorban, 2020; Макаров и др., 2024; Макаров, 2024]. Аналогичная ситуация

обнаружена в других регионах России [Гилимшина и др., 2022; Кажкенова и др., 2020; Подолянчик и др., 2022; Тимофеева и др., 2020; Филатова и др., 2022; Шевцов и др., 2020] и странах зарубежья [Souza Neto de et al., 2020; Chen S. et al., 2023; Chen Y. et al., 2023; Faria et al., 2023; Hoang et al., 2021; Marrugo-Madrid et al., 2022; Rakete et al., 2022; Wongsasuluk et al., 2021; Zha et al., 2025].

В районах золоторудных месторождений Забайкалья ряд элементов в почве значительно превышает фоновые значения [Rudnick, Gao, 2014]. Одним из золоторудных месторождений края является Любавинское, которое, согласно классификации горно-промышленных геосистем, входит в состав мышьяковых [Юргенсон, 2020]. Самородное золото в руде находится в ассоциации с пиритом (FeS_2), арсенопиритом ($FeAsS$), галенитом (PbS) и халькопиритом ($CuFeS_2$). Основная масса As связана с арсенопиритом. В результате их окисления в почву и материал, слагающий хвостохранилище, мигрируют As, Pb, Cu и S, образующая здесь серную кислоту, которая усиливает подвижность всех рудных, в том числе и потенциально токсичных химических элементов [Epova et al., 2019].

К второстепенным рудным минералам относятся сфалерит (ZnS), тетрадимит (Bi_2Te_2S), к редким – антимонит (Sb_2S_3), киноварь (HgS), висмутин (Bi_2S_3), а также сульфосоли Cu, являющиеся источниками As и Sb в почвах и хвостохранилище. Источником относительно высоких содержаний Hg в районе месторождения является также металлическая Hg и ее амальгамы, внесенные в процесс извлечения золота способом амальгамации.

Вблизи Любавинского месторождения золота находится поселок Любовь, который основан в связи с открытием и разработкой (в 1882 г.) месторождений золота в Любавинском рудном узле. В настоящее время в селе проживает около 700 человек. В 1991 г. рудник Любовь был остановлен, а его шахты затоплены. В результате работы обогатительной фабрики рядом с поселком образовалось хвостохранилище с аномальным содержанием в грунте токсичных для человека и животных химических элементов. Консервация хвостохранилища не производилась, происходит зарастание поверхности грунта дикорастущими растениями. Проективное покрытие растений еще не велико, возможен разнос пылевых частиц на окружающую местность. На хвостохранилище домашний скот поедает траву. Существует опасность перемещения токсичных элементов в пищу живущих здесь людей.

К токсичным для животных и человека элементам относят As, Ba, Be, Bi, Cd, Hg, Pb, Sb и Tl [Скальный, Рудаков, 2004]. В аномальных геохимических условиях окружающей среды необходимо

знать реакцию растений на высокое содержание токсичных элементов.

Потому цель исследований – на примере ряда растений, произрастающих в районе месторождения, выяснить их способность к поглощению токсичных элементов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проведены в районе Любавинского месторождения золота ($49,63180^\circ$ с. ш., $112,15317^\circ$ в. д.) в июне 2021 г. (рис. 1).

Характеристика пробных площадей представлена в табл. 1. Исследовано в грунте хвостохранилища и почвах вокруг него содержание As, Ba, Be, Bi, Cd, Hg, Pb, Sb и Tl, а также концентрация этих элементов в следующих растениях: береза повислая (*Betula pendula* Roth), вздутоплодник сибирский (*Phlojodicarpus sibiricus* (Stephan ex Spreng.)), земляника восточная (*Fragaria orientalis* Losinsk.), лиственница Гмелина (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.), полынь Гмелина (*Artemisia gmelinii* Weber ex Stechm.) и термопсис ланцетный (*Thermopsis lanceolata* R. Br.).

Привязка проб производилась с использованием GPS навигатора, фиксировались географические координаты и абсолютная высота расположения пробной площади, направление и угол наклона склона.

На пробной площади отбиралась объединенная пробы почвы в слое 0–40 см [ГОСТ 17.4.3.01-2017]. Гранулометрический состав почвы определяли в поле методом скатывания шнуря увлажненной почвы [Вадюнина и др., 1961]. На пробной площади отбирали от трех до шести растений в зависимости от их массы, согласно нормативным требованиям [ОФС.1.1.0005.15, 2024].

Анализ почвенных и растительных образцов проводился в лаборатории физико-химических методов исследования Института тектоники и геофизики имени Ю.А. Косыгина (г. Хабаровск). Для анализа почвенных и растительных проб использовался масс-спектрофотометр ICP-MS Elan 9000 (Канада). Использовался метод спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой [ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98, 2024]. Значения Sb, Pb, Be приведены ниже порога по методике ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98, 2024; [Экспериандова и др., 2010]. Концентрация Hg определялась с помощью качественной (полуколичественной) оценки по наличию ионов элемента в образце. Для анализа подвижных форм элементов применяли кислотный способ определения по пункту 5.1.2.2 – Кислотная экстракция металлов из почв азотной кислотой молярной концентрации 5,0 моль/дм³. Соотношение почва : кислота = 1 : 5. «Холостую пробу» готовили параллельно с партией анализируемых проб, и она содержала те же реактивы и в тех же количествах, что и анализируемые пробы.

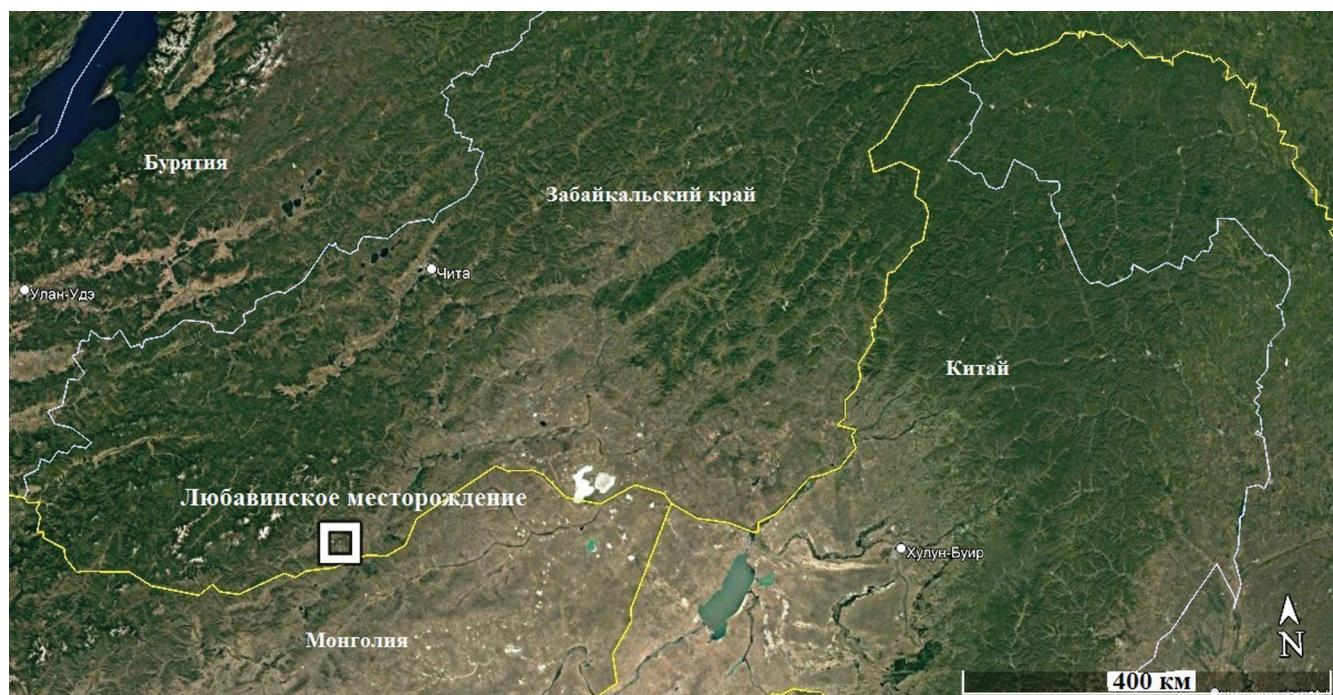


Рис. 1. Расположение Любавинского месторождения золота

Таблица 1
Характеристика пробных площадей

Номер п.п.	Координаты, град./абсолютная высота, м/экспозиция и крутизна, склона, град.	Тип почвы, гранулометрический состав	Растительное сообщество	Проективное покрытие исследованных растений, %
1	N49.63180 E112.15317/1140/ восточный, 5-10	Грунт щебнисто-песчаный	Рудеральное, на хвостохранилище	Полынь Гмелина – <5%; Термопсис ланцетный – 20%
2	N49.62504 E112.13585/1270/ северо-восточный, 20-30	Каштановая мучнисто- карбонатная, средний суглинок	Степь горная, разнотравная	Лиственница Гмелина – единично; Вздутоплодник сиб. – <5%
3	N49.72924 E112.10382/1011/ западный, 5-10	Лугово-черноземная, легкий суглинок	Степь горная разнотравная	Береза повислая – единично; лиственница Гмелина – единично; термопсис ланцентный – 5%
4	N49.62554 E112.13803/1212/ северо-восточный, 5-10	Лугово-черноземная, легкий суглинок	Березняк разнотравный	Береза повислая – сомкнутость крон 50–60%; земляника восточная – 10–20%

Коэффициент биогеохимической подвижности определяли по формуле Н.С. Касимова: $B_x = l/m$, где l – концентрация элемента в сухом веществе растений, m – содержание подвижных форм элемента, извлекаемых из почвы слабыми растворителями [Дьяконов и др., 1996]. Коэффициент транслокации – по формуле: $TF = \text{концентрация элемента в надземной части} / \text{концентрация элемента в подземной части растения, мг/кг}$. Статистическая обработка данных

проводилась с помощью программы Microsoft Excel 2010, в разделе «Описательная статистика».

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Пробные площади подбирались с учетом преобладания основных типов растительности. Одна из площадей (п.п. 3) расположена на удалении 12 км от месторождения как фоновая (рис. 2).

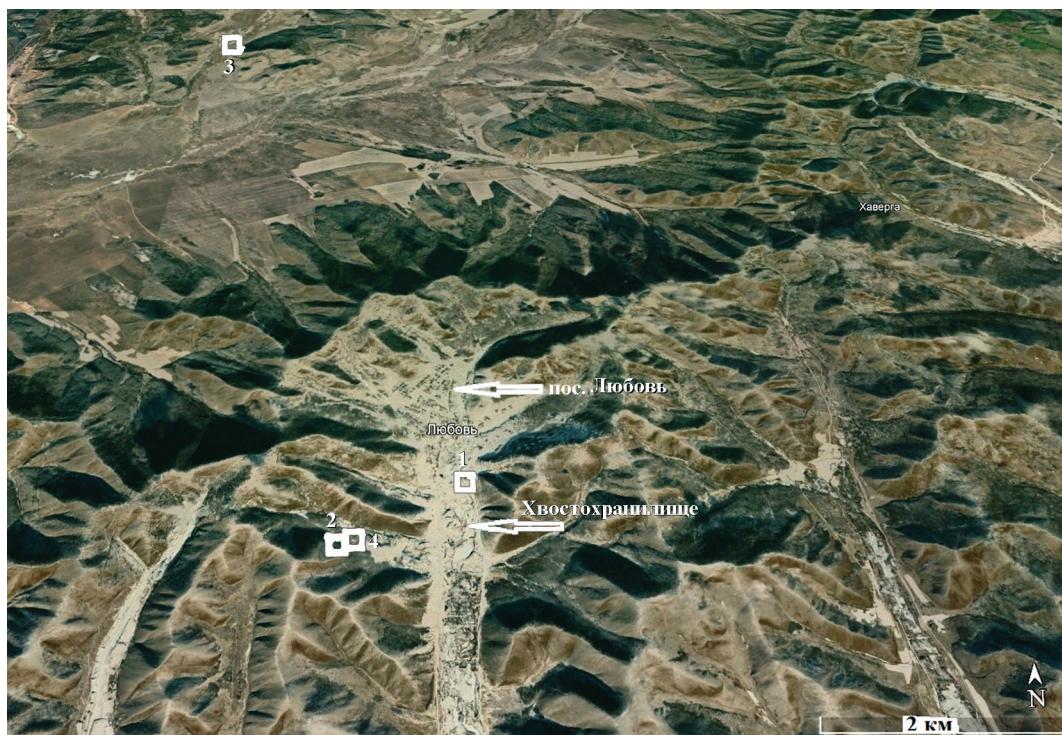


Рис. 2. Расположение пробных площадей

Содержание элементов в почве. Высокое валовое содержание в грунте хвостохранилища относительно кларка литосферы [Rudnick, Gao, 2014] имеют кларк концентрации (КК) As (КК 97), Bi (КК 3), Hg (КК 109) и Sb (КК 16). Это связано с тем, что золото, находившееся в тесном срастании с сульфидами, извлекалось амальгамацией. Остатки сульфидов, прежде всего арсенопирит, а также пирит, сфалерит, висмутин и киноварь, вместе с частью амальгамы сбрасывались в отвал, где подвергались окислению и в виде сульфатов переходили в миграционное состояние [Erova et al., 2019] и могли выноситься с отвала в окружающий его природный ландшафт. Поэтому на участках с ненарушенным почвенным покровом содержание As, Sb, Hg, Pb и Bi в почве было также относительно высокое по отношению к фону, соответственно кларк концентрации был равен в пределах 2–12, 3–4, 1,4–4,0 и 1,1–1,4. Валовое содержание в почве Be, Tl и на отдельных площадках Cd было меньше кларка, а Ba – близко фоновому содержанию (табл. 2). Высокие корреляционные связи между Hg и As, Sb и Bi соответственно $r = 0,966, 0,978$ и $0,910$ свидетельствуют о техногенном поступлении Hg в эту систему в процессе амальгамации сульфидного концентрата.

Валовое содержание As в почве на всех площадях, а также Hg и Sb на п.п. 1 превышало установленные в России гигиенические нормы ПДК [Предельно допустимые..., 2006] и ОДК [Ориентировочно допустимые..., 2009] в почве [ГН 2.1.7.2041–06;

ГН 2.1.7.2511–09] соответственно ПДК в 4–230, 3,6 и 1,4 раза; ОДК ртути – в 4–46 раз.

Подвижность химических элементов в системе «почва – растение» определяется долей и составом их подвижных форм [Птицын и др., 2014]. Установлено относительно высокое содержание подвижных форм As в грунте хвостохранилища, а на отдельных площадках – Ba, Hg и Bi. Содержание подвижных форм Pb было больше установленного предела на п.п. 1, 2 и 4. В результате проведенных экспериментов по выщелачиванию золотоносных руд месторождения Любавинское сернокислотными растворами установлено, что активной миграции подвержены халькофильные (Pb, Zn, Cu, Cd, As, Sb и Bi). Они оказывают наиболее значительное влияние на компоненты экологических систем геотехногенного ландшафта [Erova et al., 2019, с. 473]. В грунте хвостохранилища относительно высокой долей подвижных элементов характеризовались As, Pb и Tl; в почве площадок вблизи хвостохранилища – Ba, Be, Bi, Cd и Hg; в почве удаленной от месторождения площадки выделялась доля подвижной Sb. Связь между валовым содержанием и величиной подвижных форм в почве As, Cd, Sb, Ba и Pb была сильной ($r = 0,83–1,00$).

Содержание элементов в растениях. Выбор растений для определения концентрации химических элементов осуществлялся исходя из их потенциального использования населением в качестве лекарственного и пищевого сырья, кормового ресурса

животных (березовые веники) и топлива (лиственница, береза).

Береза повислая используется как лекарственное сырье и в качестве грубых кормов для животных. Концентрация токсичных элементов в листьях не превышала предельно допустимый уровень в грубых и сочных кормах для сельскохозяйственных животных [Временный..., 2024], а также предельное содержание тяжелых металлов в лекарственном сырье [ОФС.1.5.3.0009.15]. В то же время небольшое превышение нормы концентрации отмечено As на п.п. 2 (табл. 3).

Вздутоплодник сибирский внесен в Государственный реестр фармакопейных растений (рис. 3).

Лекарственным сырьем являются корневища и корни. Концентрация токсичных элементов не превышала установленные нормы, кроме содержания As в корне (1,86 мг/кг) – больше ПДК (0,5 мг/кг) в 4 раза на п.п. 2 [ОФС.1.5.3.0009.15, 2024]. В листьях содержание As не превышало норму (0,15 мг/кг).

Земляника восточная поедается в свежем виде и в качестве варенья. Листья земляники не содержали избыточного количества токсичных элементов согласно СанПиН 2.3.2.1078-01 [СанПиН 2.3.2.1078-01, 2024]. Определено лишь высокое содержание Ba в листьях земляники относительно других растений (155 мг/кг). Это больше, чем среднее содержание в других исследованных растений в 6 раз.

Таблица 2

Содержание химических элементов в почве на пробных площадях, мг/кг

Номер п.п.	As	Ba	Be	Bi	Cd	Hg	Pb	Sb	Tl
Валовое									
1	463,36	448,41	1,69	0,40	0,13	5,43	18,61	6,20	0,41
2	39,03	648,74	1,60	0,18	0,18	0,18	21,63	1,69	0,39
3	7,83	546,68	1,82	0,10	0,06	0,07	13,68	0,27	0,31
4	57,15	560,68	1,90	0,23	0,09	0,12	31,42	1,22	0,43
Подвижные формы									
1	431,61	38,73	0,30	0,20	0,06	0,03	15,42	0,42	0,033
2	7,17	194,00	0,47	0,001	0,17	0,09	14,80	0,01	0,001
3	1,08	43,14	0,31	0,04	0,03	0,02	2,94	0,16	0,010
4	17,36	136,32	0,57	0,91	0,07	0,06	19,19	0,03	0,001
Доля подвижных форм, %									
1	93,1	8,6	17,8	50,0	46,2	0,6	82,9	6,8	8,0
2	18,4	29,9	29,4	0,6	94,4	50,0	68,4	0,6	0,3
3	13,8	7,9	17,0	40,0	50,0	28,6	21,5	59,3	3,2
4	30,4	24,3	30,0	395,7	77,8	50,0	61,1	2,5	0,2
R***	1,00	0,86	0,28	0,20	0,90	-0,41	0,84	0,83	0,05
Кларк литосферы [Rudnick, Gao, 2014]	4,8	628	2,1	0,16	0,09	0,05	17,0	0,4	0,9
[ПДК]	2,0	–	–	–	–	2,1	32,0 (6,0)*	4,5	–
** [ОДК]	10,0	–	–	–	2,0	–	130,0	–	–

Примечание. * ПДК для подвижных форм элемента. ** ОДК для группы почв близких к нейтральным, нейтральные (суглинистые и глинистые). *** Коэффициент корреляции Пирсона между валовым содержанием и подвижными формами элементов; жирным шрифтом выделены значения, превышающие ПДК и ОДК. Жирным шрифтом отмечены значения, превышающие установленные нормы.

Лиственница Гмелина используется преимущественно как топливо и строительный материал. Хвоя лиственницы не содержала избыточного количества мышьяка (0,27 мг/кг) и других токсичных элементов.

Полынь Гмелина обладает рядом лекарственных свойств подобно полыни горькой (*Artemisia absinthium L.*), включеной в реестр государственной фармакопеи России (рис. 4).

Она произрастает на хвостохранилище месторождения. Листья и особенно корни содержали для лекарственного сырья высокое количество As, соответственно 10,6 и 51,4 мг/кг, что больше ПДК в 20 и 100 раз. Содержание других токсичных элементов соответствовало норме.

Термопсис ланцетный – лекарственное растение, включенное в Государственную фармако-

пею России. Произрастает на хвостохранилище и в природном сообществе (рис. 5). В качестве лекарственного сырья используется надземная часть растения. Концентрация мышьяка в листьях была 15,5, в корнях – 19,3 мг/кг. Концентрация мышья-

ка превышала ПДК (0,5 мг/кг) соответственно в 30 и 40 раз. В то же время в природном сообществе содержание As в надземной массе соответствовало норме и незначительно превышало в корне (0,63 мг/кг).

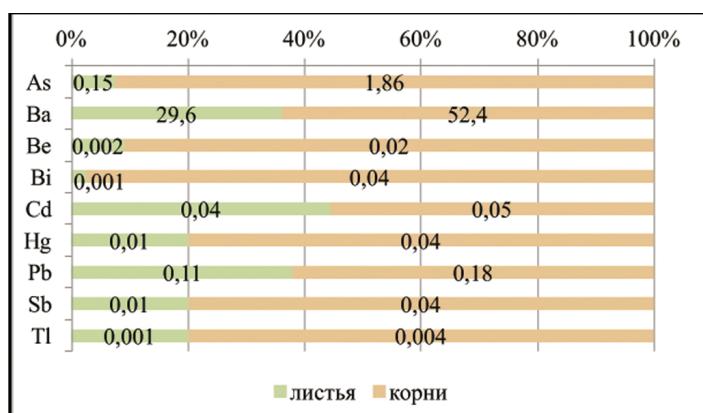


Рис. 3. Сравнительная концентрация элементов в листья и корнях вздутоплодника сибирского (*Phlojodicarpus sibiricus*), произрастающего в степном сообществе, мг/кг



Рис. 4. Сравнительная концентрация элементов в листья и корнях полыни Гмелина (*Artemisia gmelinii*), произрастающей на хвостохранилище, мг/кг

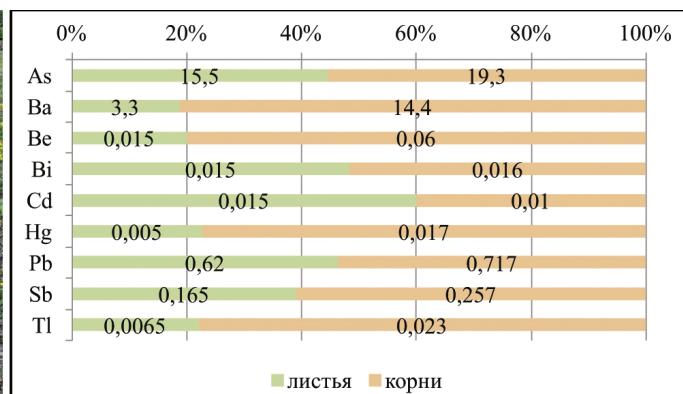


Рис. 5. Сравнительная концентрация элементов в листья и корнях термопсиса ланцетного (*Thermopsis lanceolata*), произрастающего на хвостохранилище, мг/кг

Таблица 3

Концентрация химических элементов в растениях, мг/кг

Растение	Орган	Номер п.п.	As	Ba	Be	Bi	Cd	Hg	Pb	Sb	Tl
Береза повислая	Листья	2	0,56	13,95	0,003	0,001	0,12	0,001	0,09	0,01	0,001
—»—	Листья	3	0,07	24,28	0,002	0,001	0,11	0,001	0,21	0,004	0,002
—»—	Листья	4	0,36	89,45	0,002	0,02	0,12	0,001	0,27	0,01	0,001
Вздутоплодник сибирский	Листья	2	0,15	29,57	0,002	0,001	0,04	0,01	0,11	0,01	0,001
—»—	Корни	2	1,86	52,36	0,02	0,04	0,05	0,04	0,18	0,04	0,004
Земляника восточная	Листья	4	0,15	154,96	0,002	0,001	0,02	0,005	0,16	0,004	0,001
Лиственница Гмелина	Хвоя	2	0,27	45,81	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01	0,03	0,001
—»—	Хвоя	3	0,07	24,24	0,01	0,01	0,04	0,005	0,01	0,001	0,003
Полынь Гмелина	Листья	1	10,64	2,67	0,01	0,001	0,06	0,001	0,40	0,08	0,001
—»—	Корни	1	51,35	44,155	0,18	0,045	0,07	0,035	2,09	0,675	0,045
Тернопсис ланцетный	Листья	1	15,49	3,305	0,015	0,015	0,015	0,005	0,62	0,165	0,0065
—»—	Соцветия	1	14,960	12,567	0,067	0,017	0,017	0,041	0,570	0,210	0,010
—»—	Корни	1	19,333	14,427	0,06	0,016	0,010	0,017	0,717	0,257	0,023
—»—	Корни	3	0,63	14,50	0,03	0,06	0,02	0,04	0,15	0,02	0,01
—»—	Соцветия	3	0,41	20,31	0,08	0,01	0,01	0,03	0,51	0,01	0,01
—»—	Листья	3	0,50	14,18	0,04	0,01	0,01	0,01	0,20	0,02	0,02
ПДК [ОФС.1.5.3.0009.15]			0,5	—	—	—	1,0	0,1	6,0	—	—
МДУ [Временный..., 2024]			0,5	—	—	—	0,3	0,05	5,0	0,5	—
Допустимый уровень [СанПиН 2.3.2.1078–01]			0,2	—	—	—	0,03	0,02	0,4	—	—

Примечание. Жирным шрифтом отмечены значения, превышающие установленные нормы.

Коэффициент биогеохимической подвижности. К группе элементов, доступные формы которых активно извлекаются растениями ($B_x > 1$), отнесены Cd (листья березы повислой, хвоя лиственницы Гмелина, корни полыни Гмелина); Sb (корни вздутоплодника сибирского, хвоя лиственницы Гмелина и корни полыни Гмелина); Ba (листья земляники восточной, корни полыни Гмелина); Hg (корни полыни Гмелина и соцветия тернопсиса ланцетного); Tl (корни вздутоплодника сибирского и листья тернопсиса ланцетного); Bi (корни вздутоплодника сибирского и тернопсиса ланцетного, хвоя лиственницы Гмелина). Наиболее активно извлекался Bi корнями вздутоплодника сибирского ($B_x = 40$) и хвоей лиственницы Гмелина ($B_x = 20$) (табл. 4).

Приблизительно на одном уровне находилось содержание ряда элементов в растениях с содержанием доступных форм этих элементов в почве ($B_x = 1$). Это Bi (листья березы повислой и вздутоплодника си-

бирского); Cd (листья полыни Гмелина); Sb (листья березы повислой и вздутоплодника сибирского); Tl (листья березы повислой, вздутоплодника сибирского, земляники восточной, хвоя лиственницы Гмелина, корни и соцветия тернопсиса ланцетного).

В третью группу элементов, подвижные формы которых не полностью извлекаются растениями, вошли Be, As и Pb ($B_x < 1$).

Коэффициент транслокации. Коэффициент транслокации *TF* (translocation factor) [Macnair, 2003] показывает степень переноса химических элементов в наземные органы растений. Величина TF зависит от природы элемента, видовой стратегии растения по отношению к данному элементу и концентрации элемента в питательной среде [Железнова и др., 2017]. Низкое содержание доступных форм химических элементов в почве может приводить к более интенсивному поглощению элементов растениями, а эффект «корневого барьера» проявляется лишь при их высоких концентрациях [Сиромля и др., 2021].

Таблица 4

Коэффициент биогеохимической подвижности элементов (B_x)

Растение	Орган	№ п.п.	As	Ba	Be	Bi	Cd	Hg	Pb	Sb	Tl
Береза повислая	Листья	2	0,078	0,072	0,006	1,0	0,706	0,011	0,006	1,0	1,0
—»—	—»—	3	0,065	0,563	0,006	0,025	3,667	0,05	0,071	0,025	0,200
—»—	—»—	4	0,021	0,656	0,004	0,022	1,714	0,017	0,014	0,333	1,0
Вздутоплодник сибирский	Корни	2	0,259	0,27	0,043	40,0	0,294	0,444	0,012	4,0	4,0
—»—	Листья	2	0,021	0,152	0,004	1,0	0,235	0,111	0,007	1,0	1,0
Земляника восточная	Листья	4	0,009	1,137	0,004	0,001	0,286	0,083	0,008	0,133	1,0
Лиственница гмелина	Хвоя	2	0,038	0,236	0,021	20,0	0,118	0,222	0,001	3,0	1,0
—»—	—»—	3	0,065	0,562	0,032	0,25	1,333	0,250	0,003	0,006	0,3
Полынь гмелина	Листья	1	0,025	0,069	0,033	0,005	1,0	0,033	0,026	0,19	0,03
—»—	Корни	1	0,119	1,14	0,60	0,225	1,167	1,167	0,136	1,607	1,364
Термопсис ланцетный	Корни	1	0,045	0,373	0,20	0,08	0,167	0,567	0,046	0,612	0,697
—»—	Листья	1	0,036	0,085	0,05	0,075	0,250	0,167	0,04	0,393	0,197
—»—	Соцветия	1	0,035	0,324	0,223	0,085	0,283	1,367	0,037	0,50	0,303
—»—	Корни	3	0,583	0,336	0,097	1,50	0,667	2,00	0,051	0,125	1,0
—»—	Листья	3	0,463	0,329	0,129	0,25	0,333	0,50	0,068	0,125	2,0
—»—	Соцветия	3	0,38	0,471	0,258	0,25	0,333	1,50	0,173	0,063	1,0

Вздутоплодник сибирский и полынь Гмелина характеризовались относительно высокой концентрацией элементов в корнях. TF элементов вздутоплодника сибирского находился в последовательности: Cd > Pb > Ba > Hg = Sb = Tl > Be > As > Bi (табл. 5). Относительное низкое поступление в наземную часть As и Bi может быть связано с корневым барьером или низкой потребностью растений в этих элементах. Cd не входит в число необходимых для растений элементов, однако он эффективно поглощается корневой системой и листьями растений [Kabata-Pendias, 2011]. На интенсивность поступления Cd большое влияние оказывают тип и свойства почвы. Перемещение Pb в надземную часть растений весьма ограничено [Kabata-Pendias, 2011], однако в наших исследованиях это не подтверждается. TF элементов полыни Гмелина, произрастающей на территории хвостохранилища, был следующий: Cd > As > Pb > Sb > Ba = Be > Hg > Bi > Tl.

Термопсис ланцетный характеризовался относительно высоким коэффициентом транслокации ($TF > 1$) в надземную часть Ba, Be, Bi, Cd, Hg, Pb и Tl. TF (надземная часть (листья) / корни) находился на п.п. 1 в последовательности: Cd > Bi > Pb > As > Sb > Hg > Tl > Be > Ba, а на п.п. 3 в следующем порядке:

Tl > Pb > Be > Sb > Ba > As > Cd > Hg > Bi. Большая концентрация в листьях термопсиса Cd, Bi, As на п.п. 1, видимо, связана с высоким по отношению к п.п. 3 содержанием этих элементов в грунте хвостохранилища. Содержание Tl в растениях, вероятно, зависело от его концентрации в почве. Некоторые виды растений способны накапливать Tl больше других, например, полынь горькая (*Artemisia absinthium* L.) [Kabata-Pendias, 2011]. Высокий коэффициент транслокации Be на п.п. 3 возможно объяснить тем, что он легко поглощается растениями, а также тем, что некоторые виды бобовых и крестоцветных имеют выраженную способность накапливать Be, например черника обыкновенная (*Vaccinium myrtillus* L.) [Kabata-Pendias, 2011].

TF (надземная часть (соцветия)/корни) в термопсисе ланцетном находился на п.п. 1 в последовательности: Hg > Cd > Be > Bi > Ba > Sb > Pb > As > Tl, а на п.п. 3 в следующем порядке: Pb > Be > Ba > Tl > Hg > As > Cd > Sb > Bi. Относительно высокие коэффициенты транслокации ряда элементов в надземную часть выделяют термопсис ланцетный от исследованных растений. Возможно это свойство растения можно будет использовать для мониторинга окружающей среды и очистке загарязненных почв и грунтов.

Таблица 5

Коэффициент транслокации элементов (TF)

Растение	Номер п.п.	Органы растения	As	Ba	Be	Bi	Cd	Hg	Pb	Sb	Tl
Вздутоплодник сибирский	2	Листья/корни	0,08	0,56	0,10	0,03	0,80	0,25	0,61	0,25	0,25
Полынь Гмелина	1	—»—	0,21	0,06	0,06	0,02	0,86	0,03	0,19	0,12	0,02
Термопсис ланцетный	1	Листья/корни	0,80	0,23	0,25	0,94	1,50	0,29	0,86	0,64	0,28
—»—	1	Соцветия/корни	0,77	0,87	1,12	1,06	1,70	2,41	0,79	0,82	0,43
Термопсис ланцетный	3	Листья/корни	0,79	0,98	1,33	0,17	0,50	0,25	1,33	1,00	2,00
—»—	3	Соцветия/корни	0,65	1,40	2,67	0,17	0,50	0,75	3,40	0,50	1,00

Примечание. Жирным шрифтом выделены значения с $TF > 1$.

ВЫВОДЫ

Добыча золота на территории Любавинского месторождения привела к аномально высокому содержанию ряда химических элементов в почве и растениях (As, Bi, Hg и Sb), особенно на хвостохранилище обогатительной фабрики.

Концентрация токсичных элементов в растениях (*Thermopsis lanceolata*, *Artemisia gmelinii*) на площади хвостохранилища характеризовались значительным превышением установленных норм в лекарственном сырье по содержанию As. За пределами хвостохранилища высокой концентрацией As характеризовался также *Phlojodicarpus sibiricus*.

Величины накопления токсичных элементов в надземной и подземной части растений имели значительные различия, связанные с биологическими особенностями растений и характеристикой среды их обитания.

Вблизи Любавинского месторождения не рекомендуется использовать лекарственные растения и березовые веники для животных. Для пастьбы животных необходимо исключить в первую очередь площадь хвостохранилища, а сено и продукция животноводства должны подлежать контролю на содержание в них токсичных элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы определения физических свойств почв и грунтов. М.: Высшая школа, 1961. 345 с.
- Гилимишина Э.В., Зилеев И.И., Миннигазимов Н.С. Влияние деятельности Семеновской золотоизвлекательной фабрики в Баймакском районе Республики Башкортостан на почвенную среду / Экология и природопользование: сб. ст. по материалам II Всероссийской научно-практической конференции. Краснодар, 2022. С. 50–54.
- Горбань Д.Н., Юргенсон Г.А. Свинец в системе «почва – растение» в ландшафте Шерловогорского горнорудного района на примере *Polygonum angustifolium* (*Polygonaceae*) // Успехи современного естествознания. 2016. № 12-2. С. 375–379.
- Дмитриева Н.Н. Экологическая оценка Апрелковско-Пешковской золоторудной площади. Молодежная научная весна: материалы II Научно-практической конференции молодых исследователей ЗабГУ: в 3 частях. Чита, 2024. С. 138–141.
- Дьяконов К.Н., Касимов Н.С., Тикунов В.С. Современные методы географических исследований. М.: Просвещение, 1996. 207 с.
- Емельянов А.Г. Концепция геоэкологического анализа территориальных и аквальных геосистем региона // Геоэкология и природопользование. Труды XII съезда Русского географического общества. 2005. Т. 4. С. 3–7.
- Железнова О.С., Черных Н.А., Тобратов С.А. Цинк и кадмий в фитомассе древесных растений лесных экосистем: закономерности транслокации, аккумуляции и барьерных механизмов // Вестник Рос. ун-та дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2017. Т. 25. № 2. С. 253–270.
- Кажскенова Б.А., Есимова Д.Д. Влияние золотопромышленных отвальных отходов на экологическое состояние окружающей среды // Мелиорация как драйвер модернизации АПК в условиях изменения климата: материалы Международной научно-практической интернет-конференции. М., 2020. С. 181–186.
- Касимов Н.С. Экогохимия ландшафтov. М., 2013. 208 с.
- Макаров В.П. Содержание химических элементов в листьях ивы Миабэ (*Salix miyabeana* Seemen), произрастающей в районе хвостохранилища Дарасунского месторождения золота // Агрохимия. 2024. № 10. С. 83–93.
- Макаров В.П., Филенко Р.А., Михеев И.Е. и др. Элементный состав листьев бересклета повислой (*Betula pendula* Roth) в районе золоторудного месторождения Забайкалья // Агрохимия. 2024. № 4. С. 95–104.

- Михайлова Л.А., Нимаева Б.В., Смолянинова М.А. и др.* Анализ содержания мышьяка в компонентах окружающей среды Забайкалья. Профилактическая медицина – 2020. СПб., 2020. С. 72–77.
- Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве: Гигиенические нормативы.* М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 10 с.
- Подолянчик В.А., Горбачева Н.А.* Экологические проблемы в горнодобывающей промышленности // Теория и практика современной аграрной науки. 2022. С. 421–425.
- Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве: Гигиенические нормативы. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2006. 15 с.
- Птицын А.Б., Гребенщикова В.И., Замана Л.В. и др.* Подвижность химических элементов в водных и наземных экосистемах // Вестник Забайкальского гос. ун-та. 2014. № 8(111). С. 23–32.
- Сиромля Т.И., Загурская Ю.В.* Проблемы исследования процессов аккумуляции и гипераккумуляции растениями химических элементов // Журнал общей биологии. 2021. Т. 82. № 4. С. 283–296.
- Скальный А.В., Рудаков И.А.* Биоэлементы в медицине. М.: Мир, 2004. 272 с.
- Солодухина М.А., Юргенсон Г.А.* Мышьяк в ландшафтах Шерловогорского рудного района (Восточное Забайкалье). Чита, 2018. 175 с.
- Солодухина М.А.* О содержании мышьяка в некоторых лекарственных растениях Забайкальского края // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 6. С. 562.
- Солодухина М.А., Юрженсон Г.А.* Сурьма в степных почвах, техноземах и *Artemisia gmelinii* Weber ex Stechm Шерловогорского рудного района (Восточное Забайкалье) // Успехи современного естествознания. 2017. № 4. С. 114–119.
- Тимофеева С.С., Музрафаров А.М., Мусаев М.Н. и др.* Экологические риски для здоровья населения в районах золотодобычи / Эффективность применения инновационных технологий и техники в сельском и водном хозяйстве: сб. науч. тр. Международной научно-практической онлайн-конференции, посвященной 10-летию образования Бухарского филиала Ташкентского ин-та инженеров ирrigации и механизации сельского хозяйства. М., 2020. С. 393–395.
- Филатова М.Ю., Крупская Л.Т., Бубнова М.Б. и др.* Оценка экологической ситуации в границах влияния золотодобычи (для обоснования создания лесных плантаций) // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 8. С. 27–44.
- Шевцов М.Н., Головкин С.С., Махинов А.Н. и др.* Мониторинг окружающей среды в районах разработки полезных ископаемых Хабаровского края // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. 2020. № 1. С. 429–432.
- Шеховцов А.И., Белозерцева И.А.* Экологические проблемы добычи редкоземельных элементов в Юго-Восточном Забайкалье // Успехи современного естествознания. 2016. № 12. С. 222–227.
- Экспериандова Л.П., Беликов К.Н., Химченко С.В. и др.* Еще раз о пределах обнаружения и определения // Журнал аналитической химии. 2010. № 65(3). С. 229–234.
- Юргенсон Г.А. Ландшафтно-геохимические и геоэкологические проблемы исторических горнодобывающих территорий на примере Забайкалья // Горный журнал. 2020. № 5. С. 81–86.
- Юргенсон Г.А., Горбань Д.Н.* Особенности распределения висмута в почвах, техноземах и растениях Шерловогорского рудного района // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2017. № 7–1. С. 111–116.
- Chen S., Wu P., Zha X. et al.* Arsenic and heavy metals in sediments affected by typical gold mining areas in Southwest China: Accumulation, sources and ecological risks, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2023, vol. 20(2), p. 1432.
- Chen Y., Liu G., Zhou C. et al.* The influence of gold mining wastes on the migration-transformation behavior and health risks of arsenic in the surrounding soil of mined-area, *Frontiers in Earth Science*, 2023, vol. 10, p. 1068763.
- Souza Neto de H.F., Silveira Pereira da W.V., Dias Y.N. et al.* Environmental and human health risks of arsenic in gold mining areas in the eastern Amazon, *Environmental Pollution*, 2020, vol. 265, p. 114969.
- Epova E.S., Yurgenson G.A., Eremin O.V.* Experimental Simulation of Processes of Ore Leaching from Lyubov Deposit (Transbaikalian Region), *Doklady Earth Sciences*, 2019, vol. 486(2), p. 647–650, DOI: 10.1134/S1028334X19060023.
- Faria M.C.D.S., Hott R.D.C., Santos M.J.D. et al.* Arsenic in mining areas: Environmental contamination routes, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2023, vol. 20(5), p. 4291.
- Hoang A.T., Prinpreechee N., Kim K.W.* Influence of mining activities on arsenic concentration in rice in Asia: A review, *Minerals*, 2021, vol. 11(5), p. 472.
- Kabata-Pendias A.* Trace elements in soils and plants, 4th ed., Taylor & Francis Group, Boca Raton, London, New York, 2011, p. 1–64.
- Macnair M.R.* The Hyperaccumulation of Metals by Plants, *Advances in Botanical Research*, 2003, vol. 40, p. 64–106.
- Marrugo-Madrid S., Pinedo-Hernández J., Paternina-Uribe R. et al.* Health risk assessment for human exposure to mercury species and arsenic via consumption of local food in a gold mining area in Colombia, *Environmental research*, 2022, vol. 215, p. 113950.
- Rakete S., Moonga G., Wahl A.M. et al.* Biomonitoring of arsenic, cadmium and lead in two artisanal and small-scale gold mining areas in Zimbabwe, *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, vol. 29, p. 4762–4768.
- Rudnick R.L., Gao S.* Composition of the continental crust. Treatise on Geochemistry, 2003, vol. 3. The Crust. Elsevier Sci., p. 1–64.
- Wongsasuluk P., Tun A.Z., Chotpantarat S. et al.* Related health risk assessment of exposure to arsenic and some heavy metals in gold mines in Banmauk Township, Myanmar, *Scientific Reports*, 2021, vol. 11(1), p. 22843.
- Yurgenson G.A., Gorban D.N.* Bismuth in a Congested Cinquefoil (*Potentilla acervata* Soják) in Natural-Technogenic Landscapes of the Sherlova Gora Mining District, *Geochemistry International*, 2020, vol. 58(9), p. 1061–1067, DOI: 10.1134/S0016702920080108.
- Zha X., Li X., Chen S. et al.* Geochemical Process of Arsenic Source and Fate in Water Environment of Karst Gold

Mining Region, Southwestern China, *Environmental Technology & Innovation*, 2025, p. 104159.

Электронные ресурсы

Временный максимально допустимый уровень (МДУ) содержания некоторых химических элементов и госсипола в кормах для сельскохозяйственных животных и кормовых добавках. URL: <https://fsvp.gov.ru/sites/default/files/nra-files/1987/08/07/mdu.pdf> (дата обращения 25.11.2024).

ГОСТ 17.4.3.01-2017 Охрана природы (ССОП). Почвы. Общие требования к отбору проб. URL: https://marsbbz.ru/wp-content/uploads/2021/05/gost-17.4.3.01-2017-ohrana-prirody-ssop.-pochvy.-obshchie-trebovaniya-k-otboru-probs-popravkoj_tekst.pdf (дата обращения 25.11.2024).

ОФС.1.1.0005.15 Отбор проб лекарственного растительного сырья и лекарственных растительных препаратов. URL: <https://pharmacopoeia.ru/ofs-1-1-0005-15-otbor-prob-lekarstvennogo-rastitelnogo-syrya-i-lekarstvennyh-rastitelnyh-preparatov/> (дата обращения 25.11.2024).

i-lekarstvennyh-rastitelnyh-preparatov/ (дата обращения 25.11.2024).

ОФС.1.5.3.0009.15 Определение содержания тяжелых металлов и мышьяка в лекарственном растительном сырье и лекарственных растительных препаратах. URL: <https://pharmacopoeia.ru/ofs-1-5-3-0009-15-opredelenie-soderzhaniya-tyazhelyh-metallov-i-myshyaka-v-lekarstvennom-rastitelnom-syre-i-lekarstvennyh-rastitelnyh-preparatah/> (дата обращения 25.11.2024).

ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98 Количествохимический анализ почв. М.: 2005, 28 с. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/19e/4293777593.pdf?ysclid=m3phm09rf3883479901> (дата обращения 25.11.2024).

СанПиН 2.3.2.1078-01 Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. URL: <https://www.madou47.ru/wp-content/uploads/2020/10/СанПиН-2.3.2.1078-01-Гигиенические-требования.pdf> (дата обращения 25.11.2024).

Поступила в редакцию 18.01.2025

После доработки 23.08.2025

Принята к публикации 17.10.2025

ACCUMULATION OF TOXIC CHEMICAL ELEMENTS BY PLANTS IN THE AREA OF THE LYUBAVINSKY GOLD DEPOSIT (TRANS-BAIKAL TERRITORY)

V.P. Makarov¹, G.A. Yurgenson²

^{1,2} Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS

¹ Laboratory of Geography and Regional Nature Management

² Laboratory of Geochemistry and Ore Genesis

¹ Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Biology; e-mail: vm2853@mail.ru

² Chief Scientific Researcher, Professor, D.Sc. in Geology and Mineralogy; e-mail: yurgga@mail.ru

Gold deposits in Transbaikalia are characterized by an abnormally high content of a number of elements, especially As, which leads to soil and plant pollution and affects the health of people living there. Studies conducted in the area of the Lyubavinsky gold deposit were aimed to determine the concentrations of a number of toxic elements (As, Ba, Be, Bi, Cd, Hg, Pb, Sb and Tl) in soil and plants. The test areas were located at a tailings dump and within natural plant communities. To determine the concentrations of trace elements in soil and plant samples, the procedures from "Methodology for measuring the metal content in solid objects by inductively coupled plasma spectrometry" (1998) were applied. The gross content of As, Bi, Hg, and Sb in soils of the tailings dump and the surrounding area was found to be abnormally high relative to their clarks of the Earth's crust (Rudnick and Gao, 2014). The hygienic standard of As was exceeded in the soil at all test areas, that of Hg and Sb – in the soil of the tailings dump. Herbaceous plants in the area of the tailing dump (*Thermopsis lanceolata*, *Artemisia gmelinii*) were characterized by a significant excess of the established standards for medicinal raw materials in terms of As content in the underground and aboveground parts of plants. Outside the tailing dump As concentration was slightly higher than the standards, with the exception of *Phlojodicarpus sibiricus*, in which the As concentration in the underground part significantly exceeded the maximum permissible concentration. The concentration of the studied elements in the aboveground and underground parts of the plants depends on the biological characteristics of plants and the environmental parameters. *P. sibiricus* and *A. gmelinii* were characterized by a relatively high concentration of elements in the underground part of the plant, while *T. lanceolata* showed a higher concentration in the aboveground part, especially the inflorescences. The available forms of Cd, Sb, Ba, Hg, Tl, and Bi were most actively extracted by plants. It is not recommended to collect and use medicinal and forage plants near the Lyubavinsky deposit without monitoring the content of toxic elements in them.

Keywords: gold deposits, Transbaikalia, soils, flora, biogeochemical mobility, translocation

REFERENCES

- Chen S., Wu P., Zha X. et al. Arsenic and heavy metals in sediments affected by typical gold mining areas in Southwest China: Accumulation, sources and ecological risks, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2023, vol. 20(2), p. 1432.
- Chen Y., Liu G., Zhou C. et al. The influence of gold mining wastes on the migration-transformation behavior and health risks of arsenic in the surrounding soil of mined-area, *Frontiers in Earth Science*, 2023, vol. 10, p. 1068763.
- Souza Neto de H.F., Silveira Pereira da W.V., Dias Y.N. et al. Environmental and human health risks of arsenic in gold mining areas in the eastern Amazon, *Environmental Pollution*, 2020, vol. 265, p. 114969.
- Dmitrieva N.N. [Environmental assessment of the Aprelkovsko-Peskovsky gold ore area], Molodezhnaya nauchnaya vesna (Chita, 2024), Materialy LI Nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh issledovatelei ZabGU, V 3 chastyakh [Youth Scientific Spring (Chita, 2024), Proceedings of the Scientific and Practical Conference of Young issledovatelei ZabGU, In 3 parts], Chita, 2024, p. 138–141. (In Russian)
- D'yakonov K.N., Kasimov N.S., Tikunov V.S. Sovremennye metody geograficheskikh issledovanii [Modern methods of geographical research], Moscow, Prosvetshchenie Publ., 1996, 207 p. (In Russian)
- Eksperiandova L.P., Belikov K.N., Khimchenko S.V. et al. Eshche raz o predelakh obnaruzheniya i opredeleniya [Once again about the limits of detection and definition], *Zhurnal analiticheskoi khimii*, 2010, no. 65(3), p. 229–234. (In Russian)
- Emel'yanov A.G. Kontsepsiya geoekologicheskogo analiza territorial'nykh i akval'nykh geosistem regiona, [The concept of geoecological analysis of the territorial and aquatic geosystems of the region], *Geoekologiya i prirodopol'zovanie*, Tr. XII s"ezda Russkogo geograficheskogo obshchestva, 2005, vol. 4, p. 3–7. (In Russian)
- Epova E.S., Yurgenson G.A., Eremin O.V. Eksperimental'noe modelirovaniye protsessov vyshchelachivaniya rud mestorozhdeniya Lyubov' (Zabaikal'e) [Experimental modeling of ore leaching processes at the Lyubov deposit (Transbaikalia)], *Doklady Akademii nauk*, 2019, vol. 486, no. 4, p. 469–474. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5624864469-474>. (In Russian)
- Faria M. C. D. S., Hott, R. D. C., Santos, M. J. D. et al. Arsenic in mining areas: Environmental contamination routes. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2023, vol. 20(5), p. 4291.
- Faria M.C.D.S., Hott R.D.C., Santos M.J.D. et al. Otsenka ekologicheskoi situatsii v granitsakh vliyaniya zolotodobychi (dlya obosnovaniya sozdaniya lesnykh plantatsii) [Assessment of the environmental situation within the boundaries of the influence of gold mining (to justify the creation of forest plantations)], *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tehnicheskii zhurnal)*, 2023, no. 8, p. 27–44. (In Russian)
- Gilimshina E.V., Zileev I.I., Minnigazimov N.S. [The impact of the Semenovskaya gold extraction factory in the Baymak district of the Republic of Bashkortostan on the soil environment] *Ekologiya i prirodopol'zovanie* [Ecology and Nature Management], Sbornik statei po materialam II Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Krasnodar, 2022, p. 50–54. (In Russian)
- Gorban' D.N., Yurgenson G.A. Svinets v sisteme pochva-rasenie v landshafta Sherlovogorskogo gornorudnogo raiona na primere *Polygonum angustifolium* (*Polygonaceae*) [Lead in the soil-plant system in the landscape of the Sherlovogorsky mining district on the example of *Polygonum angustifolium* (*Polygonaceae*)], *Uspekhi sovremennoego estestvoznaniya*, 2016, no. 12–2, p. 375–379. (In Russian)
- Hoang A.T., Prinprecha N., Kim K.W. Influence of mining activities on arsenic concentration in rice in asia: A review, *Minerals*, 2021, vol. 11(5), p. 472.
- Kabata-Pendias A. *Trace elements in soils and plants*, 4th ed., Taylor & Francis Group, Boca Raton, London, New York, 2011, p. 1–64.
- Kasimov N.S. *Ekogeokhimiya landshaftov* [Ecogeochimistry of landscapes], Moscow, 2013, 208 p. (In Russian)
- Kazhkenova B.A., Esimova D.D. [The impact of gold mining landfills on the ecological state of the environment], *Melioratsiya kak driver modernizatsii APK v usloviyah izmeneniya klimata* [Amelioration as a driver of agro-industrial complex modernization under climate change], Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi internet-konferentsii, 2020, p. 181–186. (In Russian)
- Macnair M.R. The Hyperaccumulation of Metals by Plants, *Advances in Botanical Research*, 2003, vol. 40, p. 64–106.
- Makarov V.P. Soderzhanie khimicheskikh elementov v list'yakh ivy Miabe (*Salix miyabeana* Seemen), proizrastayushchei v raione khvostokhranilishcha Darasunskogo mestorozhdeniya zolota [The content of chemical elements in the leaves of the Miyabe willow (*Salix miyabeana* Seemen), growing in the area of the tailings dam of the Darasun gold deposit], *Agrokhimiya*, 2024, no. 10, p. 83–93. (In Russian)
- Makarov V.P., Filenko R.A., Mikheev I.E. et al. Elementnyi sostav list'ev berezy povisloj (*Betula pendula* Roth) v raione zolotorudnogo mestorozhdeniya Zabaikal'ya [The elemental composition of the leaves of the silver birch (*Betula pendula* Roth) in the area of a gold deposit in Transbaikalia], *Agrokhimiya*, 2024, no. 4, p. 95–104. (In Russian)
- Marrugo-Madrid S., Pinedo-Hernández J., Paternina-Uribe R. et al. Health risk assessment for human exposure to mercury species and arsenic via consumption of local food in a gold mining area in Colombia, *Environmental research*, 2022, vol. 215, p. 113950.
- Mikhailova L.A., Nimaeva B.V., Smolyaninova M.A. et al. [Analysis of arsenic content in environmental components of Transbaikalia], *Profilakticheskaya meditsina – 2020* [Preventive medicine – 2020], Sbornik nauchnykh trudov Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, 2020, Saint Petersburg, p. 72–77. (In Russian)
- Orientirovchno dopustimye kontsentratsii (ODK) khimicheskikh veshchestv v pochve: Gigienicheskie normativy [Approximate permissible concentrations (ODCs) of chemicals in the soil Hygienic standards], Moscow, Federal'nyi tsentr gigienny i epidemiologii Rospotrebnadzora Publ., 2009, 10 p. (In Russian)
- Podolyanchik V.A., Gorbacheva N.A. [Environmental problems in mining industry], *Teoriya i praktika sovremennoi*

- agrarnoi nauki* [Theory and practices of the modern agricultural science], 2022, p. 421–425. (In Russian)
- Predel'no dopustimye kontsentratsii (PDK) khimicheskikh veshchestv v pochve: Gigenicheskie normativy* [Maximum permissible concentrations (MPC) of chemicals in the soil: Hygienic standards], Moscow, Federal'nyi tsentr gigieny i epidemiologii Rospotrebnadzora Publ., 2006, 15 p. (In Russian)
- Ptitsyn A.B., Grebenshikova V.I., Zamana L.V. et al. *Podvizhnost' himicheskikh elementov v vodnyh i nazemnyh jekosistemah* [Mobility of chemical elements in aquatic and terrestrial ecosystems], *Vestnik Zabajkal'skogo gosudarstvennogo universiteta*, 2014, no. 8(111), p. 23–32. (In Russian)
- Rakete S., Moonga G., Wahl A.M. et al. Biomonitoring of arsenic, cadmium and lead in two artisanal and small-scale gold mining areas in Zimbabwe, *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, vol. 29, p. 4762–4768.
- Rudnick R.L., Gao S. Composition of the continental crust. Treatise on Geochemistry, 2003, vol. 3, *The Crust. Elsevier Sci.*, p. 1–64.
- Shekhovtsov A.I., Belozertseva I.A. *Ekologicheskie problemy dobychi redkozemel'nykh elementov v Yugo-Vostochnom Zabaikal'e* [Environmental problems of extraction of rare earth elements in Southeastern Transbaikalia], *Uspekhi sovremennoego estestvoznaniya*, 2016, no. 12, p. 222–227. (In Russian)
- Shevtsov M.N., Golovkin S.S., Makhinov A.N. et al. Monitoring okruzhayushchei sredy v raionakh razrabotki poleznykh iskopaemykh Khabarovskogo kraya [Environmental monitoring in the mining areas of the Khabarovsk Territory], *Dal'nii Vostok: problemy razvitiya arkhitekturno-stroitel'nogo kompleksa*, 2020, no. 1, p. 429–432.
- Siromlya T.I., Zagurskaya Yu.V. Problemy issledovaniya protsessov akkumulyatsii i giperakkumulyatsii rasteniyami khimicheskikh elementov [Problems of studying the processes of accumulation and hyperaccumulation of chemical elements by plants], *Zhurnal obshchei biologii*, 2021, vol. 82, no. 4, p. 283–296. (In Russian)
- Skal'nyi A.V., Rudakov I.A. *Bioelementy v meditsine* [Bio-elements in medicine], Moscow, Mir Publ., 2004, 272 p. (In Russian)
- Solodukhina M.A., Yurgenson G.A. *Mysh'yak v landshaftakh Sherlovogorskogo rudnogo raiona (Vostochnoe Zabaikal'e)* [Arsenic in the landscapes of the Sherlovogorsky ore region (Eastern Transbaikalia)], Chita, 2018, 175 p. (In Russian)
- Solodukhina M.A. O soderzhanii mysh'yaka v nekotorykh lekarstvennykh rasteniyakh Zabaikal'skogo kraya [About the arsenic content in some medicinal plants of the Trans-Baikal Territory], *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2012, no. 6, p. 562. (In Russian)
- Solodukhina M.A., Yurgenson G.A. Sur'ma v stepnykh pochvakh, tekhnozemakh i *Artemisia gmelinii* Weber ex Stechm Sherlovogorskogo rudnogo raiona (Vostochnoe Zabaikal'e) [Antimony in steppe soils, technozems and *Artemisia gmelinii* Weber ex Stechm of the Sherlovogorsky ore region (Eastern Transbaikalia)], *Uspekhi sovremennoego estestvoznaniya*, 2017, no. 4, p. 114–119. (In Russian)
- Timofeeva S.S., Muzafarov A.M., Musaev M.N. et al. [Environmental risks to public health in gold mining areas], *Effektivnost' primeneniya innovatsionnykh tekhnologii i tekhniki v sel'skom i vodnom khozyaistve*. [Efficient application of innovative technologies and mechanisms in agriculture and water management], *Sbornik nauchnykh trudov mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi onlain konferentsii, posvyashchennoi 10-letiyu obrazovaniya Bukharskogo filiala Tashkentskogo instituta inzhenerov irrigatsii i mekhanizatsii sel'skogo khozyaistva*, 2020, p. 393–395. (In Russian)
- Vadyunina A.F., Korchagina Z.A. *Metody opredeleniya fizicheskikh svoistv pochv i gruntov* [Methods for determining the physical properties of soils and soils], Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1961, 345 p. (In Russian)
- Wongsasuluk P., Tun A. Z., Chotpantarat S. et al. Related health risk assessment of exposure to arsenic and some heavy metals in gold mines in Banmauk Township, Myanmar, *Scientific Reports*, 2021, vol. 11(1), p. 22843.
- Yurgenson G.A. Landshaftno-geokhimicheskie i geoeticheskie problemy istoricheskikh gornopromyshlennykh territorii na primere Zabaikal'ya [Landscape-geochemical and genetic problems of historical mining territories on the example of Transbaikalia], *Gornyi zhurnal*, 2020, no. 5, p. 81–86. (In Russian)
- Yurgenson G.A., Gorban' D.N. Vismut v lapchatke skuchenoi (*Potentilla acervata* Soják) v prirodno-tehnogennom landshafte Sherlovogorskogo gornorudnogo raiona [Bismuth in the crowded lapchatka (*Potentilla acervata* Soják) in the natural and man-made landscape of the Sherlovogorsky mining district], *Geokhimiya*, 2020, vol. 65, no. 9, p. 922–929. (In Russian)
- Yurgenson G.A., Gorban' D.N. Bismuth in a Congested Cinquefoil (*Potentilla acervata* Soják) in Natural-Technogenic Landscapes of the Sherlova Gora Mining District, *Geochemistry International*, 2020, vol. 58(9), p. 1061–1067, DOI: 10.1134/S0016702920080108.
- Yurgenson G.A., Gorban' D.N. Osobennosti raspredeleniya vismuta v pochvakh, tekhnozemakh i rasteniyakh Sherlovogorskogo rudnogo raiona [Features of bismuth distribution in soils, technozems, and plants of the Sherlovogorsky ore region], *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovanii*, 2017, no. 7(1), p. 111–116. (In Russian)
- Zha X., Li X., Chen S. et al. Geochemical Process of Arsenic Source and Fate in Water Environment of Karst Gold Mining Region, Southwestern China, *Environmental Technology & Innovation*, 2025, p. 104159.
- Zheleznova O.S., Cherny N.A., Tobratov S.A. Cink i kadmijs v fitomasse drevesnyh rastenij lesnyh jekosistem: zakonomernosti translokacii, akkumulacii i bar'ernyh mechanizmov [Zinc and cadmium in the phytomass of woody plants of forest ecosystems: patterns of translocation, accumulation, and barrier mechanisms], *Vestnik Ros. Un-ta druzhby narodov. Serija: Jekologija i bezopasnost' zhiznedejatel'nosti*, 2017, vol. 25, no. 2, p. 253–270. (In Russian)

Web sources

- GOST 17.4.3.01-2017 Okhrana prirody (SSOP). Pochvy. Obschchie trebovaniya k otboru prob, URL: https://marsbbz.ru/wp-content/uploads/2021/05/gost-17.4.3.01-2017-ohrana-prirody-ssop.-pochvy.-obshchie-trebovaniya-k-otboru-prob-s-popravkoj_.pdf (data access 25.11.2024).
- OFС.1.1.0005.15 Otbor prob lekarstvennogo rastitel'nogo syr'ya i lekarstvennykh rastitel'nykh preparatov, URL: <https://pharmacopoeia.ru/ofc-1-1-0005-15-otbor-problekarstvennogo-rastitelnogo-syrya-i-lekarstvennyh-rastitelnyh-preparatov/> (data access 25.11.2024).

ОFS.1.5.3.0009.15 Opredelenie soderzhaniya tyazhelykh metallov i mysh'yaka v lekarstvennom rastitel'nom syr'e i lekarstvennykh rastitel'nykh preparatakh, URL: <https://pharmacopoeia.ru/ofc-1-5-3-0009-15-opredelenie-soderzhaniya-tyazhelyh-metallov-i-myshyaka-v-lekarstvennom-rastitelnom-syre-i-lekarstvennyh-rastitelnyh-preparatah/> (data access 25.11.2024).

PND F 16.1:2.3:3.11-98 Kolichestvennyi khimicheskii analiz pochv, Moscow, 2005, 28 s., URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/19e/4293777593.pdf?ysclid=m3phm09rf3883479901> (data access 25.11.2024).

SanPiN 2.3.2.1078-01 Gigienicheskie trebovaniya bezopasnosti i pishchevoi tsennosti pishchevykh produktov, URL: <https://www.madou47.ru/wp-content/uploads/2020/10/СанПиН-2.3.2.1078-01-Гигиенические-требования.pdf> (data access 25.11.2024).

Vremennyi maksimal'no dopustimyi uroven' (MDU) soderzhaniya nekotorykh khimicheskikh elementov i gossipola v kormakh dlya sel'skokhozyaistvennykh zhivotnykh kormovykh dobavkakh, URL: <https://fsvp.gov.ru/sites/default/files/npa-files/1987/08/07/mdu.pdf> (data access 25.11.2024).

Received 18.01.2025

Revised 23.08.2025

Accepted 17.10.2025