

УДК 581.192.16:632.122.1(571.55)

СОДЕРЖАНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЛИСТЬЯХ ИВЫ МИЯБЕ (*Salix miyabeana* SEEMEN), ПРОИЗРАСТАЮЩЕЙ В РАЙОНЕ ХВОСТОХРАНИЛИЩА ДАРАСУНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЗОЛОТА

© 2024 г. В. П. Макаров*

Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН

672014 Чита, ул. Недорезова, 16а, Россия

*E-mail: vm2853@mail.ru

В районе хвостохранилища Дарасунского месторождения золота в Забайкальском крае исследовали содержание 47 химических элементов в листьях ивы Миябе (*Salix miyabeana*), а также их валовое содержание в почве в местах произрастания растений для получения информации о накоплении элементов растением на загрязненных почвах и перспективе использования ивы Миябе в качестве растения-фитоэкстрактора. Анализ растительных и почвенных образцов проводили на масс-спектрофотометре ICP-MS Elan 9000 (Канада). Применяли методику измерений содержания металлов в твердых объектах методом ИСП-МС. Установлено, что валовое содержание в почве Ag, Pb, Cd, Cu, Zn, W, Hg, В и особенно Те, Bi, As и Sb находилось выше кларка земной коры в 2–840 раз. Больше в 1.3–7.0 раз предельно допустимых концентраций (ПДК) и ориентировочно допустимых концентраций (ОДК) химических веществ находилось валовое содержание в почве As, Zn, Pb, Sb и Cd, а содержание мышьяка превышало установленный предел в 240 раз. Концентрация в листьях ивы Миябе К, Sr, Ti, P, Zn, Ag, As и Cd превышала кларк наземных растений в 1.5–3.0 раза. Обнаружена корреляционная зависимость концентрации Cd, Zn, В, Mn, Ве, Ga и V в листьях ивы Миябе с валовым содержанием этих элементов в почве мест произрастания растения. Элементами-накопителями в растении являлись Se, P, Cd, Zn, В и К. Коэффициент биологического накопления Se составлял от 1 до 40, Cd – 1.1–5.8, Zn – 0.5–2.6. Ива Миябе является перспективным растением для извлечения из загрязненных почв кадмия и цинка.

Ключевые слова: ива *Salix miyabeana*, химические элементы, хвостохранилище Дарасунского месторождения, Забайкальский край.

DOI: 10.31857/S0002188124100094, **EDN:** ANLIZD

ВВЕДЕНИЕ

Дарасунский рудник – горнорудное предприятие по добыче и обогащению руд Дарасунского, Талатуйского и Теремкинского месторождений золота в районе поселка Вершино-Дарасунский Тунгооченского р-на, Забайкальского края.

Для складирования техногенных отходов предприятием с 1927 г. построено несколько каскадов хвостохранилища, которое располагается в 2 км южнее поселка Вершино-Дарасунский, на правом борту долины р. Дарасун. Площадь хвостохранилища ≈ 350 тыс. м². В хвостохранилище сконцентрирована значительная масса хвостов флотации, содержащих золото, серебро, медь, мышьяк. Хвосты содержат, кроме сульфидов, сульфатов, оксидов и гидроксидов железа, свинца, цинка и меди, большое количество различных цианидов: As(CN)₃, S(CN)₂, CuCN, AgCN,

цианидные ацидокомплексы, гомолигандные и гетеролигандные комплексы, которые не растворяются в воде и дают устойчивые соединения [1].

В растворенной части поверхностных вод р. Дарасун ниже по течению после складированных отходов и фабрики обнаружен широкий спектр химических элементов, концентрации которых превышают фоновые и кларковые содержания: Cu, Zn, Cd, Pb, Au, Ag, Tl, Be [2]. Разработка Дарасунского золоторудного месторождения привела к формированию геохимических аномалий, характеризующихся высоким содержанием мышьяка [3].

Приоритетными загрязнителями почв являются свинец, кадмий, медь, цинк, никель, мышьяк. В качестве меры, позволившей улучшить качество среды обитания, рассматривается вторичная переработка сформированных техногенных месторождений с последующей рекультивацией; реабилитация зон

техногенеза путем озеленения загрязненных территорий, завоза экологически чистых грунтов [4].

Одним из методов очистки почв, загрязненных тяжелыми металлами, может быть фиторемедиация. Этот метод заключается в выращивании в течение определенного периода времени на загрязненных почвах специально подобранных видов растений, способных извлекать из почвы тяжелые металлы корневой системой и накапливать их в надземной части, которую впоследствии утилизируют, а процесс может быть повторен до достижения необходимого эффекта.

Известно, что растения могут использоваться для преобразования различных загрязняющих веществ в менее опасные летучие вещества, которые затем выбрасываются в атмосферу. Эта концепция может быть использована для удаления органических загрязнителей, а также тяжелых металлов, включая Se, Hg и As [5]. Согласно исследованиям, *Astragalus racemosus* может превращать Se в диметилдиселенид путем фитоволатилизации, тогда как *Arabidopsis thaliana* может превращать Hg^{2+} в Hg, следовательно повышая летучесть Hg [6]. Наблюдали способность *Pteris vittata* в метаболизме мышьяка превращать его в летучие формы. При фитоволатилизации, сборе урожая или утилизации загрязняющих веществ тяжелые металлы (ТМ) собирались из почвы и распространялись в виде газообразных соединений [7].

В районе исследования, вдоль русла р. Дарасун и на хвостохранилище произрастает на лугах и в составе прирусловых сообществ ива Миябе (*Salix miyabeana* Seemen). Это высокий многоствольный кустарник или небольшое деревце, 5–6 м высотой, с раскидистой кроной. Распространен в Восточной Сибири, Российском Дальнем Востоке, Японии на островах Хоккайдо и Хонсю, Северо-Западной Корее, Северном Китае, рассеяно в Северной Монголии. Встречается по берегам рек и ручьев, в речных долинах, большей частью на аллювиальных почвах, образует заросли. В Сибири произрастает по поймам и берегам рек, на лугах, является эдификатором или соэдификатором пойменных зарослей [8].

Результаты ряда исследований показали эффективное поглощение и удаление растениями ивы Миябе Cd и Zn с загрязненных участков [9–11].

Забайкальский край характеризуется значительным развитием горнодобывающей промышленности, в результате работы которой многие территории нуждаются в реабилитации. В том числе освобождении почвы от высокого содержания токсичных элементов. Исследование ивы Миябе на способность к поглощению токсичных элементов на территориях горнодобывающей промышленности ранее не проводили.

Значительное представительство и успешный рост ивы Миябе на техногенных грунтах, загрязненных ТМ, свидетельствует о ее хорошем жизненном

состоянии и адаптации к экстремальным условиям. Важно исследовать способность растения поглощать из почвы токсичные элементы и перспективу использования ивы для извлечения из грунта ряда токсичных элементов. Цель работы — выяснение способности ивы Миябе к накоплению в надземной части токсичных химических элементов на техногенном грунте в районе хвостохранилища.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проведено в первой декаде июля 2023 г. в районе пос. Вершино-Дарасун. Пробные площади для отбора проб почвы и листьев ивы Миябе расположены на территории хвостохранилища и берегам р. Дарасун, к которым примыкает хвостохранилище (рис. 1).

Отборы почвы и листьев растений были проведены на 7-ми пробных площадях. Абсолютная высота расположения площадей — 740–783 м. Растительный покров в верхнем течении реки — это сохранившиеся, но измененные антропогенной нагрузкой естественные растительные сообщества вблизи поселка Вершино-Дарасунский, луг закустаренный и прирусловое древесно-кустарниковое сообщество. Ниже по течению р. Дарасун и на хвостохранилище растительные сообщества образовались на техногенном грунте (табл. 1).

Отбор почв проводили на глубине 20 см вблизи расположения корневой системы растений в нескольких точках пробной площади. Затем образцы почвы-грунта объединяли в общую пробу для последующего анализа содержания химических элементов и помещали в полиэтиленовые пакеты. На пакетах делали пометки, соответствующие месту отбора проб. На пробных площадях, с 3–5-ти растений ивы Миябе отбирали листья с различных участков ветвей и кроны и помещали смешанную пробу листьев в тканевые мешки. В полевых условиях мешки подсушивали на открытом месте в полутени.

В лабораторных условиях образцы почвы-грунта подсушивали до воздушно-сухого состояния, измельчали, просеивали на почвенном сите с ячейкой 1 мм, затем измельчали с помощью ступки до порошкообразного состояния и отправляли для химического анализа в специализированную лабораторию. Листья растений после высушивания до воздушно-сухого состояния измельчали с помощью кофемолки до порошкообразного состояния и также отправляли в химическую лабораторию.

Анализ почвенных и растительных образцов проводили в лаборатории физико-химических методов исследования Института тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина. Для анализа почвенных и растительных проб использовали масс-спектрофотометр ICP-MS Elan 9000 (Канада). Методика анализа описана в работе [12].

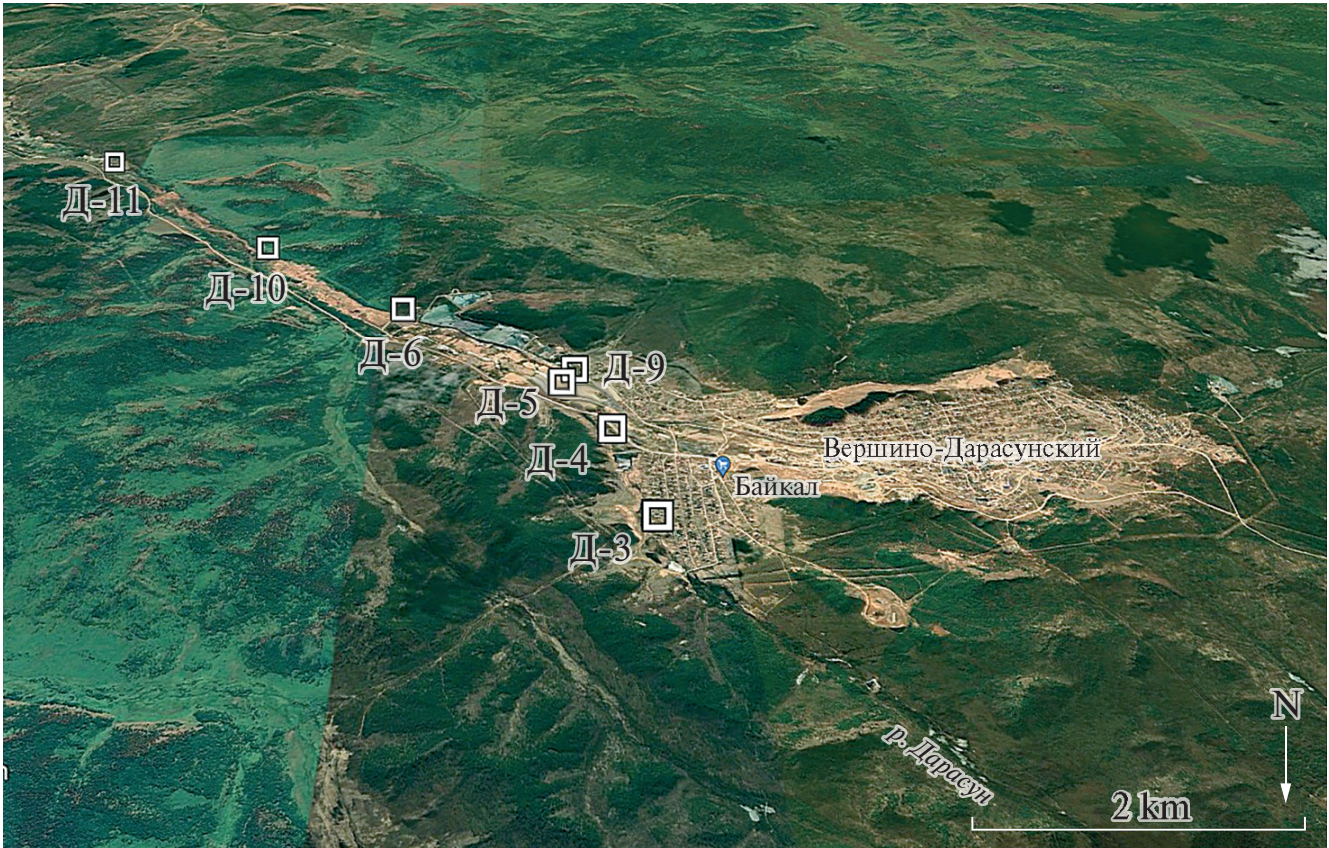


Рис. 1. Схема расположения пробных площадей.
Таблица 1. Характеристика пробных площадей

Номер площади	Координаты, °	Абсолютная высота	Грануло- метрический состав почвы	Растительное сообщество	Проективное покрытие ивы Мия- бе, %	Средняя высота ивы Миабэ, м
3	52.374623 115.568150	783	Легкий суглинок	Луг закустаренный	<5	2.0
4	52.36383 115.57241	766	Супесь	Прирусловое древесно-ку- старниковое	5	5.0
5	52.35693 115.57851	763	Супесь	Рудеральное сообщество	<5	5.0
6	52.34418 115.60142	757	Супесь	Рудеральное сообщество	10	1.5
9	52.35509 115.57670	740	Тяжелый суглинок	Рудеральное сообщество	10	2.5
10	52.33171 115.62442	703	Средний суглинок	Рудеральное сообщество	10	4.0
11	52.31026 115.65759	688	Супесь	Рудеральное сообщество	5	3.0

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Содержание химических элементов в почве. Исследовано содержание в почве 47 химических элементов. В порядке убывания содержания в почве

элементы представлены в табл. 2. Изменчивость содержания в почве большинства элементов была меньше 50%. Большой вариабельностью содержания в почве ($CV, \% > 100$) отличались в порядке убывания следующие элементы: Cu, Bi, As, Pb, Sb и Hg.

Таблица 2. Валовое содержание химических элементов в почве, мг/кг

Элемент	Среднее на нарушенных площадах, $n = 8$	Стандартная ошибка	Min–max	CV , %	Кларк земной коры [13]	Отношение среднего содержания элемента в почве на нарушенных площадах к кларку земной коры, %
Al	65 138	2 640	56 496–6312	11	80 500	81
Fe	36 984	2 538	25 956–5498	19	46 500	80
K	20 429	645	17 977–3620	9	25 000	82
Na	17 818	1860	10 226–5530	30	25 000	71
Ca	10 624	728	8420–14 206	19	29 600	36
Mg	7575	871	3112–10 991	33	18 700	41
Ti	3258	348	1640–5004	30	4500	72
Mn	718	57	466–914	23	1000	72
P	648	77	408–1 066	34	930	70
Ba	628	50	534–958	22	650	97
As*	478	225	17.8–1 836	133	1.7	28 129
Sr	303	34	214–466	32	340	89
Zn*	148	29	55.7–304	56	83	178
Cu*	144	78	1.5–660	154	47	306
Pb*	96.2	37.2	18.4–330.6	109	16	601
V	77.2	4.0	55.3–90.0	15	90	86
Rb	60.6	4.1	42.6–75.7	19	150	40
Ce	50.8	2.9	39.1–61.8	16	70	73
Cr	32.1	3.0	18.3–43.9	26	83	39
Sb*	30.1	11.6	1.3–78.8	109	0.5	6020
Zr	25.3	3.2	9.1–37.2	36	170	15
La	24.4	1.7	16.2–29.8	19	29	84
Li	21.0	2.7	11.8–34.2	36	32	66
Ga	17.3	0.4	15.8–19.4	6	19	91
Ni	15.1	2.8	1.5–29.4	52	58	26
Y	13.6	1.1	6.2–15.5	23	20	68
Co	12.4	1.4	5.9–19.0	33	18	69
B	12.1	3.4	4.2–30.1	79	12	101
Sc	8.0	0.9	2.3–10.6	33	10	80
Nb	6.1	0.5	4.2–8.2	23	20	31
Pr	6.0	0.4	3.9–7.2	18	9	67
Th	5.3	0.8	1.6–7.8	44	13	41
Cs	3.3	0.5	1.1–4.9	41	3.7	89
Bi*	3.1	1.5	0.2–12.3	137	0.009	34 444
W*	2.3	0.7	0.4–6.4	87	1.3	177
Sn	1.8	0.2	0.9–2.3	27	2.5	72
U	1.7	0.3	0.5–3.5	55	2.5	68
Be	1.5	0.1	1.2–1.8	12	3.8	39

Таблица 2. Окончание.

Элемент	Среднее на нарушенных площадях, $n = 8$	Стандартная ошибка	Min–max	CV, %	Кларк земной коры [13]	Отношение среднего содержания элемента в почве на нарушенных площадях к кларку земной коры, %
Ge	1.2	0.0	1.0–1.3	9	1.4	86
Mo	1.1	0.2	0.2–2.4	61	1.1	100
Te*	0.84	0.29	0.03–2.11	96	0.001	84 000
Ag*	0.7	0.2	0.3–2.0	78	0.07	1000
Cd*	0.63	0.12	0.24–1.17	56	0.13	485
Tl	0.49	0.08	0.22–0.78	44	1.0	49
Ta	0.46	0.04	0.34–0.73	27	2.5	18
Hg*	0.13	0.05	0.03–0.42	106	0.083	157
Se	0.001	0.00	0.001–0.001	0	0.05	2

* Элементы, содержание которых на нарушенных площадях значительно превышает кларк земной коры.

По отношению к кларку земной коры исследованные элементы условно разделили на 3 группы: содержание в почве до 50% от кларка, содержание от 50 до 100% и больше 100%. К первой группе относятся в порядке убывания: Tl, Th, Mg, Rb, Cr, Be, Ca, Nb, Ni, Tl, Zr и Se. Ко 2-й группе в том же порядке относятся: Mo, Ba, Ga, Sr, Cs, V, Ge, La, K, Al, Fe, Sc, Ce, Ti, Mn, Sn, Na, P, Co, Y, U, Pr и Li. В последнюю группу вошли Te, Bi, As, Sb, Ag, Pb, Cd, Cu, Zn, W, Hg и B.

Валовое содержание в почве As, Zn, Pb, Sb и Cd было больше в 1.3–7.0 раз предельно допустимых концентраций (ПДК) и ориентировочно допустимых концентраций (ОДК) химических веществ в почве. Содержание мышьяка превышало установленный предел в 239 раз [14].

Таким образом, самым низким было содержание в почве селена, а наиболее высоким – алюминия. Более других элементов превышало кларк земной коры содержание 3-х элементов – Te, Bi и As. Значительно меньше кларка было содержание в почве Tl, Zr и Se.

В табл. 3 представлены статистически значимые коэффициенты корреляции содержаний в почве элементов из группы превышающей кларк земной коры.

Отрицательная корреляционная связь выявлена между содержанием в почве алюминия, натрия и стронция с другими элементами, представленными в табл. 3. Наибольшее число связей образовали с элементами цинк, сурьма и свинец.

Содержание химических элементов в листьях ивы Миябе. Среднее содержание химических элементов

в листьях ивы Миябе в порядке убывания представлено в табл. 4.

Из макроэлементов отмечено максимальное содержание калия, минимальное – натрия. Из числа микроэлементов высокой концентрацией в листьях растений отличался цинк. Обнаружено минимальное накопление теллура, таллия, тантала и германия в листьях ивы Миябе.

Варьирование содержания в листьях большинства представленных в таблице элементов не превышало 100%. Однако изменчивость содержания таких элементов, как Ag, Bi, Nb, Th и Sn, была значительно больше этой величины.

Содержание большинства элементов было меньше 50% среднего содержания в наземных растениях. Содержание было от 50 до 100% от кларка Ba, Fe, La, Ni, Li, Sc, Sb и Co. Значительно превышало кларк наземных растений, в 1.5–3.0 раза, содержание K, Sr, Ti, P, Zn, Ag, As и Cd в листья ивы Миябе.

Получена статистически достоверная корреляционная зависимость содержания ряда элементов в листьях ивы Миябе с содержанием этих элементов в почве мест произрастания растений. В число таких элементов входят Cd, Zn, B, Mn, Be, Ga и V (табл. 5).

Несмотря на высокое содержание в почве Cu, Hg, Pb и Sb, накопление их в листьях ивы Миябе не превышало средних показателей для наземных растений. Это свидетельствовало о барьерных функциях ивы по отношению к этим элементам. И, напротив, высокое содержание в почве Cd, As и Zn отразилось на транслокации этих элементов в листья ивы. В то

Таблица 3. Корреляция между содержаниями элементов в почве (коэффициент корреляции Пирсона)

Элемент	Al	Fe	Na	Mg	P	Mn	As*	Zn*	Pb*	Sr	Cu	Sb*	Cr
As*	−0.79		−0.82		0.85	0.81							
Zn*	−0.85	0.72	−0.92		0.84	0.88	0.96						
Pb*	−0.75	0.67	−0.80		0.89	0.77	0.99	0.95					
Sr								−0.75					
Cu*	−0.67		−0.75		0.88	0.72	0.97	0.92	0.99				
Sb*	−0.92		−0.85	0.67	0.74	0.90	0.92	0.93	0.88	−0.74	0.81		
Cr								0.70				0.67	
Sc								0.67					
B*	−0.86			0.76		0.85		0.70				0.80	0.75
Cs								0.79					
Bi*	−0.75		−0.79		0.84	0.79	0.99	0.95	0.99		0.99	0.88	
Sn								0.75					
U							0.74	0.70	0.79		0.80		
W*	−0.80			0.81		0.84		0.69				0.73	0.76
Ag*	−0.79	0.77	−0.77		0.85	0.78	0.97	0.95	0.98		0.97	0.86	
Mo							0.89	0.89	0.89		0.90	0.77	
Te*	−0.92	0.67	−0.84	0.74	0.80	0.93	0.93	0.95	0.89	−0.68	0.84	0.98	0.68
Cd*	−0.90	0.84				0.70	0.86	0.86	0.84		0.80	0.86	
Tl							0.74	0.86	0.68			0.89	
Hg*	−0.74	0.68	−0.76		0.82	0.80	0.95	0.93	0.94		0.96	0.84	

* Содержание элементов, превышающее кларк земной коры.

Таблица 4. Концентрация химических элементов в листьях ивы Миабэ, мг/кг

Элемент	Средняя концентрация в наземных растениях [13]	Среднее $\bar{X} \pm m$	Стандартная ошибка	Min–max	CV, %	Отношение среднего содержания элемента в растениях на нарушенных площадях к кларку, %
K*	14 000	20 331.0	907.0	15 471.0 – 23 866.0	13	145
Ca	18 000	5608.0	386.0	3828.0–7118.0	21	31
P*	2300	4334.0	218.0	3479.0–5348.0	15	188
Mg	3200	1492.0	68.3	1127.0–1815.0	14	47
Zn*	100	250.3	47.81	44.1–427.0	57	250
Fe	140	99.7	12.02	58.9–166.0	36	71
Mn	630	60.8	11.55	17.3–127.0	57	10
Sr*	26	44.5	7.72	18.2–93.5	52	171
Al	0.5–4000	26.1	5.84	8.6–61.3	67	5220–0.65
B	50	11.2	0.56	9.1–13.9	15	22
Ba	14	8.0	2.59	1.2–23.8	97	57
Na	1200	5.4	1.08	0.38–10.8	60	0.45

Таблица 4. Окончание

Элемент	Средняя концентрация в наземных растениях [13]	Среднее $\bar{X} \pm m$	Стандартная ошибка	Min–max	CV, %	Отношение среднего содержания элемента в растениях на нарушенных площадах к кларку, %
Cu	14	4.9	0.53	2.42–7.5	33	35
Rb	20	3.9	0.95	1.13–10.0	73	20
Ni	3	2.3	0.38	0.84–4.0	49	77
Cd*	0.6	1.9	0.64	0.37–5.5	98	317
Ti*	1	1.8	0.49	0.58–5.3	81	180
Cr*	0.23	0.58	0.02	0.500–0.73	12	252
As*	0.2	0.56	0.13	0.090–1.25	67	280
Co	0.5	0.479	0.172	0.14–1.76	108	96
Pb	2.7	0.23	0.09	0.001–0.71	112	9
Ag*	0.06	0.155	0.09	0.003–0.65	150	258
Mo	0.9	0.152	0.025	0.04–0.27	49	17
Ce	—	0.096	0.027	0.04–0.25	86	—
Li	0.1	0.081	0.017	0.02–0.19	62	81
La	0.085	0.060	0.017	0.02–0.16	87	71
Sb	0.06	0.056	0.009	0.02–0.09	47	93
Zr	0.64	0.043	0.015	0.001–0.13	106	7
V	1.6	0.036	0.011	0.001–0.08	90	2
Y	—	0.028	0.008	0.01–0.08	90	—
Ga	0.06	0.023	0.004	0.01–0.05	48	38
Se	0.2	0.020	0.004	0.001–0.04	65	10
Pr	—	0.012	0.003	0.004–0.03	86	—
Bi	0.06	0.012	0.011	0.001–0.1	275	20
W	0.07	0.011	0.004	0.001–0.04	117	16
Sc	0.008	0.007	0.003	0.001–0.02	108	88
Cs	0.2	0.007	0.001	0.002–0.01	55	4
Hg	0.015	0.005	0.001	0.001–0.01	93	33
U	0.038	0.004	0.001	0.0002–0.01	102	11
Nb	0.02	0.004	0.003	0.001–0.03	229	20
Th	—	0.003	0.002	0.001–0.02	204	—
Sn	0.3	0.002	0.001	0.001–0.01	150	0.7
Be	14	0.002	0.001	0.001–0.01	123	0.01
Te	—	0.001	0.00	0.001–0.001	0	—
Tl	—	0.001	0.00	0.001–0.001	0	—
Ta	—	0.001	0.000	0.001–0.001	0	—
Ge	—	0.001	0.000	0.001–0.001	0	—

* Элементы, содержание которых в листьях ивы Миябе превышает кларк наземных растений.

Таблица 5. Корреляционная связь содержания элементов в листьях ивы Миябе с содержанием элементов в почве (коэффициент корреляции Пирсона) и коэффициент биологического поглощения элементов

Элемент	Корреляция между содержанием элементов в растениях и содержанием их в почве	Коэффициент биологического поглощения	Стандартная ошибка	Min–max
Se	0.00	20.1*	4.3	1.0–40.0
P	–0.20	7.65*	0.96	3.98–11.65
Cd	0.67*	2.73*	0.67	1.19–5.76
Zn	0.78*	1.63*	0.25	0.51–2.57
B	0.72*	1.51*	0.255	0.44–2.31
K	0.20	1.01*	0.05	0.73–1.15
Cu	0.23	0.549	0.303	0.008–2.344
Ca	–0.52	0.541	0.056	0.299–0.746
Ag	0.05	0.250	0.180	0.010–1.350
Mg	0.18	0.234	0.039	0.126–0.516
Ni	0.14	0.218	0.052	0.046–0.579
Mo	0.35	0.173	0.033	0.054–0.381
Sr	–0.31	0.163	0.038	0.052–0.437
Mn	–0.73*	0.100	0.026	0.019–0.221
Hg	0.27	0.079	0.035	0.004–0.333
Rb	–0.03	0.068	0.018	0.018–0.193
Co	–0.002	0.042	0.015	0.012–0.152
Cr	0.56	0.019	0.002	0.015–0.033
Sb	–0.14	0.016	0.007	0.0003–0.063
Ba	0.59	0.012	0.004	0.002–0.036
As	–0.08	0.011	0.005	0.000–0.034
Te	0.00	0.011	0.004	0.001–0.033
Bi	–0.40	0.010	0.008	0.000–0.062
W	–0.13	0.010	0.005	0.001–0.043
Pb	–0.46	0.009	0.004	0.000003–0.039
Li	0.65	0.004	0.001	0.001–0.007
Fe	0.28	0.003	0.0004	0.002–0.005
Tl	0.00	0.003	0.000	0.003–0.003
U	–0.01	0.003	0.001	0.0001–0.010
Be	0.68*	0.002	0.001	0.001–0.006
Ce	0.64	0.002	0.0005	0.001–0.004
Cs	0.15	0.002	0.001	0.0004–0.005
La	0.65	0.002	0.001	0.001–0.005
Pr	0.54	0.002	0.000	0.001–0.004
Sc	–0.56	0.002	0.001	0.0001–0.009
Ta	0.00	0.002	0.000	0.001–0.003
Y	0.24	0.002	0.001	0.001–0.006
Zr	0.36	0.002	0.001	0.0001–0.005

Таблица 5. Окончание

Элемент	Корреляция между содержанием элементов в растениях и содержанием их в почве	Коэффициент биологического поглощения	Стандартная ошибка	Min–max
Ga	0.82*	0.001	0.000	0.001–0.003
Ge	0.00	0.001	0.000	0.001–0.001
Nb	0.32	0.001	0.000	0.0001–0.004
Sn	0.33	0.001	0.000	0.0004–0.005
Th	–0.05	0.001	0.000	0.0001–0.003
Ti	0.16	0.001	0.0001	0.0001–0.002
Al	0.08	0.0004	0.0001	0.0001–0.001
V	0.80*	0.0004	0.0001	0.00001–0.001
Na	–0.03	0.0003	0.0001	0.00004–0.001

* Статистически достоверные коэффициенты корреляции.

же время коэффициент биологического накопления (КБН) мышьяка был очень низким.

К элементам-накопителям относятся Se, P, Cd, Zn, В и К. В основном это биогенные элементы, влияющие на ростовые процессы, фотосинтетическую деятельность, зимостойкость, засухоустойчивость и продуктивность растений.

Исключением является кадмий, который считается токсичным элементом для растений, и основная причина токсичности связана с нарушением энзиматической активности. Элемент эффективно поглощает как корневая система, так и листья. Установлено также, что хлорофилл обладает способностью концентрировать Cd в растительных тканях. Почти во всех случаях отмечают линейную корреляцию между содержанием Cd в растительном материале и в среде роста. Выявлены большие различия в способности видов растений поглощать этот элемент. Известно, что большая часть Cd аккумулируется в тканях корней, даже если он попадает в растения через листья. Содержащийся в растениях кадмий представляет наибольшую опасность, т.к. может служить источником поступления в организмы человека и животных. Обычно наблюдают взаимодействие Cd с Zn [15]. Цинк и кадмий включены в гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания в почве населенных мест и сельскохозяйственных угодий [14].

В нашем исследовании обнаружено взаимодействие кадмия с цинком ($r = 0.82$), а также с кальцием ($r = 0.78$), хромом ($r = 0.73$), марганцем ($r = -0.71$) и фосфором ($r = -0.74$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, установлено, что валовое содержание As, Zn, Pb, Sb, Cd в почве хвостохранилища Дарасунского месторождения золота превышает в 1.3–240 раз предельно допустимую концентрацию (ПДК) и ориентировочно допустимую концентрацию (ОДК) химических веществ, установленные санитарными правилами и нормами по обеспечению безопасности для человека факторов среды обитания.

В листьях ивы Миябе, произрастающей в районе хвостохранилища, содержание K, Sr, Ti, P, Zn, Ag, As и Cd превышало средние показатели этих элементов в наземных растениях в 1.5–3.0 раза.

Выявлена статистически достоверная корреляционная связь содержания Cd, Zn, В, Mn, Be, Ga и V в листьях ивы Миябе с валовым содержанием этих элементов в почве мест произрастания растения. Коэффициент биологического накопления Zn на пробных площадях находился в пределах от 0.5 до 2.6, Cd – от 1.2 до 5.8.

Ива Миябе на загрязненных токсичными элементами почвах является перспективным растением для извлечения из почвы кадмия и цинка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кочев Д.В., Шумилова Л.В. Применение спектральных водных индексов на хвостовом хозяйстве Дарасунского рудника по данным дистанционного зондирования Земли программы Landsat // Вестн. Забайкал. Гос. ун-та. 2023. Т. 29. № 2. С. 45–60.
2. Юркевич Н.В., Бортникова С.Б., Саева О.П., Корнеева Т.В. Гидрохимические аномалии в районе

- складирования сульфидных отходов золотодобычи (пос. Вершино-Дарасунский, Забайкальский край). Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами // Мат-лы 4-й Всерос. научн. конф. с международ. участием (Улан-Удэ, 17–20 августа 2020 г.). Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2020. С. 282–285.
3. Михайлова Л.А., Солодухина М.А., Алексеева О.Г., Бурлака Н.М., Лана С.Э. Гигиеническая оценка содержания химических веществ в почве горно-промышленных районов Забайкальского края // Гигиена и санитария. 2019. Т. 98. № 4. С. 400–410.
 4. Мязин В.П., Михайлютина С.И. Комплексная оценка влияния техногенного загрязнения объектов внешней среды на здоровье населения Восточного Забайкалья // Вестн. Забайкал. гос. ун-та. 2006. №. 4. С. 37–42.
 5. Yan A., Wang Y., Tan S. N., Mohd Yusof M. L., Ghosh S., Chen Z. Phytoremediation: a promising approach for revegetation of heavy metal-polluted land // Front. Plant Sci. 2020. V. 11. P. 359.
 6. Awa S.H., Hadibarata T. Removal of heavy metals in contaminated soil by phytoremediation mechanism: a review // Water Air Soil Pollut. 2020. V. 231. № 2. P. 47.
 7. Sakakibara M., Watanabe A., Inoue M., Sano S., Kaise T. Phytoextraction and phytovolatilization of arsenic from As-contaminated soils by *Pteris vittata* // Proceed. of the annual inter. Conf. on soils, sediments, water and energy. 2010. V. 12. № 1. P. 26.
 8. Флора Сибири. Т. 5. Salicaceae — Amaranthaceae. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-е, 1992. 312 с.
 9. Harada E., Hokura A., Nakai I., Terada Y., Baba K.I., Yazaki K., Mizuno T. Assessment of willow (*Salix* sp.) as a woody heavy metal accumulator: field survey and in vivo X-ray analyses // Metallomics. 2011. V. 3. № 12. P. 1340–1346.
 10. Beauchamp S., Jerbi A., Frenette-Dussault C., Pitre F.E., Labrecque M. Does the origin of cuttings influence yield and phytoextraction potential of willow in a contaminated soil? // Ecol. Engin. 2018. № 111. P. 125–133.
 11. Dagher D.J., Pitre F.E., Hijiri M. Ectomycorrhizal fungal inoculation of *sphaerospora brunnea* significantly increased stem biomass of *Salix miyabeana* and decreased lead, tin, and zinc, soil concentrations during the phytoremediation of an industrial landfill // J. Fungi. 2020. V. 6. № 2. P. 87.
 12. ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98 Методика выполнения измерений содержания металлов в твердых объектах методом ИСП-МС. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/19e/4293777593.pdf> (дата обращения: 23.02.2024).
 13. Войткевич Г.В., Кокин А.В., Мирошников А.Е., Прохоров В.Г. Справочник по геохимии. М.: Недра, 1990. 480 с.
 14. СанПиН 1.2.3685-21. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115> (дата обращения: 23.02.2024).
 15. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях: Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 439 с.

Concentration of Chemical Elements in the Leaves of the *Salix miyabeana* Seemen, Growing in the Area of the Tailings Dam of the Darasun Gold Deposit

V. P. Makarov[#]

*Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS,
ul. Nedorezova 16a, Chita 672014, Russia*

[#]*E-mail: vm2853@mail.ru*

In the area of the tailings dam of the Darasun gold deposit in the Trans-Baikal Territory, the content of 47 chemical elements in the leaves of the Miabe willow (*Salix miyabeana*), as well as their gross content in the soil in places where plants grow, were studied to obtain information about the accumulation of elements by the plant on contaminated soils and the prospect of using Miabe willow as a phytoextractor plant. The analysis of plant and soil samples was carried out on an ICP-MS Elan 9000 mass spectrophotometer (Canada). The method of measuring the metal content in solid objects by the ISP-MS method was used. It was found that the gross content of Ag, Pb, Cd, Cu, Zn, W, Hg, B and especially Te, Bi, As and Sb in the soil was 2–840 times higher than the clark of the Earth's crust. The total content of As, Zn, Pb, Sb and Cd in the soil was 1.3–7.0 times higher than the maximum permissible concentrations (MPC) and approximately permissible concentrations (APC) of chemicals, and the arsenic content exceeded the established limit by 240 times. The concentration of K, Sr, Ti, P, Zn, Ag, As and Cd in the leaves of the Miabe willow exceeded the clark of terrestrial plants by 1.5–3.0 times. A correlation was found between the concentration of Cd, Zn, B, Mn, Be, Ga and V in the leaves of the Miabe willow with the gross content of these elements in the soil of the plant's growing sites. The storage elements in the plant were Se, P, Cd, Zn, B and K. The coefficient of biological accumulation of Se ranged from 1 to 40, Cd – 1.1–5.8, Zn – 0.5–2.6. Miabe willow is a promising plant for extracting cadmium and zinc from contaminated soils.

Keywords: willow *Salix miyabeana*, chemical elements, tailings dam of Darasunskoye field, Trans-Baikal Territory.