

Научная статья

УДК 630*581.573.4+581.192

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-5-76-90

Концентрация химических элементов в хвое *Larix gmelinii* и листьях *Betula pendula*

В.П. Макаров[✉], канд. биол. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [AAZ-3029-2020](https://orcid.org/0000-0001-8882-9339),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8882-9339>

Ю.В. Зима, канд. геогр. наук, науч. сотр.; ResearcherID: [AAC-1385-2022](https://orcid.org/0000-0002-0689-0855),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0689-0855>

Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, ул. Недорезова, д. 16а, г. Чита, Россия, 672014; vm2853@mail.ru[✉], zima.yura@mail.ru

Поступила в редакцию 18.01.23 / Одобрена после рецензирования 04.05.23 / Принята к печати 06.05.23

Аннотация. В Забайкальском крае предприятия горнодобывающей промышленности существенно загрязняют окружающую среду химическими элементами. В этих условиях большое значение имеет мониторинг состояния окружающей среды, в т. ч. с помощью растений-индикаторов. Из числа древесных растений наиболее распространены в крае лиственница Гмелина (*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen.) и береза повислая (*Betula pendula* Roth.). На примере Быстринского Cu–Au–Fe скарново-порфирового месторождения исследована концентрация 46 химических элементов в хвое лиственницы Гмелина и листьях березы повислой, а также содержание этих элементов в почве. Цель исследования – выявить видовые различия растений в накоплении элементов и перспективу использования растений как индикаторов загрязнения окружающей среды. Научные работы проведены на 11 пробных площадях в природных растительных сообществах вблизи объектов предприятия в августе 2022 г. Образцы почвы и растений отбирали в одно время, на одних и тех же участках. Химический анализ образцов проведен с использованием «Методики выполнения измерений содержания металлов в твердых объектах методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой» (ПНД Ф 16.1:2.3:3.11–98). Установлены различия концентрации элементов в растениях по отношению к кларку наземных растений. Статистически значимо большая по сравнению с хвоей лиственницы концентрация K, Ca, P, Mg, Fe, Ba, Zn, Na, Rb, Ni, Co, Ga, Sn, Y, Zr, Cd и Nb обнаружена в листьях березы, и, напротив, большая, чем в листьях березы, концентрация Sc, W и Hg – в хвое лиственницы. Установлены достоверные различия растений по коэффициенту биологического поглощения Se, P, Sn, Ca, Mn, Sr, Cd, Mg, K, W, Ni, Zn, Sc, Rb, Na и Nb. Знания об особенностях накопления химических элементов в органах растений могут быть использованы для биомониторинга загрязнения окружающей среды и, возможно, для фиторемедиации загрязненных грунтов.

Ключевые слова: месторождение металлов, *Larix gmelinii*, *Betula pendula*, химические элементы, загрязнение окружающей среды, загрязнение химическими элементами, мониторинг загрязнения, Забайкальский край

Благодарности: Химический анализ образцов растений и почвы выполнен в лаборатории физико-химических исследований Института тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина (г. Хабаровск). Аналитики: мл. науч. сотр. В.О. Крутикова, ст. инж. А.Ю. Петрова.

Для цитирования: Макаров В.П., Зима Ю.В. Концентрация химических элементов в хвое *Larix gmelinii* и листьях *Betula pendula* // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 5. С. 76–90. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-5-76-90>

Original article

Concentration of Chemical Elements in *Larix gmelinii* Needles and *Betula pendula* Leaves

Vladimir P. Makarov[✉], Candidate of Biology, Senior Research Scientist;
ResearcherID: [AAZ-3029-2020](https://orcid.org/0000-0001-8882-9339), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8882-9339>

Yurij V. Zima, Candidate of Geography, Research Scientist; ResearcherID: [AAC-1385-2022](https://orcid.org/0000-0002-0689-0855),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0689-0855>

Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, ul. Nedorezova, 16a, Chita, 672014, Russian Federation; vm2853@mail.ru[✉], zima.yura@mail.ru

Received on January 18, 2023 / Approved after reviewing on May 4, 2023 / Accepted on May 6, 2023

Abstract. In the Trans-Baikal Territory, mining enterprises significantly pollute the environment with chemical elements. In these conditions, monitoring the state of the environment, including with the help of indicator plants, is of great importance. Among the woody plants, Gmelin larch (*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen.) and silver birch (*Betula pendula* Roth.) are the most common in the region. Using the example of the Bystrinskoe Cu–Au–Fe skarn-porphry deposit, the concentration of 46 chemical elements in the needles of Gmelin larch and the leaves of silver birch, as well as the content of these elements in the soil, has been studied. The aim of the study is to identify plant species differences in the accumulation of elements and the prospect for using plants as indicators of environmental pollution. Scientific work has been carried out on 11 sample plots in natural plant communities near the enterprise's facilities in August 2022. Soil and plant samples have been collected at the same time, at the same sites. The chemical analysis of the samples has been carried out using the “Methodology for measuring the metal content in solid objects by inductively coupled spectrometry” (FER 16.1:2.3:3.11–98). Differences in the concentration of elements in plants in relation to the Clarke of terrestrial plants have been established. A statistically significant higher concentration of K, Ca, P, Mg, Fe, Ba, Zn, Na, Rb, Ni, Co, Ga, Sn, Y, Zr, Cd and Nb has been found in birch leaves compared to larch needles, and, conversely, a higher concentration of Sc, W and Hg – in larch needles than in birch leaves. Significant differences between plants have been established in the biological absorption coefficient of Se, P, Sn, Ca, Mn, Sr, Cd, Mg, K, W, Ni, Zn, Sc, Rb, Na and Nb. Knowledge about the peculiarities of accumulation of chemical elements in plant organs can be used for biomonitoring environmental pollution and, possibly, for phytoremediation of contaminated soils.

Keywords: metal deposit, *Larix gmelinii*, *Betula pendula*, chemical elements, environment pollution, chemical pollution, pollution monitoring, the Trans-Baikal Territory

Acknowledgements: Chemical analysis of plant and soil samples was performed in the laboratory of physical and chemical research of the Institute of Tectonics and Geophysics named after Yu.A. Kosygin (Khabarovsk). The analysts: junior research scientist V. Krutikova, senior engineer A. Petrova.



For citation: Makarov V.P., Zima Yu.V. Concentration of Chemical Elements in *Larix gmelinii* Needles and *Betula pendula* Leaves. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 5, pp. 76–90. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-5-76-90>

Введение

В Забайкальском крае основными предприятиями, загрязняющими окружающую среду, являются горнодобывающие. В России существуют нормативные документы, определяющие предельно допустимые уровни содержания ряда химических элементов в почве и растениях, продуктах питания человека и животных, лекарственном сырье (ГОСТ 17.4.4.02–2017, 21; ОФС.1.5.3.0009.15), некоторых химических элементов в кормах для сельскохозяйственных животных (временный максимально-допустимый уровень). В этих условиях важен комплексный подход к контролю состояния окружающей среды, в т. ч. и с помощью растений. Известно, что они способны концентрировать в различных органах химические элементы в зависимости от условий окружающей среды и собственных биологических особенностей.

Наибольшие площади земель лесного фонда из числа древесных растений в крае занимают лиственница Гмелина и береза повислая – соответственно 63,3 и 20,4 % (Министерство природных ресурсов Забайкальского края. Государственный лесной реестр). Растения являются пионерными при зарастании нарушенных в результате добычи полезных ископаемых земель и поэтому могут стать удобными объектами для контроля загрязнения воздуха, почвы и растений в районе промышленных объектов.

Есть множество примеров использования лиственницы и березы для биомониторинга окружающей среды. В Польше в качестве биоиндикатора загрязнения воздуха Co, Cu, Ni и Pb коксовой промышленностью предлагается применять лиственницу европейскую (*Larix decidua* Mill.) [23]. В Германии хорошими фитоиндикаторами при мониторинге сильно загрязненных территорий наряду с другими растениями признаны береза повислая и лиственница европейская. Береза повислая являлась лучшим биоаккумулятором Cd [22]. В Китае, в провинции Ляонин, в районе добычи полезных ископаемых Хунтоушань на хвостохранилище в хвое лиственницы ольгинской (*Larix olgensis* Henry) наблюдалось более высокое содержание Cu, Hg, Mo, Pb и Zn, чем в фоновой зоне [24]. Исследования, проведенные в зоне воздействия Джидинского вольфрамомолибденового горно-обогатительного комбината в г. Закаменске (Республика Бурятия, Россия), показали повышенное накопление в хвое и коре лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.), а также в листьях и коре березы повислой W, Mo, V, Pb, Bi, Cd и Co. Наблюдалась тесная корреляция между концентрациями в почвах и растениях для элементов с сильным и умеренным биологическим захватом [18]. На урбанизированной территории (г. Иркутск, Россия) было изучено содержание Pb, Cd, Cu, Zn в горизонтах почвенного профиля и листьях (хвое) лиственницы сибирской и березы повислой. Показано, что концентрация элементов в листьях (хвое) тесно связана с их содержанием в почвенных горизонтах [20]. Научные изыскания на бывшем утилизированном угольном месторождении, разработка которого велась открытым способом, в Вартеге Хиллс (Южный Уэльс, Великобритания) показали постоянное накопление в

листьях березы повислой Cd и Zn, в то время как в хвое молодой лиственницы европейской отмечались высокие концентрации Mn и Pb. Исследования фиторе медиационного потенциала лиственницы европейской и березы повислой на концентрацию металлов в почве выявили, что уровни металлов значительно снизились даже на недавно засеянных испытательных площадках. На участках 4-летней давности наблюдалось снижение концентрации Mn на 14–18 % и концентраций Cd и Zn примерно на 8 %. Береза повислая и лиственница европейская обычно используются в мелиорации земель Великобритании для извлечения Zn, Cd, Mn, Pb и Cu из отходов рудников [16]. В условиях Стерлитамакского промышленного центра (Республика Башкортостан, Россия) изучены особенности накопления и распределения Cd и Ni в надземных и подземных органах лиственницы Сукачева (*Larix sukaczewii* Dyl.). Выявлено, что повышение концентрации металлов в почве приводит к увеличению их содержания в хвое, ветвях и корневой системе деревьев. Ni и Cd в основном аккумулируются поглощающими корнями. В надземной части концентрация металлов в ветвях выше, чем в хвое [4]. В Чешской Республике кольца деревьев лиственницы европейской предлагается использовать как инструмент надежного геохимического архива локальных и региональных изменений атмосферной ртути [21]. Определено содержание Cd, Pb, Cu, Ni, Mn, Zn и Fe в листьях березы повислой (Нижняя Силезия, Польша), которые особенно подвержены промышленному загрязнению. Обнаруженные значительные положительные корреляции между содержанием Cu и Pb в листьях березы и уровнями этих элементов в соответствующих почвах указывают на ее потенциал для использования в биомониторинге загрязнения окружающей среды Cu и Pb [19]. Для Забайкальского края есть несколько примеров применения в этих целях лиственницы Гмелина и березы повислой [5–7, 13].

Быстринский горно-обогатительный комбинат (ГОК) – сравнительно молодое предприятие, запуск производства которого проведен в 2017 г. Специфические природные климатические и геохимические условия района размещения предприятия, а также технологии обогащения полезных ископаемых обуславливают особенности элементного состава произрастающих здесь растений. Ранее элементный состав древесных растений в районе предприятия не исследовался.

Цель данной работы – дать сравнительную оценку концентраций химических элементов в хвое лиственницы Гмелина и листьях березы повислой в районе Быстринского ГОКа, а также определить возможность использования растений для контроля загрязнения окружающей среды.

Объекты и методы исследования

Исследование проведено на территории Быстринского ГОКа. Это крупное Cu–Au–Fe скарново-порфировое месторождение. Оно находится на территории Газимуро-Заводского района Забайкальского края, в 25 км к северо-западу от районного центра, пос. Газимурский Завод (51,482° с. ш. 118,538° в. д.). Минеральный состав руд разнообразный – более 90 гипогенных минералов. Наиболее широко распространен магнетит, а среди сульфидов – пирит, халькопирит, пир-

ротин. В меньших количествах, но постоянно встречаются арсенопирит, Co-Ni-F арсениды и сульфоарсениды, галенит, сфалерит, валлериит, блеклые руды. Особое место, хотя и без образования крупных скоплений, занимают Mo-W и редкоземельная минерализация [10]. Наиболее широко развита Mo -минерализация скарнового типа, в которой содержание Mo может достигать высоких значений. Молибденовая минерализация в скарнах характеризуется изменчивыми, но, как правило, высокими концентрациями Fe, Cu, Co, S, As [11].

На территории месторождения были выделены горные дерновые лесные, дерновые лесные насыщенные, темно-серые лесные, лугово-черноземные, луговые, лугово-болотные типы почв. Среднее содержание гумуса находилось в пределах 4,2–15,3 %, рН – 5,9–6,9, среднее содержание фосфора – 1,9–14,0 мг/100 г, калия – 11,0–29,0 мг/100 г. По механическому составу все типы почв тяжелосуглинистые. Для почв характерно увеличенное относительно кларка содержание Sc . В горных дерновых лесных почвах наблюдалось повышенное количество Cu, Cr, W, As . В темно-серых лесных почвах зафиксировано небольшое превышение Cu (и во всех пробах высокая доля As). Основными тяжелыми металлами, выявленными в концентрациях больше нормы, являлись Cu, Cr, As, W . В подвижных формах тяжелые металлы не имели значений выше допустимых [12].

В августе 2022 г. с 4 пробных площадей (ПП 2, 6, 10, 11) было взято по одной пробе почвы путем смешивания 5 точечных проб почвы методом конверта в слое 20 см. Пробы упаковывались в полиэтиленовые пакеты. Масса проб, условия их транспортировки и хранения соответствовали нормативным документам (ГОСТ 17.4.3.01–2017, ГОСТ 17.4.4.02–2017, ПНД Ф 12.1:2.2.2.3:3.2–03).

Одновременно с почвой на высоте около 2 м в кроне 5–6 деревьев было отобрано 9 объединенных образцов хвои лиственницы (ПП 1–7, 9, 10) и 10 объединенных образцов листьев березы (ПП 1–7, 9–11).

Пробные площади располагались в природных сообществах, преимущественно в лиственнично-березовых лесах, а также прирусловых древесно-кустарниковых сообществах и на пойменном лугу. Абсолютная высота ПП была в пределах 752–925 м над ур. м. Возраст лиственницы составлял около 60–70 лет, березы – 10–30 лет. Сомкнутость крон в большинстве насаждений – около 70 %, на ПП 2 произрастали отдельно стоящие деревья, на ПП 6 сомкнутость крон равнялась около 20 %. ПП находились в радиусе 7–8 км от карьеров и обогатительной фабрики предприятия (см. рисунок).

При пробоподготовке для определения концентраций микроэлементов в пробах за основу была взята методика выполнения измерений содержания металлов в твердых объектах методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ПНД Ф 16.1:2.3:3.11–98). В качестве стандартных образцов для проверки и калибровки прибора применялись ДВА, ДВБ (Дальний восток, Россия), ВНВО-1, STM-1 (США), JG-1a, JR-1 (Япония) и др. Учитывая, что наиболее корректной оценкой предела обнаружения в аналитических методах является экспериментальное нахождение такого значения [15], данные по Se, Sb, Pb, Be приведены ниже порога в соответствии с методикой ПНД Ф 16.1:2.3:3.11–98.



Расположение пробных площадей
The location of sample plots

Статистическая обработка полученных данных проведена с помощью программы Microsoft Excel 2010, определены средние арифметические значения с ошибкой ($M_{cp} \pm m$), среднеквадратичное отклонение (CV), минимальное и максимальное значения (Min–max).

Результаты исследования и их обсуждение

Среднее валовое содержание химических элементов в почве (ПП 2, 6, 10, 11) представлено в табл. 1.

Таблица 1

Валовое содержание химических элементов в почве, мг/кг
The gross content of chemical elements in the soil, mg/kg

Элемент	$M_{cp} \pm m$	Отношение к кларку земной коры, %	Min–max	CV, %
Fe	31615±370	68	30346–32389	3
K	14618±302	58	13479–15293	5
Na	8108±1751	32	2841–12662	48
Mg	6767±1131	36	4730–11140	37
Ca	4460±208	15	3742–5008	10
Ti	2310±165	51	1928–2883	16
Mn	1146±258	115	568–2036	50
P	840±183	90	541–1562	49
Ba	532±55	82	363–644	23
Sr	134,4±10,4	40	100–160	17

Окончание табл. 1

Элемент	$M_{cp} \pm m$	Отношение к кларку земной коры, %	Min–max	CV, %
Rb	91,4±7,9	61	66,0–108,0	19
Cr	78,7±29,5	95	44,7–196,0	84
V	72,3±2,8	80	63,8–80,9	9
Zn	69,2±2,2	83	65,1–75,4	7
Ce	59,3±6,1	85	47,6–80,7	23
Zr	52,4±5,0	31	38,9–69,2	21
Li	39,2±4,7	123	28,3–50,6	27
Ni	31,4±6,7	54	17,0–56,5	48
La	28,8±2,7	99	24,2–39,3	21
Cu	22,7±1,6	48	18,3–28,3	16
As	21,5±3,3	1267	13,8–31,3	35
Pb	20,4±1,4	127	17,4–25,6	16
B	18,1±4,1	151	12,6–34,3	51
Ga	15,9±0,2	84	15,4–16,6	3
Y	13,9±2,4	48	8,7–22,9	38
Co	11,4±1,0	63	9,0–14,4	19
Th	9,9±0,4	76	9,0–11,3	9
Sc	9,4±0,3	94	8,6–10,4	8
Cs	8,3±0,5	225	6,8–9,5	13
Nb	7,1±0,6	35	5,8–9,3	19
Pr	6,9±0,8	77	5,6–9,9	26
Sb	2,6±0,6	513	1,2–4,4	53
W	2,4±0,6	181	1,3–4,8	59
U	2,1±0,3	85	1,6–3,3	32
Be	1,7±0,05	45	1,6–1,8	6
Ge	1,4±0,1	97	1,2–1,5	9
Mo	1,2±0,2	111	0,8–1,8	36
Sn	1,2±0,1	49	1,0–1,6	19
Ta	0,7±0,1	28	0,6–0,9	21
Tl	0,6±0,05	57	0,5–0,7	19
Ag	0,30±0,04	420	0,17–0,43	33
Hg	0,1±0,02	133	0,05–0,20	51
Cd	0,08±0,01	65	0,04–0,13	40
Bi	0,02±0,02	187	0,001–0,080	210
Se	0,001±0	2	0,001–0,001	0
Te	0,001±0	100	0,001–0,001	0

Относительно кларка земной коры [2] среднее валовое содержание химических элементов в почве находилось в такой последовательности: As > Sb > Ag > Cs > Bi > W > B > Hg > Pb > Li > Mn > Mo > Te = Кларк > La > Ge > Cr > Sc > P > Ce > U > Ga > Zn > Ba > V > Pr > Th > Fe > Cd > Co > Rb > K > Tl > Ni > Ti > Sn > Cu > Y > Be > Sr > Mg > Nb > Na > Zr > Ta > Ca > Se.

Средняя концентрация химических элементов в хвое лиственницы: $K > Ca > P > Mg > Mn > Fe > Ba > Sr > B > Zn > Cu > Na > Ti > Rb > Cr > As > Ni > Pb > V > Mo > Ce > W > Co > Sc > Li > La > Cs > Ga > Se > Sn > Y > Zr > Sb > Th > Cd > Pr > Hg > Bi > U > Be > Ag > Ge > Ta > Tl > Nb > Te$; в листьях березы: $> K > Ca > Mg > P > Mn > Fe > Zn > Ba > Sr > Na > B > Cu > Ti > Rb > Ni > Cr > As > Co > Mo > V > Ce > Pb > Cd > Li > W > Zr > La > Sn > Ga > Y > Cs > Sb > Se > Th > Pr > U > Be > Hg > Ge > Nb > Sc > Ta > Ag > Bi > Te > Tl$.

Средняя концентрация в листьях березы повислой K, Ca, P, Mg, Fe, Ba, Zn, Na, Rb, Ni, Co, Ga, Sn, Y, Zr, Cd и Nb была статистически достоверно выше, чем в хвое лиственницы Гмелина. В хвое лиственницы средняя концентрация Sc, Hg и Tl достоверно выше, чем в листьях березы (табл. 2). Между концентрациями других исследованных элементов в листьях и хвое растений статистически достоверных различий не обнаружено.

Таблица 2

**Концентрации химических элементов в хвое лиственницы Гмелина
и листьях березы повислой, мг/кг**
**The concentrations of chemical elements in Gmelin larch needles
and silver birch leaves, mg/kg**

Элемент	Лиственница Гмелина				Береза повислая			
	$M_{cp} \pm m$	Отношение к кларку наземных растений, %	Min-max	CV, %	$M_{cp} \pm m$	Отношение к кларку наземных растений, %	Min-max	CV, %
Ag	0,004±0,001	67	0,001–0,010	99	0,002±0,001	33	0,001–0,010	125
As	0,74±0,26	370	0,05–2,02	107	0,42±0,21	210	0–2,21	159
B	19,5±2,6	39	9,8–34,1	39	21,0±1,2	42	15,5–26,7	18
Ba**	67±11	479	23–117	49	101±16	721	15–161	51
Be	0,006±0,001	6	0,002–0,010	57	0,010±0,003	10	0,001–0,030	77
Bi	0,013±0,012	22	0,001–0,110	277	0,001±0	2	0,001–0,001	0
Ca**	1952±133	11	1446–2463	20	4636±378	26	2767–7078	26
Cd**	0,021±0,003	4	0,010–0,040	44	0,141±0,031	24	0,020–0,280	70
Ce	0,17±0,07	84	0,001–0,640	123	0,22±0,07	110	0,04–0,66	99
Co**	0,160±0,052	32	0,04–0,53	98	0,32±0,08	64	0,10–0,75	76
Cr	0,81±0,23	352	0,26–2,27	84	1,10±0,27	478	0,26–2,62	76
Cs	0,041±0,014	205	0,003–0,110	99	0,039±0,014	195	0,004–0,150	114
Cu	6,2±1,8	44	2,2–18,3	87	6,3±1,2	45	2,8–13,6	61
Fe**	135±49	96	22–462	109	325±87	232	50–830	85
Ga**	0,04±0,01	667	0,01–0,12	88	0,07±0,02	1167	0,02–0,16	67
Ge	0,003±0,001	–	0,002–0,010	81	0,005±0,001	–	0,002–0,010	69
Hg*	0,016±0,004	107	0,001–0,040	71	0,008±0,002	53	0,001–0,020	90
K**	3788±162	27	2936–4501	13	6274±483	45	4638–9445	24
La	0,10±0,04	118	0,01–0,35	112	0,12±0,03	141	0,03–0,33	91
Li	0,107±0,048	107	0,001–0,440	135	0,14±0,05	140	0,02–0,40	106
Mg**	1255±56	39	978–1454	13	3770±164	118	3024–4676	14

Окончание табл. 2

Элемент	Лиственница Гмелина				Береза повислая			
	$M_{cp} \pm m$	Отношение к кларку наземных растений, %	Min-max	CV, %	$M_{cp} \pm m$	Отношение к кларку наземных растений, %	Min-max	CV, %
Mn	583±158	93	16–1553	81	662±171	105	74–1725	81
Mo	0,20±0,08	22	0,02–0,69	120	0,303±0,097	34	0,060–0,900	101
Na**	3,13±2,24	0	0,001–20,500	215	41,6±12,1	3	0,001–130,100	92
Nb**	0,0013±0,0003	65	0,001–0,004	75	0,005±0,003	250	0,001–0,020	163
Ni**	0,717±0,179	24	0,001–1,690	75	2,2±0,4	73	0,4–4,4	55
P**	1644±186	71	847–2559	34	2356±239	102	1277–4133	32
Pb	0,50±0,20	19	0,09–2,02	123	0,22±0,08	8	0,001–0,690	109
Pr	0,019±0,007	–	0,001–0,070	112	0,022±0,007	–	0,003–0,070	101
Rb**	1,5±0,2	8	0,5–2,7	51	3,9±0,6	20	1,9–6,9	47
Sb	0,034±0,011	57	0,004–0,090	99	0,033±0,010	55	0,010–0,110	95
Sc*	0,11±0,01	13750	0,05–0,17	38	0,005±0,003	625	0,001–0,030	194
Se	0,04±0,01	20	0,01–0,09	71	0,030±0,004	15	0,001–0,050	49
Sn**	0,04±0,01	13	0,01–0,13	100	0,107±0,014	36	0,050–0,210	42
Sr	45±5	173	29–77	35	56,7±5,4	218	33,7–86,1	30
Ta	0,002±0,001	–	0,001–0,010	150	0,003±0,001	–	0,001–0,010	136
Te	0,001±0	–	0,001–0,001	0	0,001±0	–	0,001–0,001	0
Th	0,029±0,012	–	0,003–0,110	129	0,026±0,012	–	0,001–0,120	143
Ti	2,813±1,782	281	0,001–16,100	190	5,3±1,8	530	0,001–14,900	106
Tl*	0,0016±0,0003	–	0,001–0,003	57	0,001±0	–	0,001–0,003	53
U	0,011±0,005	289	0,001–0,050	143	0,014±0,004	368	0,002–0,040	101
V	0,22±0,08	14	0,04–0,81	115	0,27±0,08	17	0,07–0,69	89
W	0,165±0,088	236	0,001–0,800	161	0,13±0,07	186	0,001–0,540	163
Y	0,04±0,02	–	0,01–0,16	109	0,059±0,016	–	0,020–0,170	88
Zn**	11,2±1,0	11	6,3–15,2	28	131±12	131	76–193	29
Zr**	0,039±0,019	6	0,001–0,170	148	0,129±0,043	20	0,001–0,440	105

*Концентрация элемента статистически достоверно выше в хвое лиственницы Гмелина.

** Концентрация элемента статистически достоверно выше в листьях березы повислой.

По отношению к кларку наземных растений [3] концентрация химических элементов в хвое лиственницы Гмелина располагалась в следующем порядке: Sc > Ga > Ba > As > Cr > U > Ti > W > Cs > Sr > La > Hg > Li > Кларк > Fe > Mn > Ce > P > Ag > Nb > Sb > Cu > B > Mg > Co > K > Ni > Bi > Mo > Se > Pb > V > Sn > Ca > Zn > Rb > Be > Zr > Cd > Na. Для листьев березы повислой последовательность элементов относительно кларка была такой: Ga > Ba > Sc > Ti > Cr > U > Nb > Fe > Sr > As > Cs > W > La > Li > Zn > Mg > Ce > Mn > P > Кларк > Ni > Co > Sb > Hg > Cu > K > B > Sn > Mo > Ag > Ca > Cd > Rb > Zr > V > Se > Be > Pb > Na > Bi.

Коэффициенты биологического поглощения элементов растениями свидетельствовали о статистически достоверно более высоком их накоплении в листьях березы, в порядке убывания – Se, P, Zn, Ca, Cd, Mg, Mn, Ni, Sn, Rb, Na, Nb. Лиственница отличалась от березы статистически достоверно бóльшим коэффициентом поглощения Sc, Hg и W – соответственно в 35; 3,4 и 1,6 раза (табл. 3).

Таблица 3

**Коэффициенты биологического поглощения элементов хвои лиственницы
Гмелина и листьев березы повислой
The biological absorption coefficients of the elements of Gmelin larch needles
and silver birch leaves**

Элемент	Лиственница Гмелина	Береза повислая
Ag	0,02±0,01	0,006±0,002
As	0,04±0,04	0,02±0,02
B	1,2±0,1	1,4±0,2
Ba	0,17±0,02	0,26±0,03
Be	0,004±0,002	0,009±0,005
Bi	0,67±0,33	0,67±0,33
Ca*	0,48±0,08	1,3±0,2
Cd*	0,25±0,02	1,3±0,2
Ce	0,004±0,003	0,004±0,002
Co	0,02±0,01	0,03±0,01
Cr	0,02±0,01	0,03±0,02
Cs	0,006±0,005	0,005±0,003
Cu	0,37±0,23	0,30±0,12
Fe	0,006±0,004	0,01±0,01
Ga	0,003±0,002	0,005±0,002
Ge	0,004±0,002	0,004±0,002
Hg**	0,27±0,08	0,08±0,06
K	0,230±0,005	0,56±0,05
La	0,005±0,004	0,005±0,003
Li	0,006±0,005	0,006±0,004
Mg*	0,23±0,02	0,69±0,05
Mn*	0,34±0,06	0,50±0,12
Mo	0,19±0,14	0,15±0,07
Na*	0,0001±0,0001	0,006±0,002
Nb*	0,0002±0,0001	0,001±0,001
Ni*	0,03±0,02	0,10±0,04
P*	2,0±0,5	3,6±0,6
Pb	0,04±0,03	0,02±0
Pr	0,004±0,003	0,003±0,002
Rb*	0,012±0,004	0,04±0,01
Sb	0,03±0,02	0,02±0,01
Sc**	0,014±0,002	0,0004±0,0003

Окончание табл. 3

Элемент	Лиственница Гмелина	Береза повислая
Se*	16,7±6,7	33,3±6,7
Sn*	0,015±0,003	0,06±0,01
Sr	0,33±0,06	0,49±0,05
Ta	0,001±0	0,0010±0,0001
Te	1,00±0	1,0±0
Th	0,004±0,004	0,003±0,002
Ti	0,002±0,002	0,002±0,001
Tl	0,003±0,001	0,0020±0,0002
U	0,010±0,009	0,007±0,005
V	0,005±0,003	0,005±0,003
W**	0,13±0,12	0,08±0,07
Y	0,005±0,004	0,005±0,003
Zn*	0,17±0,02	1,6±0,4
Zr	0,001±0,001	0,002±0,001

*Коэффициент биологического поглощения статистически больше в листьях березы повислой. ** Коэффициент биологического поглощения статистически больше в хвое лиственницы Гмелина.

Относительно высокая концентрация Sc в хвое лиственницы может позволить использовать вид как индикатор содержания этого элемента в горных породах и загрязнения окружающей среды. Известно, что содержание Sc в почве определяется главным образом материнской породой. Его наименьшие концентрации установлены в песчаных и легких органических почвах, в то время как для почв, развитых на гранитах и вулканических породах, получены более высокие значения [9]. Концентрация Sc в растениях зависит от степени загрязнения окружающей среды. Так, вблизи Иркутского алюминиевого завода в хвое лиственницы сибирской отмечалось увеличение концентрации Sc в 2,4–5,3 раза по сравнению с фоновыми значениями [1]. В промышленной зоне ОАО «Нафтан» (Республика Беларусь) обнаружено накопление Sc в хвое туи западной (*Thuja occidentalis* L.) в размере 10–20 мг/кг, при содержании в почве менее 10 мг/кг. Отмечалось, что туя западная может выступать индикатором ряда исследуемых металлов и других элементов, т. к. способна аккумулировать их в хвое [8]. В то же время более высокое содержание Sc по сравнению с другими растениями фиксировали в некоторых грибах (базидиомицеты) и мохообразных [17]. Исследование накопления микро- и макроэлементов во мхах, лишайниках, хвое кедра и лиственницы в Западно-Сибирской Арктике (Ямало-Ненецкий автономный округ) показало, что концентрация Sc в изучаемых объектах ступенчато увеличивается в следующем порядке: хвоя кедра, хвоя лиственницы, лишайники и мхи. Установлено, что количество элемента в биологических объектах обусловлено фоном твердых атмосферных осадков. По поверхности исследуемой территории (с центром в пределах г. Новый Уренгой) наблюдалось радиально-симметричное распределение содержания элементов в биологических объектах. Наиболее ярко это проявлялось для хвои лиственницы и кедра. Исследование элементного состава растений в районе Томторского месторождения ниобий-редкоземельных руд в Якутии показало, что в хвое лиственниц преобладают Р и Mn, в меньшем количестве – В и Zn. Для коры

лиственницы характерно преобладание Mn и Zn. По отношению к хвое в коре лиственницы незначительно выше содержание Cu, Ti, Ag, Pb, Li и Sc. Концентрация скандия в коре лиственницы была равной концентрации в лишайниках [14].

Коэффициенты поглощения других исследованных элементов в растениях статистически достоверно не отличались. В группу биологического накопления лиственницы входили Se, P и B, а березы – Se, P, B, Ca, Cd и Zn. По степени интенсивности накопления выделялся Se, особенно у березы.

Согласно ГОСТ 17.4.4.02–2017, ряд химических элементов отнесен к опасным для здоровья человека и животных: As, Cd, Hg, Se, Pb, Zn (1-й класс); B, Co, Ni, Mo, Cu, Sb, Cr (2-й класс); Ba, V, W, Mn, Sr (3-й класс).

На части ПП концентрация As в образцах лиственницы и березы превышала в 1,5–4,4 раза установленные предельно допустимые уровни для лекарственного сырья (ОФС.1.5.3.0009.15).

В хвое лиственницы на отдельных ПП концентрация Fe и Cr была больше в 2,5–4,6 и 1,5–2,3 раза соответственно, чем максимально допустимый уровень для корма животных; в листьях березы – в 1,5–5,2 и 2,0–8,3 раза соответственно.

Лиственница и береза отличались по уровню накопления элементов в хвое и листьях на ПП, находящихся вблизи производственных объектов. Сравнение количества элементов с максимальной концентрацией по ПП показало, что наибольшее количество таких элементов в хвое лиственницы было на ПП 10 (26 элементов), а в листьях березы – на ПП 4 (27 элементов). В то же время на других площадях количество элементов с максимальной концентрацией было не более 7. Это свидетельствует о возможном максимальном количестве химических элементов на этих площадях, а также о том, что растения реагируют, но по-разному, на содержание химических элементов в окружающей среде. Следует отметить, что ПП 4 находится вблизи и восточнее карьера предприятия и в пойме реки, а ПП 10 – вблизи и западнее хвостохранилища.

Для хвои лиственницы обнаружены достоверные корреляционные связи содержания ряда элементов 1-го класса опасности на 1%-м уровне значимости с уровнями других исследованных элементов. С концентрацией в хвое лиственницы мышьяка корреляционно положительно связаны концентрации Cr, Cs, Mo, Sb, Sr и Th ($r = 0,81–0,95$), ртути – Li, Ti, Ce, Cr и Ge ($r = 0,80–0,85$), цинка – Ba ($r = 0,82$). Отрицательные связи установлены между концентрациями As и P ($r = -0,84$), а также между концентрациями Zn и B ($r = -0,83$).

В листьях березы концентрация As достоверно положительно связана с концентрацией значительно большего числа элементов: Ag, Ce, Cr, Cs, Cu, Fe, La, Li, Na, Nb, Pr, Sb, Sc, Sr, Th, Tl, U, V, W, Y и Zr ($r = 0,76–0,97$). Концентрация Hg в листьях березы также корреляционно достоверно положительно связана с концентрацией большего количества элементов: Be, Ce, Cr, Cs, Cu, Fe, Ga, Ge, La, Li, Na, Nb, Pr, Sb, Sc, Th, Ti, U, V, W и Y ($r = 0,72–0,90$). Концентрация Cd в листьях положительно связана с концентрацией Mn ($r = 0,93$) и отрицательно – с концентрацией Rb ($r = -0,73$).

Заключение

Исследование концентрации химических элементов в хвое лиственницы Гмелина и листьях березы повислой показало значительные различия в накоплении ряда элементов представителями этих видов. Концентрация большин-

ства изученных элементов была больше в листьях березы, и только Sc, W и Hg в большей мере накапливались в хвое лиственницы, особенно Sc.

Отличались у растений также коэффициенты биологического поглощения. В группу биологического накопления лиственницы входили Se, P и B, а березы – Se, P, B, Ca, Cd и Zn. При этом коэффициенты накопления в листьях березы Zn, Cd, Se, P, B были больше, чем в хвое лиственницы в 9,4; 5,2; 2,0; 1,8 и 1,2 раза соответственно. Коэффициенты биологического поглощения Sc, Hg и W в хвое лиственницы были больше, чем в листьях березы, в 35; 3,4 и 1,6 раза соответственно.

Концентрации As, Cr и Fe превышали в ряде мест произрастания растений пределы, установленные для лекарственного сырья и грубых кормов для животных.

Корреляционный анализ выявил, что среди элементов 1-го класса опасности As и Hg характеризовались максимальным числом связей с другими элементами, причем большее число таких связей было обнаружено для листьев березы.

Различия в концентрации и накоплении химических элементов для лиственницы Гмелина и березы повислой связаны с их биологическими особенностями и могут быть использованы для мониторинга загрязнения окружающей среды, а также, возможно, для фиторемедиации загрязненных грунтов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Афанасьева Л.В., Калугина О.В., Оскорбина М.В., Харпухаева Т.М. Особенности элементного состава и пигментного комплекса хвои лиственницы сибирской при воздействии выбросов Иркутского алюминиевого завода // Сиб. лесн. журн. 2022. № 1. С. 20–32.

Afnas'eva L.V., Kalugina O.V., Oskorbina M.V., Kharpukhaeva T.M. Features of Elemental Composition and Pigment Complex of Siberian Larch Needles under Impact of Irkutsk Aluminum Smelter Emissions. *Sibirskij lesnoj zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2022, no. 1, pp. 20–32. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/SJFS20220102>

2. Виноградов А.П. Средние содержания химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры // Геохимия. 1962. № 7. С. 555–571.

Vinogradov A.P. Average Contents of Chemical Elements in the Main Types of Igneous Rocks of the Earth's Crust. *Geokhimiya*, 1962, no. 7, pp. 555–571. (In Russ.).

3. Войткевич Г.В., Кокин А.В., Мирошников А.Е., Прохоров В.Г. Справочник по геохимии. М.: Недра, 1990. 480 с.

Vojtkevich G.V., Kokin A.V., Miroshnikov A.E., Prokhorov V.G. *Handbook of Geochemistry*. Moscow, Nedra Publ., 1990. 480 p. (In Russ.).

4. Гиниятуллин Р.Х., Бактыбаева З.Б. Особенности накопления Cd и Ni лиственницей Сукачева (*Larix sukaczewii* Dyl.) в условиях техногенеза // Вестн. Томск. гос. ун-та. Биология. 2020. № 51. С. 141–161.

Giniyatullin R.Kh., Baktybaeva Z.B. Features of Cd and Ni Accumulation by *Larix sukaczewii* Dyl. under Technogenesis. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya* = Tomsk State University Journal of Biology, 2020, no. 51, pp. 141–161. (In Russ.). <https://doi.org/10.17223/19988591/51/8>

5. Замана Л.В., Лесников Ю.В. Фтор в соке березы как индикатор флюоритового оруденения // Докл. АН СССР. 1989. Т. 306, № 3. С. 700–703.

Zamana L.V., Lesnikov Yu.V. Fluorine in Birch Sap as an Indicator of Fluorite Mineralization. *Doklady Akademii nauk SSSR*, 1989, vol. 306, no. 3, pp. 700–703. (In Russ.).

6. Звягинцев В.В., Звягинцева О.Ю. Влияние выбросов автотранспорта на защитные леса в условиях Восточного Забайкалья // *Международ. науч.-исслед. журн.* 2016. № 5(47), ч. 5. С. 69–72.

Zvyagintsev V.V., Zvyaginiceva O.Yu. Effect of Emission Vehicles for Protective Forests in the Eastern Transbaikalia. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal = International Research Journal*, 2016, no. 5(47), pp. 69–72. (In Russ.). <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.47.165>

7. Звягинцева О.Ю. Оценка качества атмосферного воздуха по величине флуктуирующей асимметрии березы повислой (на примере урбанизированных и ООПТ Восточного Забайкалья) // *Вестн. КрасГАУ*. 2012. № 7(70). С. 78–82.

Zvyagintseva O.Yu. Atmospheric Air Quality Estimation on the *Betula Pendula* Roth Fluctuating Asymmetry Size (on the Example of the Urbanized and Spin Areas in Eastern Transbaikalia). *Vestnik KrasGAU = The Bulletin of KrasGAU*, 2012, no. 7, pp. 78–82. (In Russ.).

8. Иванова А.В. Аккумуляция химических элементов хвоей *Thuja occidentalis* L. в урбоэкосистеме // *Весн. Віцебск. дзяржаўн. ун-та*. 2010. № 6(60). С. 48–52.

Ivanova A.V. Accumulation of Chemical Elements by Needles *Thuja occidentalis* L. in the Urban Area. *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of the Vitebsk State University*, 2010, no. 6(60), pp. 48–52. (In Russ.).

9. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.

Kabata-Pendias A., Pendias Kh. *Microelements in Soils and Plants*. Moscow, Mir Publ., 1989. 439 p. (In Russ.).

10. Коваленкер В.А., Абрамов С.С., Киселева Г.Д., Крылова Т.Л., Языкова Ю.И., Бортник Н.С. Крупное Быстринское Cu–Au–Fe-месторождение (Восточное Забайкалье) – первый в России пример ассоциированной с адакитами скарново-порфировой рудообразующей системы // *Докл. АН*. 2016. Т. 468, № 5. С. 547–552.

Kovalenker V.A., Abramov S.S., Kiseleva G.D., Krylova T.L., Yazykova Yu.I., Bortnikov N.S. The Large Bystrinskoe Cu–Au–Fe Deposit (Eastern Trans-Baikal Region): Russia's First Example of a Skarn–Porphyry Ore-Forming System Related to Adakite. *Doklady Akademii Nauk = Doklady Earth Sciences*, 2016, vol. 468, pp. 566–570. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S1028334X1606012X>

11. Коваленкер В.А., Трубкин Н.В., Абрамова В.Д., Плотинская О.Ю., Киселева Г.Д., Борисовский С.Е., Языкова Ю.И. Типоморфные характеристики молибденита Быстринского Cu–Au–скарново-порфирового месторождения (Восточное Забайкалье, Россия) // *Геология руд. месторождений*. 2018. Т. 60, № 1. С. 68–90.

Kovalenker V.A., Trubkin N.V., Abramova V.D., Plotinskaya O.Yu., Kiseleva G.D., Borisovskii S.E., Yazykova Yu.I. Typomorphic Characteristics of Molybdenite from the Bystrinsky Cu–Au Porphyry–Skarn Deposit, Eastern Transbaikalia Region, Russia. *Geologiya rudnykh mestorozhdenij = Geology of Ore Deposits*, 2018, vol. 60, pp. 62–81. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S107570151801004X>

12. Котович А.А., Гуман О.М., Макаров А.Б., Антонова И.А. Эколого-геохимическая оценка почв на территории проектируемого Быстринского ГОКа // *Изв. Урал. гос. горн. ун-та*. 2013. № 2(30). С. 21–25.

Kotovich A.A., Guman O.M., Makarov A.B., Antonova I.A. Ecological and Geochemical Assessment of Soils on the Territory of the Projected Bystrinsky Mining and Processing Plant. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta = News of the Ural State Mining University*, 2013, no. 2(30), pp. 21–25. (In Russ.).

13. Макаров В.П., Борзенко С.В., Помазкова Н.В., Желибо Т.В. Особенности накопления химических элементов в хвое лиственницы Гмелина, произрастающей в районе Удоканского месторождения меди // *Химия растит. сырья*. 2021. № 2. С. 191–200.

Makarov V.P., Borzenko S.V., Pomazkova N.V., Zhelibo T.V. Features of the Content of Chemical Elements in the Coniferous Larch Gmelina in the Area of the Udokan Copper Deposit. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja*, 2021, no. 2, pp. 191–200. (In Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.2021028832>

14. Толстов А.В., Гунин А.П. Комплексная оценка Томторского месторождения // Вестн. ВГУ. Сер.: Геология. 2001. Вып. 11. С. 144–160.

Tolstov A.V., Gunin A.P. Comprehensive Assessment of the Tomtorskoye Deposit. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologija* = Proceedings of the Voronezh State University. Series: Geology, 2001, iss. 11, pp. 144–160. (In Russ.).

15. Экспериандова Л.П., Беликов К.Н., Химченко С.В., Бланк Т.А. Еще раз о пределах обнаружения и определения // Журн. аналит. химии. 2010. Т. 65, № 3. С. 229–234.

Eksperiandova L.P., Belikov K.N., Khimchenko S.V., Blank T.A. Once Again about Determination and Detection Limits. *Zhurnal analiticheskoy khimii* = Journal of Analytical Chemistry, 2010, vol. 65, pp. 223–228. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S1061934810030020>

16. Desai M.A. *Phytoremediation: a Tool for Restoring Land Degraded Due to Open-cast Coal Mining*: PhD. Oxford Brookes University, 2013. 319 p.

17. Hu Z., Richter H., Sparovek G., Schnug E. Physiological and Biochemical Effects of Rare Earth Elements on Plants and Their Agricultural Significance: a Review. *Journal of Plant Nutrition*, 2004, no. 27, iss. 1, pp. 183–220. <https://doi.org/10.1081/PLN-120027555>

18. Kasimov N.S., Kosheleva N.E., Timofeev I.V. Ecological and Geochemical Assessment of Woody Vegetation in Tungsten-Molybdenum Mining Area (Buryat Republic, Russia). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016. vol. 41, art. no. 012026. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/41/1/012026>

19. Klink A., Letachowicz B., Krawczyk J., Wisocka M. The Content of Heavy Metals in Soil and Silver Birch Leaves (*Betula pendula* Roth.) from Wałbrzych and Gogow. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2006, vol. 15, no. 2a, pp. 347–350.

20. Mikhailova T.A., Shergina O.V., Kalugina O.V. Accumulation and Migration of Elements-Pollutants in “Soil-Plant” System within Urban Territory. *Natural Science*, 2013, vol. 5, no. 6, pp. 705–709. <https://doi.org/10.4236/ns.2013.56087>

21. Navrátil T., Nováková T., Shanley J.B., Rohovec J., Matoušková S., Vaňková M., Norton S.A. Larch Tree Rings as a Tool for Reconstructing 20th Century Central European Atmospheric Mercury Trends. *Environmental Science & Technology*, 2018, no. 52(19), pp. 11060–11068. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02117>

22. Piotrowska K., Panek E. Testing of Selected Phytoindicators for the Environmental Assessment of Areas under Various Levels of Pollution. *Geomatics and Environmental Engineering*, 2012, vol. 6, no. 4, pp. 73–81. <http://dx.doi.org/10.7494/geom.2012.6.4.73>

23. Samecka-Cymerman A., Kolon K., Kempers A.J. A Preliminary Investigation in Using *Pohlia Nutans* and *Larix Decidua* as Biomonitors of Air Pollution by the Coke Industry in Wałbrzych (SW Poland). *Polish Journal of Environmental Studies*, 2008, vol. 17, iss. 1, pp. 121–128.

24. Vosel Y., Belyanin D., Melgunov M., Vosel S., Mezina K., Kropacheva M., Shcherbov B. Accumulation of Natural Radionuclides (^7Be , ^{210}Pb) and Micro-Elements in Mosses, Lichens and Cedar and Larch Needles in the Arctic Western Siberia. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, vol. 28, pp. 2880–2892. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10615-4>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article