

УДК 581.192: 674.032.475.354

ОСОБЕННОСТИ МАКРО- И МИКРОЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ХВОИ *LARIX GMELINII* В ЗОНЕ РАЗГРУЗКИ ТЕРМАЛЬНЫХ ВОД

© Л.В. Афанасьева*, Т.А. Аюшина, Ю.А. Рупышев

Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН, ул. Сахьяновой,
6, Улан-Удэ, 670047, Россия, afanl@mail.ru

В статье представлены материалы по исследованию особенностей накопления 26 химических элементов в хвое лиственницы Гмелина (*Larix gmelinii* (Rupr.), семейство *Pinaceae*, произрастающей в зоне разгрузки термальных вод Кучигерского источника в контрастных геохимических условиях. Установлено, что для большей части исследуемых элементов величины коэффициентов вариации соответствуют очень высокому (Ba, Cr, La, Li, Na, Ni, Sr, Cd, Sc), высокому (K, V, As, Se) и повышенному (Ca, Mn, Al, Zn) уровню изменчивости, что свидетельствует о значимом влиянии эдафических условий на элементный состав хвои. Средний и низкий уровни изменчивости отмечены для S, P, Mg, Fe, Cu, Co, Pb, Ti, Y. Отличительной особенностью хвои *L. gmelinii* в зоне разгрузки гидротерм является повышенное, по сравнению с фоном, содержание Li (в 5.9–8.9 раз) и Na (в 1.9–3.1 раза). На основании расчетов коэффициента биологического поглощения на фоновой территории выделены элементы энергичного накопления деревьями лиственницы (P, S), сильного накопления (Ca, K, Mg, Mn, Sr, Zn, Cu, Cr, Ni, As, Cd), слабого накопления (Na, Ba, Li, Pb, Sc), слабого захвата (Fe, Al, Ti, Se, V, La, Co, Y). Отмечено, что в зоне разгрузки термальных вод интенсивность аккумуляции химических элементов деревьями изменяется, линейная зависимость коэффициента биологического поглощения от температуры термальных вод установлена для Sr ($r=0.92$, $P<0.05$, $n=15$) и Cr, Ni ($r=-0.85$, $P<0.05$, $n=15$).

Ключевые слова: *Larix gmelinii*, хвоя, макроэлементы, микроэлементы, Кучигерский термальный источник.

Для цитирования: Афанасьева Л.В., Аюшина Т.А., Рупышев Ю.А. Особенности макро- и микроэлементного состава хвои *Larix Gmelinii* в зоне разгрузки термальных вод // Химия растительного сырья. 2024. №3. С. 294–301. DOI: 10.14258/jcprn.20240313362.

Введение

Лиственница Гмелина (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.), семейство *Pinaceae*, – одна из основных лесообразующих пород Байкальского региона, древесина которой активно используется в деревообрабатывающей, целлюлозно-бумажной, лесохимической и фармацевтической промышленности. Из широкого ряда биологически активных веществ (БАВ), содержащихся в древесине лиственницы, наибольшую практическую значимость для фармакологии представляют водорастворимый полисахарид арабиногалактан и флавоноид дигидрокверцетин, обладающие антиоксидантным, противовоспалительным и иммуномодулирующим действием [1–3]. Получаемый из лиственничной живицы скипидар входит в состав мазей, пластырей, используемых как наружное раздражающее и отвлекающее средство при ревматизме, миозитах, невралгии и других случаях [4]. Несмотря на то, что вид не является фармакопейным, хвоя *L. gmelinii* находит широкое применение в народной медицине для лечения авитаминозов, кишечных, респираторных заболеваний [4, 5].

Обширный ареал *L. gmelinii*, который почти полностью совпадает с зоной распространения многолетней мерзлоты, свидетельствует об ее уникальных адаптационных возможностях и способностях формировать своеобразные экотипы в специфических условиях среды. Совместное действие климатических и эдафических факторов среды могут в значительной степени изменять питательный статус растений и, как следствие, уровень накопления БАВ, синтез которых часто напрямую зависит от содержания эссенциальных макро- и микроэлементов. Известно, что каждый эссенциальный элемент при наличии его биологически доступной формы в достаточной концентрации выполняет или активизирует в организме растения специфические функции [6, 7]. Анализ литературных данных показал, что элементный состав хвои *L. gmelinii* до

* Автор, с которым следует вести переписку.

сих пор слабо изучен [8–10], поэтому важным представляется проведение исследований, направленных на изучение его пластичности в контрастных геохимических условиях среды.

Территории с выходами на поверхность термальных вод представляют в этом плане особый интерес, поскольку за счет поступления на поверхность глубинного тепла и некоторых элементов, содержащихся в водах и газах в зонах разломов, здесь формируются специфические геохимические ландшафты [11, 12]. Например, характерной особенностью зоны разгрузки термальных вод Кучигерского источника является чередование на малых расстояниях своеобразных типов почв с признаками засоления, турбации, глееватости, а их геохимическая контрастность проявляется в аномально высоких концентрациях серы, бария, стронция, натрия, фосфора [13, 14]. При этом растительность меняется от зональной светлохвойной тайги на границах и за пределами источника до азональных болотных сообществ в местах разгрузки термальных вод [15].

Цель данной работы – изучение особенностей накопления химических элементов в хвое *L. gmelinii*, произрастающей на территории Кучигерского термального источника.

Экспериментальная часть

Исследования были проведены на северо-востоке Баргузинской котловины возле д. Кучигер Курумканского района Республики Бурятия, на территории Кучигерского термального источника. По химическому составу термы относятся к фтористому сероводородному гидрокарбонатно-сульфатному натриевому (кульдурскому) типу и характеризуются низкой минерализацией, высоким содержанием кремниевой кислоты, сильнощелочной реакцией (рН 9.28–9.90), термальностью (40–50 °С). В водах такого типа отмечаются высокие концентрации целого ряда элементов – S, Si, F, Li, Sr, Ba [13].

Для отбора хвои лиственницы было заложено три ключевых участка (КУ): КУ-1 – вблизи выхода высокотемпературных грифонов, над которыми сделаны постройки для принятия грязевых ванн (бани), где встречаются одиночные деревья лиственницы, не формирующие сомкнутых сообществ на торфяно-перегнойно-глеевых почвах; КУ-2 – на расстоянии 30 м от выхода низкотемпературных грифонов («сердечный источник», воду которого используют для питья в целях профилактики сердечно-сосудистых заболеваний), где сформированы разреженные лиственничные сообщества на торфяно-перегнойно-глеевых почвах; КУ-3 – на расстоянии 20 км от источника в верховьях р. Индихэн в сосняке рододендроновом (6С4Л) на дерново-подбурях (условный фон, территория вне зоны разгрузки гидротерм).

На каждом КУ с 5–7 деревьев срезали охвоенные побеги 2-го года жизни, а также отбирали почвенные образцы из верхнего 5–40 см слоя почвы. В лабораторных условиях хвою и почвенные образцы высушивали до воздушно-сухого состояния, после чего измельчали и просеивали. Далее растительные образцы минерализовали в муфельной печи при 450 °С в течение 3 ч, золу растворяли в 0.1 М азотной кислоте. Для разложения почвенных образцов использовалась смесь фтористоводородной, хлорной и азотной кислот (ГОСТ ПНД Ф 16.1:2.3:3.11–98). В полученных растворах содержание 26 элементов (Al, As, Ba, Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cu, Fe, K, La, Li, Mg, Mn, Na, Ni, P, Pb, S, Sc, Sr, Ti, V, Y, Zn) определяли атомно-эмиссионным методом на спектрометре SPECTRO ARCOS в аккредитованной лаборатории ГКК ГП «РАЦ» (г. Улан-Удэ, аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.511112). Для контроля аналитического качества процедур использовались стандартные образцы ГСО РМ 68, ГСО 2508, ГСО 2499, ОСО 10235, относительная ошибка метода не превышала 5–10%. Все анализы выполнены в пяти биологических повторностях.

О биологической доступности элементов в почвах судили по коэффициенту биологического поглощения (КБП) – отношению содержания элемента в золе растений к валовому его содержанию в почве. По КБП элементы были разделены на группы: 1) энергичного накопления ($100 > КБП \geq 10$); 2) сильного накопления ($10 > КБП \geq 1$); 3) слабого накопления и среднего захвата ($1 > КБП \geq 0.1$); 4) слабого захвата ($0.1 > КБП \geq 0.01$), 5) очень слабого захвата $0.01 > КБП \geq 0.001$ [16].

Статистическую обработку результатов проводили с использованием стандартных методов и пакета PAST v3.17. Оценку изменчивости (вариабельности) химического состава хвои на обследованной территории проводили по значению коэффициента вариации (C_v , %) с учетом шкалы уровней изменчивости, предложенной С.А. Мамаевым [17]: очень низкий – меньше 7%; низкий – 7–15%; средний – 16–25%; повышенный – 26–35%; высокий – 36–50%; очень высокий – больше 50%. Различия между КУ оценивали с помощью пакета several-sample tests (ANOVA, Kruskal-Wallis), при значимом результате использовали критерий множественного сравнения (Tukey's test, $p < 0.05$).

Обсуждение результатов

Как уже было отмечено, контрастность геохимических условий на обследованной территории обусловлена значительной вариабельностью химического состава почв. Кислотность почвенного раствора меняется от слабокислой на фоновом КУ (КУ-3, pH=5.9) до слабощелочной в зоне выхода высокотемпературных грифонов (КУ-1, pH=7.1) и щелочной в зоне выхода низкотемпературных грифонов (КУ-2, pH=8.1).

Отличительной особенностью почв в зоне разгрузки гидротерм является высокое содержание серы (в 11.7–14.8 раза выше по сравнению с фоновым КУ) (табл. 1). Учитывая то, что сера не является типоморфным элементом ландшафтов Забайкалья, ее высокие концентрации в почвах могут свидетельствовать об эндогенном поступлении в составе растворенных солей и газов и служить своеобразным маркером разгрузки глубинных флюидов. Кроме того, в верхнем слое торфяно-перегнойно-глеевых почв наблюдаются более низкие концентрации щелочных элементов лития (в 2.5–4.8 раза), калия (в 3.9–6.9 раза), натрия (4.2–6.4 раза), а также щелочноземельного элемента бария (4.1–5.9 раза) по сравнению с дерново-подбурами на фоновом КУ. Причины низкого содержания этих элементов, возможно, разные. Известно, что гидротермальный процесс способствует переходу щелочных элементов из минеральных пород в раствор, а наиболее интенсивно этот процесс протекает при низкотемпературных режимах [18]. Барий, напротив, в среде, обогащенной сульфатами, часто образует труднорастворимые соли (бариты). Схожая тенденция низкого содержания щелочных элементов (в частности, натрия) в органогенных горизонтах болотных почв по сравнению с минеральными в районе Кучигерского источника была отмечена нами ранее [19].

В верхних горизонтах торфяно-перегнойно-глеевых почв содержание алюминия и элементов группы железа также было ниже, чем в дерново-подбурах, при этом наибольшие различия наблюдались в зоне выхода низкотемпературных грифонов. Так, концентрация алюминия, ванадия, железа, кобальта, скандия, титана в почвах в зоне выхода низкотемпературных грифонов была меньше в 4.1–7.2 раза, а в зоне выхода высокотемпературных грифонов – в 2.2–3.6 раза. Уровень хрома, никеля, а также меди, лантана и цинка был ниже в 2.4–3.6 раза и 1.4–1.7 раза соответственно. Это, на наш взгляд, может быть связано как с процессом вымывания металлов и водорастворимых органических соединений, таких как фульвокислоты, с которыми связаны некоторые металлы, так и с подщелачиванием корнеобитаемого горизонта и осаждением металлов на щелочных барьерах с образованием трудно растворимых гидроокислов. Исследования, проведенные А.Д. Жамбаловой [13], показали, что в зоне разгрузки гидротерм в гумидных ландшафтах наблюдается увеличение содержания щелочных, щелочноземельных элементов, элементов группы железа вниз по профилю почв, т.е. наибольшее накопление элементов происходит в минеральных горизонтах, что может быть связано с их закреплением на сорбционном барьере.

При сравнении полученных нами данных с кларком литосферы отмечено, что корнеобитаемый слой в зоне разгрузки гидротерм обогащен серой (коэффициент концентрации (K_k) = 5.9–7.5), стронцием (K_k = 1.4–1.9) и кадмием (K_k = 2.4–2.6), близкие к кларку концентрации характерны для кальция, фосфора и мышьяка, тогда как содержание остальных элементов находилось ниже кларковых значений (K_k = 1.4–9.1). В лесных сообществах вне зоны разгрузки гидротерм в почвах отмечается более низкое по сравнению с кларком содержание фосфора, магния, серы, марганца, железа, хрома, никеля, церия, ванадия, кобальта (K_k = 1.5–2.9), но повышенное – стронция, бария и кадмия (K_k = 2.1–3.4).

Анализ вариабельности концентрации макро- и микроэлементов в хвое *L. gmelinii* на обследованной территории показал, что для большей части элементов величины коэффициентов вариации соответствуют очень высокому (Ba, Cr, La, Li, Na, Ni, Sr, Cd, Sc), высокому (K, V, As, Se) и повышенному (Ca, Mn, Al, Zn) уровню изменчивости, что свидетельствует о значимом влиянии эдафических условий на элементный состав хвои, а также способности деревьев к избирательному накоплению этих элементов в зависимости от геохимической обстановки (табл. 1). Средний и низкий уровни изменчивости ($C_v < 25\%$) отмечены для S, P, Mg, Fe, Cu, Co, Pb, Ti, Y.

Характерной особенностью хвои *L. gmelinii* в зоне разгрузки Кучигерских гидротерм является повышенное, по сравнению с фоном, содержание лития (в 5.9–8.9 раза). Поскольку литий не относится к жизненно необходимым элементам, резкое увеличение его концентрации в ассимилирующей фитомассе, возможно, связано с поступлением с транспирационными токами воды. Также в хвое отмечается увеличение по сравнению с фоном содержания натрия в 1.9–3.1 раза и уменьшение бария – в 2.5–3.2 раза, кальция – в 1.5–1.7 раза, лантана – в 2.1–3.1 раза, никеля – в 3.1–3.9 раза и хрома – в 3.4–5.2 раза.

Таблица 1. Концентрация химических элементов в золе хвои *Larix gmelinii* в зоне разгрузки термальных вод и на фоновой территории (мг/кг)

Элемент	Концентрация в хвое			Cv, %	Кларк*	Концентрация в почве			Cv, %	Кларк**
	Ключевой участок					Ключевой участок				
	KY-1	KY-2	KY-3			KY-1	KY-2	KY-3		
Ca	54834 ^c	61517 ^b	93733 ^a	29	30000	22811 ^a	29400 ^a	24118 ^a	4	25660
K	39487 ^b	74240 ^a	38960 ^b	39	30000	5893 ^b	3300 ^c	23000 ^a	99	23240
P	29040 ^b	33701 ^{ab}	35908 ^a	11	70000	632 ^b	1400 ^a	448 ^c	61	690
Mg	20080 ^c	24275 ^b	27208 ^a	15	70000	4255 ^b	2658 ^c	6764 ^a	45	14950
S	14282 ^a	10734 ^b	14574 ^a	16	50000	7144 ^a	5600 ^b	476 ^c	79	953
Mn	2641 ^b	4600 ^a	4635 ^a	29	7500	219 ^c	322 ^b	473 ^a	38	770
Na	4334 ^b	7179 ^a	2312 ^c	53	20000	5500 ^b	3600 ^c	23145 ^a	100	24260
Fe	1244 ^c	1459 ^b	1713 ^a	16	10000	9500 ^b	6300 ^c	25654 ^a	75	40600
Sr	2837 ^a	1261 ^b	1291 ^b	51	300	504 ^b	390 ^c	620 ^a	23	270
Al	670 ^c	1409 ^a	1124 ^b	35	14000	24700 ^b	10700 ^c	70000 ^a	88	76100
Ba	287 ^c	367 ^b	931 ^a	66	100	320 ^b	227 ^c	1332 ^a	98	628
Zn	202 ^b	304 ^a	357 ^a	27	900	43.19 ^b	22.61 ^c	72.61 ^a	54	75
Cu	61.1 ^c	71.2 ^b	89.7 ^a	20	200	14.71 ^b	9.52 ^c	22.97 ^a	43	27
Cr	16.1 ^c	24.4 ^b	83.8 ^a	89	250	24.97 ^b	12.42 ^c	36.39 ^a	48	92
Ti	99.4 ^a	58.2 ^c	80.9 ^b	25	1000	1388 ^b	430 ^c	3140 ^a	83	3900
Ni	11.2 ^c	14.6 ^b	44.7 ^a	78	50	14.92 ^b	7.54 ^c	20.26 ^a	45	50
As	9.18 ^a	6.01 ^b	5.12 ^b	38	3	5.42 ^a	4.64 ^a	5.02 ^a	8	5.6
Li	35.2 ^a	33.4 ^a	3.94 ^b	76	11	9.15 ^b	4.72 ^c	22.51 ^a	76	32
Ce	2.81 ^a	1.21 ^b	2.12 ^a	39	0.1	42.59 ^a	9.69 ^b	45.13 ^a	61	70
V	2.82 ^a	1.49 ^b	1.58 ^b	38	61	42.02 ^b	12.54 ^c	61.32 ^a	64	106
Sc	1.39 ^a	0.41 ^b	1.52 ^a	57	0.09	5.79 ^a	1.87 ^b	6.94 ^a	55	10
La	0.46 ^c	0.68 ^b	1.43 ^a	59	0.1	7.68 ^b	7.62 ^b	27.72 ^a	81	32
Cd	0.06 ^b	1.14 ^a	1.41 ^a	46	0.1	0.24 ^b	0.22 ^b	0.31 ^a	18	0.09
Pb	2.02 ^a	1.58 ^b	1.38 ^b	18	10	7.62 ^b	2.94 ^c	13.94 ^a	68	17
Co	0.69 ^a	0.52 ^a	0.67 ^a	16	15	5.44 ^b	1.11 ^c	7.62 ^a	70	15
Y	0.51 ^a	0.50 ^a	0.46 ^a	5	1	7.83 ^b	2.36 ^c	14.01 ^a	72	20

Примечание: * приведены данные по [20], ** приведены данные по [21], разные буквы в одном ряду представляют статистически значимые различия между КУ ($P < 0.05$, $n=15$).

Обнаружено, что температурный режим грифонов оказывает влияние на аккумуляцию некоторых химических элементов. Так, в зоне выхода высокотемпературных грифонов в хвое наблюдается повышение по сравнению с фоном уровня ванадия, мышьяка, стронция в 1.8–2.2 раза, а содержание железа, меди, алюминия, марганца, цинка, напротив, снижается в 1.5–1.8 раза (табл. 1). В зоне выхода низкотемпературных грифонов в хвое *L. gmelinii* отмечено увеличение концентрации калия в 1.9 раза и снижение церия в 1.8 раза и скандия в 3.7 раза. Учитывая, что калий является одним из основных элементов, необходимых для работы сердечной мышцы, вероятно, вода низкотемпературных гидротерм обогащена им, а деревья лиственницы аккумулируют растворенный в воде калий с транспирационными токами.

Интересно, что при высоком содержании серы в почвах в зоне разгрузки гидротерм, в хвое деревьев концентрация этого элемента варьировала незначительно ($Cv = 16\%$), что может свидетельствовать о наличии барьерных механизмов в корневой системе, препятствующих избыточному поступлению серы в ассимилирующую фитомассу.

В рядах накопления элементов, построенных на основе их количественного содержания в хвое *L. gmelinii*, последовательность макроэлементов (кальций, калий, фосфор, магний, сера) достаточно стабильна (незначительное превышение концентрации калия над кальцием отмечено на КУ-2). В зоне разгрузки гидротерм в группу большей концентрации переходит только литий, внутри своих концентрационных групп перемещаются натрий, стронций, титан, ванадий, свинец. В группу меньшей концентрации переходят алюминий, лантан, кадмий в зоне выхода высокотемпературных гидротерм и лантан, скандий в зоне выхода низкотемпературных гидротерм.

$$KY-1 \quad \frac{Ca > K > P > Mg > S}{n} > \frac{Na > Sr > Mn > Fe}{n \times 10^{-1}} > \frac{Al > Ba > Zn}{n \times 10^{-2}} > \frac{Ti > Cu > Li > Cr > Ni}{n \times 10^{-3}} > \frac{As > V > Ce > Pb > Sc}{n \times 10^{-4}} > \frac{Co > Y > La > Cd}{n \times 10^{-5}} \text{ мг/кг}$$

$$KY-2 \quad \frac{K > Ca > P > Mg > S}{n} > \frac{Na > Mn > Fe > Al > Sr}{n \times 10^{-1}} > \frac{Ba > Zn}{n \times 10^{-2}} > \frac{Cu > Ti > Li > Cr > Ni}{n \times 10^{-3}} > \frac{As > Pb > V > Ce > Cd}{n \times 10^{-4}} > \frac{La > Co > Y > Sc}{n \times 10^{-5}} \text{ мг/кг}$$

$$KV-3 \quad \frac{Ca>K>P>Mg>S}{n} > \frac{Mn>Na>Fe>Sr>Al}{n \times 10^{-1}} > \frac{Ba>Zn}{n \times 10^{-2}} > \frac{Cu>Cr>Ti>Ni}{n \times 10^{-3}} > \frac{As>Li>Ce>V>Sc>La>Cd>Pb}{n \times 10^{-4}} > \frac{Co>Y}{n \times 10^{-5} \text{ мг/кг}}$$

По сравнению с кларковыми концентрациями элементов в золе растений суши [20] в золе *L. gmelinii* повышено содержание Ca ($Kk = 1.8-3.1$), Sr ($Kk = 4.2-9.5$), Ba ($Kk = 2.9-9.3$), As ($Kk = 1.7-3.1$), Li (в зоне разгрузки гидротерм) ($Kk = 3.0-3.2$), La, Ce, Cd, Sc более чем в 10 раз. В то же время содержание P, Mg, S, Mn, Na, Al, Fe, Ti, Zn, Cu, Cr, Ni (в зоне разгрузки гидротерм), V, Pb, Co, Y было ниже кларковых значений.

Для оценки степени извлечения химических элементов из почвы деревьями и накопления их в ассимилирующей фитомассе был использован *КБП*, позволяющий косвенно судить о степени доступности элементов для растений и поведении их в системе растение – почва. Из полученных данных следует, что на фоновой территории к элементам энергичного накопления относятся фосфор и сера, сильного накопления – кальций, калий, магний, марганец, стронций, цинк, медь, хром, никель, мышьяк и кадмий, слабого накопления – натрий, барий, литий, свинец и скандий (табл. 2). Слабо захватываются деревьями железо, алюминий, титан, церий, ванадий, лантан, кобальт и иттрий. В зоне выхода низкотемпературных гидротерм в группу элементов энергичного накопления переходят калий, марганец и цинк, а в группу сильного накопления – натрий, барий и литий. Кроме того, повышается интенсивность накопления железа, алюминия, церия, ванадия, кобальта, скандия и иттрия, эти элементы переходят в группу слабого накопления. В то же время интенсивность накопления серы снижается в 16 раз. В зоне выхода высокотемпературных гидротерм повышение интенсивности накопления, по сравнению с фоновыми значениями, отмечено для марганца, лития, железа и кобальта, тогда как интенсивность накопления хрома, никеля снижается в 2.4–3.6 раза, а серы – в 16 раз. При этом линейная зависимость снижения интенсивности накопления от температуры термальных вод установлена для стронция ($r=0.92$, $P<0.05$, $n=15$), хрома и никеля ($r=-0.85$, $P<0.05$, $n=15$).

Таблица 2. Коэффициенты биологического поглощения химических элементов *Larix gmelinii* в зоне разгрузки термальных вод и на фоновой территории

Элемент	Ключевой участок		
	КУ-1	КУ-2	КУ-3(фоновая территория)
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
Ca	2.4 ^b ±0.1	2.1 ^b ±0.1	3.9 ^a ±0.8
K	6.7 ^b ±0.4	22.5 ^a ±1.2	1.7 ^c ±0.1
P	45.9 ^b ±3.6	24.1 ^c ±2.2	80.1 ^a ±4.6
Mg	4.7 ^b ±0.4	9.1 ^a ±0.6	4.1 ^b ±0.6
S	1.9 ^b ±0.1	1.9 ^b ±0.1	30.6 ^a ±2.2
Mn	12.1 ^b ±0.6	14.3 ^a ±0.4	9.9 ^c ±0.2
Na	0.8 ^b ±0.1	1.9 ^a ±0.1	0.1 ^c ±0.1
Fe	0.1 ^b ±0.1	0.2 ^a ±0.1	0.07 ^c ±0.01
Sr	5.6 ^a ±0.2	3.2 ^b ±0.2	2.1 ^c ±0.1
Al	0.03 ^b ±0.01	0.1 ^a ±0.1	0.02 ^c ±0.01
Ba	0.9 ^b ±0.1	1.6 ^a ±0.1	0.7 ^c ±0.1
Zn	4.7 ^b ±0.1	13.4 ^a ±0.6	4.9 ^b ±0.2
Ti	0.07 ^b ±0.01	0.1 ^a ±0.1	0.03 ^c ±0.01
Cu	4.1 ^b ±0.2	7.5 ^a ±0.8	3.9 ^b ±0.4
Cr	0.6 ^b ±0.1	1.9 ^a ±0.4	2.3 ^a ±0.2
Ni	0.8 ^b ±0.1	1.9 ^a ±0.6	2.2 ^a ±0.6
As	1.8 ^a ±0.2	0.9 ^b ±0.1	1.4 ^a ±0.2
Li	3.9 ^b ±0.2	5.1 ^a ±0.1	0.2 ^c ±0.1
Pb	0.3 ^b ±0.1	0.6 ^a ±0.1	0.1 ^c ±0.1
Ce	0.06 ^b ±0.01	0.1 ^a ±0.1	0.05 ^b ±0.01
V	0.07 ^b ±0.01	0.1 ^a ±0.1	0.03 ^c ±0.01
La	0.02 ^c ±0.01	0.09 ^a ±0.01	0.05 ^b ±0.01
Cd	2.5 ^b ±0.2	5.8 ^a ±0.4	4.7 ^a ±0.4
Co	0.1 ^b ±0.1	0.5 ^a ±0.1	0.09 ^b ±0.01
Sc	0.2 ^a ±0.1	0.2 ^a ±0.1	0.1 ^b ±0.1
Y	0.07 ^b ±0.01	0.2 ^a ±0.1	0.04 ^c ±0.01

Примечание: разные буквы в одном ряду представляют статистически значимые различия между КУ ($P<0.05$, $n=15$).

Полученные нами данные позволяют сделать заключение о том, что химический состав хвои *L. gmelinii* в зоне разгрузки термальных вод зависит от почвенного фонда элементов минерального питания. При уменьшении концентрации эссенциальных элементов в почве, интенсивность их поглощения, как правило, повышается. В то же время резкое увеличение концентрации серы в почве в зоне разгрузки термальных вод сопровождается резким снижением интенсивности ее поглощения, что говорит о наличии корневых барьеров, ограничивающих передвижение элемента в ассимилирующие органы. Полученные результаты имеют важное значение для экотоксикологии, поскольку часто при оценке уровня техногенного загрязнения исследователи сталкиваются с вопросом об источнике поступления (атмосферный воздух или почва) тех или иных элементов в листья растений. В отношении серы мы можем предположить, что у *L. gmelinii* существуют корневые барьеры, препятствующие избыточному поглощению элемента из почвы.

Выводы

В результате проведенных исследований установлено, что на обследованной территории эдафические условия оказывают значительное влияние на содержание химических элементов в хвое *L. gmelinii*. Очень высокий уровень изменчивости концентрации установлен для Ba, Cr, La, Li, Na, Ni, Sr, Cd, Sc, высокий – K, V, Ce, As, повышенный – Ca, Mn, Al, Zn, средний – S, P, Mg, Fe, Cu, Co, Pb, Ti, низкий – Y.

На основе количественного содержания в хвое составлены ряды накопления химических элементов. Для деревьев на фоновой территории он имеет следующий вид: Ca > K > P > Mg > S > Mn > Na > Fe > Sr > Al > Ba > Zn > Cu > Cr > Ti > Ni > As > Li > Ce > V > Sc > La > Cd > Pb > Co > Y. Установлено, что в изменяющихся геохимических условиях наиболее стабильной является последовательность макроэлементов.

На фоновой территории по интенсивности биологического поглощения из почвы деревьями P, S отнесены к группе энергичного, Ca, K, Mg, Mn, Sr, Zn, Cu, Cr, Ni, As, Cd – сильного, Na, Ba, Li, Pb, Sc – слабого накопления, а Fe, Al, Ti, Ce, V, La, Co, Y – слабого захвата. Отмечено, что в зоне разгрузки термальных вод интенсивность аккумуляции химических элементов деревьями изменяется, линейная зависимость коэффициента биологического поглощения от температуры термальных вод установлена для стронция ($r=0.92$, $P<0.05$, $n=15$), хрома и никеля ($r=-0.85$, $P<0.05$, $n=15$).

Финансирование

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Института общей и экспериментальной биологии № 121030900138-8 и гранта РФФИ № 18-04-00454А.

Конфликт интересов

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Открытый доступ

Эта статья распространяется на условиях международной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая разрешает неограниченное использование, распространение и воспроизведение на любом носителе при условии, что вы дадите соответствующие ссылки на автора(ов) и источник и предоставите ссылку на Лицензию Creative Commons и укажете, были ли внесены изменения.

Список литературы

1. Фомичев Ю.П. и др. Дигидрокверцетин и арабиногалактан – природные биорегуляторы в жизнедеятельности человека и животных, применение в сельском хозяйстве и пищевой промышленности. М., 2017. 702 с.
2. Kolhir V.K., Bykov V.A., Baginskaja A.I., Sokolov S.Y., Glazova N.G., Leskova T.E., Sakovich G.S. Antioxidant activity of a dihydroquercetin isolated from *Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr. wood // Phytotherapy research. 1996. Vol. 10. Pp. 478–482.
3. Растительные ресурсы России: компонентный состав и биологическая активность растений / отв. ред. А.Л. Буданцев. СПб.; М., 2016. Т. 7. 333 с.
4. Телятьев В.В. Полезные растения Центральной Сибири. Иркутск, 1985. 384 с.
5. Liga U., Davaasuren B., Ninjil N. Medicinal plants of Mongolia used in Western and Eastern medicine. Moscow, 2009. 378 p.
6. Васильева И.Е., Шабанова Е.В. Стандартные образцы растительных материалов – инструмент обеспечения единства химических измерений // Журнал аналитической химии. 2021. Т. 76, №2. С. 99–123. DOI: 10.31857/S0044450221020146.
7. Битюцкий Н.П. Микроэлементы высших растений. 2-е изд. СПб., 2020. 368 с.
8. Филенко Р.А., Юргенсон Г.А. Первые данные о биогеохимии растений Каменско-Черновского пегматитового поля (Восточное Забайкалье) // Ученые записки ЗабГГПУ. 2011. №1 (36). С. 209–213.

9. Попова М.Г. Микронутриентный состав древесных растений Центральной Якутии // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 2015. №6. С. 7–9.
10. 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 растительного сырья. 2021. №2. С. 191–200. DOI: 10.14258/jcprm.2021028832.
11. Вилор Н.В., Андрулайтис Л.Д., Зарубина О.В., Данилов Б.С. Геохимия сейсмоактивных региональных разломов (Байкальская рифтовая зона, Восточная Сибирь) // Геохимия. 2015. №1. С. 64–82. DOI: 10.7868/S0016752514110107.
12. Солнцева Н.П., Гольдфарб И.Л. Геохимические особенности ландшафтов современных парогидротермальных месторождений Камчатки (на примере Паужетского месторождения) // Вестник МГУ, сер. География. 1994. №2. С. 65–73.
13. Жамбалова А.Д. Засоленные почвы зон разломов Кучигерских гидротерм и их геохимические особенности: дис. ... канд. биол. наук. Улан-Удэ, 2018. 238 с.
14. Чернявский М.К., Плюснин А.М., Дорошкевич С.Г., Будаев Р.Ц. Рекреационно-бальнеологические особенности северо-восточной части Баргузинской котловины // География и природные ресурсы. 2018. №2. С. 63–72. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2018-2(63-72).
15. Убугунов В.Л., Убугунова В.И., Рупышев Ю.А., Хитров Н.Б. Почвенно-растительный покров болот и заболоченных понижений в зоне влияния термальных полей Баргузинского рифта // Природа Внутренней Азии. 2019. №3. С. 37–54. DOI: 10.18101/2542-0623-2019-3-37-53.
16. Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. М., 1999. 768 с.
17. Мамаев С.А. Основные принципы методики исследования внутривидовой изменчивости древесных растений // Индивидуальная и эколого-географическая изменчивость растений. Свердловск, 1975. С. 3–14.
18. Арсанова Г.И. Редкие щелочи в термальных водах вулканических областей. Новосибирск, 1974. 111 с.
19. Аюшина Т.А. Влияние Кучигерских гидротерм на содержание и формы натрия (Баргузинская котловина) // Природа Внутренней Азии. 2019. №3(12). С. 54–61. DOI: 10.18101/2542-0623-2019-3-54-61.
20. Алексеенко В.А., Алексеенко А.В. Химические элементы в геохимических системах. Кларки почв селитебных ландшафтов. Ростов-на-Дону, 2013. 380 с.
21. Касимов Н.С., Власов Д.В. Кларки химических элементов как эталоны сравнения в экогеохимии // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. 2015. №2. С. 7–17.

Поступила в редакцию 14 июля 2023 г.

После переработки 5 сентября 2024 г.

Принята к публикации 6 сентября 2024 г.

*Afanaseva L.V.**, *Ayushina T.A.*, *Rupyshev Yu.A.* PECULIARITIES OF THE MACRO- AND MICROELEMENT ACCUMULATION BY LARIX GMELINII NEEDLE IN THE IMPACT ZONE OF HYDROTHERMS

Institute of General and Experimental Biology SB RAS, Sakhyanova st., 6, Ulan-Ude, 670047, Russia, afanl@mail.ru

The aim of this study was to investigate the peculiarities of accumulation of 26 chemical elements in Gmelin larch needles (*Larix gmelinii* (Rupr.), *Pinaceae*) in the impact zone of Kuchiger hydrotherms (Barguzin depression, Buryat Republic, Russia). We found that the concentrations of Ba, Cr, La, Li, Na, Ni, Sr, Cd, and Sc in tree needles varied greatly across the surveyed area (coefficient of variation (CV) >50%). Strong levels of variation (CV=36–50%) were observed for K, V, Ce, and As; high levels (CV=26–35%) for Ca, Mn, Al, and Zn; medium levels (CV=16–25%) for S, P, Mg, Fe, Cu Co, Pb, Ti, low level (CV<15%) for Y. A distinctive feature of *L. gmelinii* needles in the impact zone of hydrotherms is the increased content of Li (by 5.9–8.9 times) and Na (by 1.9–3.1 times) compared to the background. The intensity of biological absorption was characterized by the biological absorption factor (BAF). In the background territory, the highest coefficients were found for P and S (BAF = 30.6–80.1). Elements with strong accumulation are Ca, K, Mg, Mn, Sr, Zn, Cu, Cr, Ni, As, Cd (BAF = 1.4–9.9); while other elements were very poorly accumulated by plants (BAF = 0.03–0.9). Under the influence of hydrotherms, the intensity of chemical elements accumulation by trees has been changed. A linear dependence of the BAF on the temperature of thermal waters was established for Sr ($r=0.92$, $P<0.05$, $n=15$) and Cr, Ni ($r=-0.85$, $P<0.05$, $n=15$).

Keywords: *Larix gmelinii*, needles, macroelements, microelements, Kuchiger thermal spring.

For citing: Afanaseva L.V., Ayushina T.A., Rupyshev Yu.A. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2024, no. 3, pp. 294–301. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.20240313362.

* Corresponding author.

References

1. Fomichev Yu.P. i dr. *Digidrokvertsetin i arabinogalaktan – prirodnyye bioregulyatory v zhiznedeyatel'nosti cheloveka i zhyvotnykh, primeneniye v sel'skom khozyaystve i pishchevoy promyshlennosti*. [Dihydroquercetin and arabinogalactan – natural bioregulators in human and animal life, application in agriculture and food industry]. Moscow, 2017, 702 p. (in Russ.).
2. Kolhir V.K., Bykov V.A., Baginskaja A.I., Sokolov S.Y., Glazova N.G., Leskova T.E., Sakovich G.S. *Phytotherapy research*, 1996, vol. 10, pp. 478–482.
3. *Rastitel'nyye resursy Rossii: komponentnyy sostav i biologicheskaya aktivnost' rasteniy* [Plant resources of Russia: component composition and biological activity of plants], ed. A.L. Budantsev. St. Petersburg; Moscow, 2016, vol. 7, 333 p. (in Russ.).
4. Telyat'yev V.V. *Poleznyye rasteniya Tsentral'noy Sibiri*. [Useful plants of Central Siberia]. Irkutsk, 1985, 384 p. (in Russ.).
5. Ligaa U., Davaasuren B., Ninjil N. *Medicinal plants of Mongolia used in Western and Eastern medicine*. Moscow, 2009, 378 p.
6. Vasil'yeva I.Ye., Shabanova Ye.V. *Zhurnal analiticheskoy khimii*, 2021, vol. 76, no. 2, pp. 99–123. DOI: 10.31857/S0044450221020146. (in Russ.).
7. Bityutskiy N.P. *Mikroelementy vysshikh rasteniy. 2-ye izd.* [Microelements of higher plants. 2nd ed.]. St. Petersburg, 2020, 368 p. (in Russ.).
8. Filenko R.A., Yurgenson G.A. *Uchenyye zapiski ZabGGPU*, 2011, no. 1 (36), pp. 209–213. (in Russ.).
9. Popova M.G. *Doklady Rossiyskoy akademii sel'skokhozyaystvennykh nauk*, 2015, no. 6, pp. 7–9. (in Russ.).
10. Makarov V.P., Borzenko S.V., Pomazkova N.V., Zhelibo T.V. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2021, no. 2, pp. 191–200. DOI: 10.14258/jcprm.2021028832. (in Russ.).
11. Vilor N.V., Andrulaytis L.D., Zarubina O.V., Danilov B.S. *Geokhimiya*, 2015, no. 1, pp. 64–82. DOI: 10.7868/S0016752514110107. (in Russ.).
12. Solntseva N.P., Gol'dfarb I.L. *Vestnik MGU, ser. Geografiya*, 1994, no. 2, pp. 65–73. (in Russ.).
13. Zhambalova A.D. *Zasolennyye pochvy zon razlomov Kuchigerskikh gidroterm i ikh geokhimicheskiye osobennosti: dis. ... kand. biol. nauk*. [aline soils of fault zones of the Kuchiger hydrotherms and their geochemical features: dis. ... cand. biol. Sci.]. Ulan-Ude, 2018, 238 p. (in Russ.).
14. Chernyavskiy M.K., Plyusnin A.M., Doroshkevich S.G., Budayev R.Ts. *Geografiya i prirodnyye resursy*, 2018, no. 2, pp. 63–72. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2018-2(63-72). (in Russ.).
15. Ubugunov V.L., Ubugunova V.I., Rupyshev Yu.A., Khitrov N.B. *Priroda Vnutrenney Azii*, 2019, no. 3, pp. 37–54. DOI: 10.18101/2542-0623-2019-3-37-53. (in Russ.).
16. Perel'man A.I., Kasimov N.S. *Geokhimiya landshafta*. [Geochemistry of the landscape]. Moscow, 1999, 768 p. (in Russ.).
17. Mamayev S.A. *Individual'naya i ekologo-geograficheskaya izmenchivost' rasteniy*. [Individual and ecological-geographical variability of plants]. Sverdlovsk, 1975, pp. 3–14. (in Russ.).
18. Arsanova G.I. *Redkiye shchelochi v termal'nykh vodakh vulkanicheskikh oblastey*. [Rare alkalis in thermal waters of volcanic regions]. Novosibirsk, 1974, 111 p. (in Russ.).
19. Ayushina T.A. *Priroda Vnutrenney Azii*, 2019, no. 3(12), pp. 54–61. DOI: 10.18101/2542-0623-2019-3-54-61. (in Russ.).
20. Alekseyenko V.A., Alekseyenko A.V. *Khimicheskiye elementy v geokhimicheskikh sistemakh. Klarki pochv selitebnykh landshaftov*. [Chemical elements in geochemical systems. Clarks of soils of residential landscapes]. Rostov-on-Don, 2013, 380 p. (in Russ.).
21. Kasimov N.S., Vlasov D.V. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 5. Geografiya*, 2015, no. 2, pp. 7–17. (in Russ.).

Received July 14, 2023

Revised September 5, 2024

Accepted September 6, 2024

Сведения об авторах

Афанасьева Лариса Владимировна – старший научный сотрудник, кандидат биологических наук, afanl@mail.ru
Аюшина Туяна Аюшиевна – научный сотрудник, кандидат биологических наук, tu yana2602@mail.ru
Рупышев Юрий Алексеевич – научный сотрудник, кандидат биологических наук, rupyshev@mail.ru

Information about authors

Afanaseva Larisa Vladimirovna – senior researcher, candidate of biological sciences, afanl@mail.ru
Ayushina Tuyana Ayushievna – researcher, кандидат биологических наук, tu yana2602@mail.ru
Rupyshev Yuri Alekseevich – researcher, candidate of biological sciences, rupyshev@mail.ru