УДК 546.831:577.170.49(571.54)

ЦИРКОНИЙ В КОМПОНЕНТАХ ЛАНДШАФТОВ ЗАПАДНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ

© 2017 г. В.К. Кашин

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

E-mail: kashin-39@mail.ru

Поступила в редакцию 28.07.2016 г.

Изучено содержание циркония в почвообразующих породах, почвах и растительности лесостепных, степных и пойменных ландшафтов Забайкалья. Среднее региональное содержание Zr в почвообразующих породах было равно 1.75 от его кларка в осадочных породах, в почвах – 1.13 от его среднего содержания в почвах мира. Среднее содержание циркония в растительности составило: в культурной злаковой – 1.79, в луговой нормального увлажнения – 1.81, в луговой болотистой – 2.55, в степной – 3.15 мг/кг сухого вещества, что равно 0.24–0.42 от его кларка в растительности континентов. Цирконий отнесен к элементам с очень низкой интенсивностью поглощения из минеральных почв (КБП = 0.10–0.12).

Ключевые слова: цирконий, компоненты ландшафтов, Западное Забайкалье.

ВВЕДЕНИЕ

Цирконий широко распространен в природе: по содержанию в земной коре он занимает 19-е место среди химических элементов. Цирконий – элемент 11а-группы периодической системы с электронной конфигурацией атомов $4d^2 5s^2$, проявляющих валентность +2, +3, +4. Он относится к оксифильным элементам: дает ион Zn^{4+} в кислой среде и $[ZrO_4]^{4-}$ – в щелочной. Цирконий слабо подвижен в любых условиях, интенсивность вовлечения его в водную миграцию низкая: коэффициент водной миграции равен 0.12 [1]. Цирконий имеет геохимическое сходство с кремнием и цинком, изоморфизм – с кремнием. Геохимические барьеры для циркония – сорбционный и кислородный [2]. В земной коре цирконий находится главным образом в рассеянном состоянии, фиксируясь во многих минералах, особенно в минералах титана. Основными промышленными минералами циркония являются циркон (до 67% ZrO_2) и бадделит (95–99% ZrO_2) [3].

Распределение циркония в различных компонентах ландшафтов следующее: основные породы – 150, средние – 117, кислые – 200, глины – 200, песчаники – 230, карбонатные – 51, осадочные породы – 170, кларк земной коры – 160, среднее в почвах мира – 267 мг/кг [4–6], подземные воды зоны гипергенеза – 1.2 мкг/л [7], среднее в растительности суши – 7.5 мг/кг сухой массы, что сопоставимо с медью – 8 мг/кг [1], избыточная концентрация в растениях – 15 мг/кг [6]. По современной

классификации микроэлементов цирконий относят к 4-й группе – потенциально токсичных элементов [8].

Эти данные свидетельствуют о широкой распространенности циркония в природе в довольно высоких концентрациях, что может указывать на его экологическую значимость. Однако интерес почвоведов и агрохимиков к этому элементу практически отсутствует [9], в отличие от ряда других тяжелых металлов, относящихся к числу наиболее опасных загрязнителей окружающей среды (Hg, Pb, Cd, Ni, Cr и других). В то же время В.И. Вернадский писал: «Живое вещество охватывает и регулирует в области биосферы все или почти все химические элементы. Они все нужны для жизни и попадают в состав организма не случайно. Нет особых, жизни свойственных элементов. Есть главенствующие» [10]. Поэтому для решения экологических проблем необходимы знания о содержании и поведении всех химических элементов в компонентах ландшафтов.

Цель работы – изучение содержания и распределения циркония в почвообразующих породах, почвах и растительности лесостепных, степных, сухостепных и пойменных ландшафтов. В задачи работы входило установление уровней содержания циркония в разных компонентах ландшафтов, выявление связи между содержанием его в почвах и растительности, оценка интенсивности биологического поглощения и эколого-геохимического состояния элемента в этих объектах центральных и южных районов Бурятии (Западное Забайкалье).

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в 12 районах Республики Бурятия в лесостепных, степных, сухостепных и пойменных ландшафтах, расположенных в бассейне р. Селенги — главного притока оз. Байкал. На этой территории сосредоточено основное количество населения Бурятии, производится сельскохозяйственная продукция, на ней расположены крупные промузлы, в числе которых предприятия по производству стекла, цемента, ТЭЦ, являющиеся источниками выбросов в окружающую среду химических элементов, в том числе циркония.

Объектами исследования служили основные типы почвообразующих пород — элювиально-делювиальные и аллювиальные отложения, серые лесные (Luvisols), черноземные (Chernozems), каштановые (Castanozems) и пойменные аллювиальные (Fluvisols) почвы, отдельные виды растений и укосы фитомассы степной, луговой и культурной растительности с 1 м² для расчета выноса элемента с единицы площади. Методики отбора проб, подготовки их к анализам, расчета выноса элемента опубликованы ранее [11].

Содержание циркония в породах, почвах и зольном остатке растений определяли методом атомно-эмиссионной спектроскопии с плазменным источником возбуждения в аттестованном на техническую компетентность Аналитическом центре Республики Бурятия. Нижний предел обнаружения циркония в почвах — 7,5, в золе растений — 0,5 мг/кг. Погрешность анализа — 7–9%. Для калибровки и контроля точности измерения использовали государственные стандартные образцы состава почв и зола растений. Аналитическая повторность трехкратная. О биологической доступности циркония в почвах судили по коэффициенту биологического поглощения (КБП) — отношению содержания элемента в золе растений к валовому содержанию его в почве [12].

Статистическая обработка результатов проведения стандартными методами с расчетом среднего арифметического (M), его стандартной ошибки (m), пределов изменений, коэффициента корреляции (r), коэффициента вариации (V).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Цирконий в почвообразующих породах. Почвообразующими породами на большей части территории Забайкалья являются маломощные толщи элюво-делювия коренных пород, которые содержат их обломки и слабовыветрелый щебень. Преобладающими коренными породами служат разновозрастные гранитоиды и породы гранитовой группы и в меньшей степени — средние и основные: базальты, габбросиениты, гипербазиты, граносиениты, диориты. Породообразующие минералы гранитоидов представлены главным образом кварцем и щелочными калиево-натриевыми полевыми шпатами (соотношение $\text{Na}_2\text{O} : \text{K}_2\text{O}$ = от 0,9 до 1,2). В межгорных котловинах и широких участках речных долин почвообразование происходит на мощной толще рыхлых наносов делювиально-пролювиальных отложений, древнего и современного аллювия, озерных отложений [13, 14].

В табл. 1 приведены вариационно-статистические показатели содержания циркония в почвообразующих породах ландшафтов Западного Забайкалья. Данные таблицы свидетельствуют, что самое высокое содержание циркония отмечено в осадочных и метаморфических породах — 205–495 мг/кг (среднее — 360 мг/кг), самое низкое — в аллювиальных отложениях — 105–410 (255) и песчаниках — 198–350 (266 мг/кг). Различие между величинами максимального среднего содержания и минимального достигало 1,4 раза. Отношение величин среднего и кларка осадочных пород варьировало от 1,5 в аллювиальных породах до 2,11 в осадочных и метаморфических

Таблица 1. Статистические показатели содержания циркония в почвообразующих породах Западного Забайкалья, мг/кг

Порода	<i>n</i>	Пределы изменений	$M \pm m$	<i>V</i> , %	Стандартное отклонение	Отношение среднего к кларку осадочных пород
Элювио-делювий основных пород	11	195–470	300 ± 29	32	97	1.76
Элювио-делювий кислых пород	11	175–450	310 ± 25	27	83	1.82
Осадочные и метаморфические	12	205–495	360 ± 22	21	77	2.11
Песчаники	7	198–350	266 ± 24	24	63	1.56
Аллювиальные	15	105–410	255 ± 24	36	92	1.50
Среднее	56	105–495	298 ± 12	28	91	1.75

Примечание. Кларк Zr в осадочных породах — 170 мг/кг [4].

Таблица 2. Статистические показатели содержания циркония в основных типах почв Западного Забайкалья, мг/кг

Тип почвы	<i>n</i>	Пределы изменений	$M \pm m$	<i>V</i> , %	Стандартное отклонение	Отношение среднего к кларку почв
Серые лесные	14	160–395	298 ± 17	21	62	1.12
Черноземы дисперсно-карбонатные	10	180–410	295 ± 22	24	71	1.10
Каштановые типичные	18	200–510	328 ± 22	29	95	1.23
Аллювиальные луговые	21	150–410	285 ± 14	22	63	1.07
Среднее	63	150–510	302 ± 19	24	73	1.13

Примечание. Среднее содержание Zr в почвах мира – 267 мг/кг [6].

породах. Содержание циркония в элювио-делювио основных и кислых пород в среднем практически было одинаковым, диапазоны его максимальных и минимальных величин различались существенно (в 2.4–2.6 раза). Однако при определении средних величин они нивелировались. Это согласуется с тем, что кларки циркония в основных и кислых породах различаются несущественно, всего в 1.3 раза [4, 5]. Среднее региональное содержание циркония в почвообразующих породах равно 298 ± 12 мг/кг, что в 1.75 раза больше его кларка в осадочных породах.

Результаты исследований, проведенных в Центральном Черноземье, показали, что содержание циркония в почвообразующих породах – покровных легких, средних и тяжелых суглинках – составляло 306–336 мг/кг ($V = 31–35\%$), в лессовидных легких, средних и тяжелых суглинках – 288–400 мг/кг ($V = 35–43\%$) [15]. Эти данные свидетельствуют о довольно близких концентрациях циркония в почвообразующих породах Забайкалья и Среднерусской возвышенности.

Цирконий в почвах. Основными типами почв в изученных ландшафтах являются серые лесные, черноземы, каштановые и аллювиальные пойменные. Они формируются в экстремальных экологических условиях: при низкой обеспеченности влагой и теплом, поэтому характеризуются низким содержанием гумуса (в среднем от 1.5% в каштановых до 4% в аллювиальных луговых) – важнейшего показателя плодородия и регулятора массообмена рассеянных элементов. Почвы широко используют в сельскохозяйственном производстве в качестве пашни, пастбищ и сенокосов [14].

Серые лесные почвы распространены преимущественно в лесостепных ландшафтах на северных склонах (среднегодовая сумма осадков – 350–420 мм), черноземы дисперсно-карбонатные – на северных склонах в степных ландшафтах (320–340 мм), каштановые типичные – в сухостепных ландшафтах (200–250 мм) на межгорных понижениях и нижних частях южных склонов. Эти

почвы образуются на различных по составу и генезису элювиально-делювиальных отложениях на высотах 800–1000 м над уровнем моря. Аллювиальные почвы формируются на аллювиальных отложениях по долинам рек бассейна оз. Байкал во всех природных зонах (поверхность оз. Байкал – на высоте 456 м над уровнем моря).

Диапазоны и средние содержания циркония в поверхностном слое почв региона представлены в табл. 2. Данные свидетельствуют, что концентрации элемента в почвах изменялись в пределах 150–510 мг/кг при средней концентрации 302 ± 19 мг/кг и коэффициенте вариации 24%. Различия максимальных и минимальных содержаний циркония составляли от 2.28 раза в черноземах до 2.73 раза в аллювиальных почвах. Подобные различия обусловлены сложным литохимическим составом почвообразующих пород. Коэффициенты вариации изменялись незначительно (от 21 до 29%). Различия между средними содержаниями циркония в разных типах почв несущественны: в серых лесных – 298 ± 17 , черноземах – 297 ± 22 , в каштановых – 328 ± 22 , в аллювиальных – 285 ± 14 мг/кг.

Сопоставление содержания циркония в почвах с его содержанием в почвообразующих породах показало, что они различаются незначительно (в почвообразующих породах диапазоны Zr – 105–495, среднее – 298 мг/кг). Это обусловлено тем, что цирконий является инертным малоподвижным элементом, входит в состав трудно выветриваемого минерала циркона, вследствие чего в процессе почвообразования существенно изменению не подвергается. Поэтому он используется как реперный элемент при изучении генезиса почв [6]. Интенсивность вовлечения его в водную миграцию очень слабая: коэффициент водной миграции равен 0.12, содержание в речных водах – 2.5 [1], в подземных водах зоны гипергенеза – 1.20 мкг/л [7]. Это указывает на слабую растворимость в воде соединений циркония, поступающих из горных пород и почв,

а в геохимической миграции элемента основную роль играют взвешенные формы. Сравнение со средним содержанием циркония в почвах мира (267 мг/кг [6]) показало, что обеспеченность минеральных почв Забайкалья этим элементом составляет в среднем 1.13 от его кларка: от 1.07 в аллювиальных почвах до 1.23 — в каштановых.

Результаты исследований, полученные в разных регионах, свидетельствуют, что среднее содержание циркония в серых лесных почвах Центрально-Черноземного региона составляет 393, в черноземах выщелоченных — 365, обыкновенных — 377, типичных — 395 мг/кг [15], в черноземах Западной Сибири — 230–290, в серой лесной — 290, в темно-каштановой — 210, в луговой карбонатной — 270 (среднее в почвах — 265 мг/кг) [16]. В почвах США среднее содержание циркония составляет 230 мг/кг [17], в сельскохозяйственных почвах Швеции — 308 (177–757) [18], Японии — 92 [19], Италии — 131 [20], в почвах Австралии — 359, Китая — 281 мг/кг [6]. Сравнение содержания циркония в почвах Забайкалья с этими данными показало, что оно практически равно содержанию в почвах Швеции, Китая и Западной Сибири, меньше в 1.2–1.3 раза, чем в почвах Центрального Черноземья и Австралии, и больше, чем в почвах США (в 1.3 раза) и Италии (в 2.3 раза).

Цирконий в растениях. Для оценки экологической активности циркония в почвах, взаимодействия в системе почва–растительность, суммарного эффекта биогеохимической деятельности и вовлечения его в биогенную миграцию определяли интенсивность поглощения элемента по величине КБП и уровень его накопления в отдельных видах растений и укосах фитомассы.

Как свидетельствуют данные табл. 3, КБП циркония фитоценозами степных, луговых и культурных сообществ изменялись в пределах 0.04–0.24. Повышенной интенсивностью поглощения циркония (в 1.2 раза) обладала степная растительность по сравнению с луговой и культурной.

Это могло быть связано, с одной стороны, с более активной деятельностью корневых систем степных ценозов, выделением ими в ризосферу органических кислот и других экссудатов [21], способных повышать биодоступность микроэлементов, с другой стороны — с испарительной концентрацией в процессе транспирации надземной части в условиях высокой температуры и низкой относительной влажности воздуха.

Средний КБП циркония растительностью суши равен 0.88 [1]. Это в 7.3–8.8 раза больше, чем в изученной растительности Забайкалья, что свидетельствует о региональных особенностях поглощения циркония растительностью, обусловленных его слабой биодоступностью в почвах региона. Исходя из этих величин КБП, цирконий следует отнести к элементам очень слабого накопления. В среднем КБП циркония растительностью степных, луговых и культурных ценозов на основных типах минеральных почв довольно близкие. Сравнение величин КБП циркония с другими элементами в этих же фитоценозах показало, что экологическая активность его в почвах незначительно больше, чем железа (КБП 0.08), равна титану (0.11), но значительно меньше, чем цинка (5.18), меди (3.36), стронция (3.0), марганца (1.05).

Величины содержания циркония в разных видах растений, произрастающих в разных местообитаниях, представлены в табл. 4. Наиболее высокое содержание циркония выявлено в люцерне серповидной, полыни холодной и астрагале приподнимающемся (средние содержания — 2.36–2.47 мг/кг). Самое низкое содержание отмечено в костреце безостом и доннике ароматном (1.21–1.30 мг/кг). В бобовых растениях, как правило, отмечено более высокое содержание циркония по сравнению со злаковыми. Это обусловлено, вероятно, тем, что у бобовых преобладает белковый тип обмена веществ, у злаковых — углеводный.

В табл. 5 приведены данные о содержании циркония в укосах степной, луговой и культурной

Таблица 3. Статистические показатели валового содержания циркония в почвах, золе растительности, коэффициент биологического поглощения (КБП) и коэффициент корреляции (r) в системе почва–растительность степных, луговых и культурных фитоценозов

Zr в почвах, мг/кг		V, %	Zr в золе растительности, мг/кг		V, %	КБП		V, %	r
M ± m	диапазон		M ± m	диапазон		M ± m	диапазон		
Степная растительность (n = 19)									
319 ± 21	190–490	28	35 ± 2.5	15–51	31	0.12 ± 0.013	0.04–0.24	47	–0.08
Луговая растительность (n = 19)									
288 ± 15	150–380	22	27 ± 2.4	12–55	39	0.10 ± 0.010	0.04–0.18	42	0.11
Культурная растительность (n = 27)									
316 ± 16	180–470	20	30 ± 2.0	18–57	35	0.10 ± 0.007	0.06–0.19	40	0.31

Таблица 4. Содержание циркония в разных видах растений, мг/кг сухой массы

Вид растения	n	Диапазон	$M \pm m$	V, %
Астрагал приподнимающийся (<i>Astragalus adsurgens</i> Pallas)	13	1.12–3.22	2.36 ± 0.22	34
Вика жилковатая (<i>Vicia nervata</i> Sipl.)	10	1.23–3.60	1.94 ± 0.25	30
Вика мышиная (<i>Vicia cracca</i> L.)	6	0.92–2.80	1.62 ± 0.30	32
Донник ароматный (<i>Melilotus suaveolens</i> Lebed.)	6	0.75–2.14	1.30 ± 0.21	29
Люцерна серповидная (<i>Medicago falcata</i> L.)	11	1.24–4.21	2.47 ± 0.31	38
Кострец безостый (<i>Bromus inermis</i> Leysser)	6	0.73–1.92	1.21 ± 0.19	27
Лисохвост луговой (<i>Alopecurus pratensis</i> L.)	4	0.92–2.10	1.62 ± 0.22	24
Пырей ползучий (<i>Elytrigia repens</i> L.)	14	0.73–2.43	1.43 ± 0.15	34
Полынь холодная (<i>Artemisia frigida</i> Willd.)	12	1.58–4.12	2.45 ± 0.25	36

Таблица 5. Статистические показатели содержания и накопления (выноса) циркония в растительности Западного Забайкалья

Растительность	n	Содержание Zn, мг/кг сухой массы			Урожайность надземной массы, ц/га			Накопление Zr, г/га		
		$M \pm m$	пределы варьирования	V, %	$M \pm m$	пределы варьирования	V, %	$M \pm m$	пределы варьирования	V, %
Степная (среднее)	16	3.15 ± 0.34	1.74–5.94	43	7.1 ± 0.7	4.3–10.6	30	2.42 ± 0.27	1.46–4.25	35
Степная холоднопопынная	8	3.60 ± 0.67	1.74–5.04	49	6.9 ± 0.8	5.0–9.8	27	2.80 ± 0.45	2.00–4.25	36
Степная разнотравная	8	2.74 ± 0.26	1.93–3.84	28	7.3 ± 1.2	4.3–10.6	36	2.03 ± 0.19	1.46–2.57	20
Луговая (среднее)	36	1.81 ± 0.16	0.66–5.34	54	44.6 ± 2.2	25.0–61.2	24	8.31 ± 0.79	2.60–15.7	40
Луговая злаковая	9	1.30 ± 0.16	0.66–2.10	38	33.3 ± 2.9	25.0–42.0	22	4.52 ± 0.75	2.60–7.50	41
Луговая разнотравная	8	1.61 ± 0.24	0.70–2.80	42	49.3 ± 2.6	44.0–56.0	11	10.5 ± 2.1	5.80–15.7	39
Луговая разнотравно-злаковая	6	1.38 ± 0.31	0.67–2.20	55	52.7 ± 1.5	48.8–55.2	7	7.9 ± 1.7	3.30–11.1	48
Луговая осоковая	11	2.55 ± 0.38	1.44–5.34	49	47.2 ± 3.9	35.6–61.2	21	12.0 ± 1.1	5.40–16.2	43
Культурная										
злаковая	29	1.79 ± 0.12	0.65–3.20	35	44.6 ± 4.4	24.0–64.2	28	7.98 ± 0.79	4.30–11.5	24
злаково-бобовая	5	1.96 ± 0.54	0.69–3.87	62	64.7 ± 5.6	49.2–74.8	17	12.7 ± 1.1	9.64–14.7	31
Рапс	6	3.90 ± 0.45	2.76–5.35	26	Не определяли					

Примечание. Среднее содержание Zr в растительности суши – 7.5 мг/кг сухой массы [1], нормальное содержание в кормах для жвачных животных – 6–9 мг/кг сухого вещества [22], избыточное содержание – 15 мг/кг [6].

растительности. Они свидетельствуют о неоднородности содержания циркония в растительности, обусловленной как биологическими особенностями растений и соотношением их в ценозах, так и разнообразием экологических факторов мест произрастания.

Данные табл. 5 свидетельствуют, что количество циркония в степной растительности варьировало от 1.74 до 5.94 мг/кг сухой массы (среднее – 3.15 ± 0.34 мг/кг). Минимальное содержание

циркония выявлено в злаковой растительности (с. Тохой и с. Иволгинск – 1.93–2.04 мг/кг), максимальное – в осоково-холоднопопынной (с. Нижняя Иволга – 5.94) и злаково-холоднопопынной (с. Боргой – 2.90) растительности. В степной растительности 7 ключевых площадок содержание циркония находилось в пределах 1.74–3 мг/кг, 6 площадок – 3.2–4.0 мг/кг и 2 площадок – >5.0 мг/кг.

В луговой растительности нормального увлажнения содержание циркония изменялось от 0.66

Таблица 6. Статистические показатели содержания циркония (мг/кг) в зерне и соломе (листья + стебли) пшеницы и овса в Западном Забайкалье ($n = 30$)

Показатели	Пшеница			Овес		
	зерно	солома	зерно : солома	зерно	солома	зерно : солома
$M \pm m$	0.55 ± 0.07	2.26 ± 0.27	0.24	0.61 ± 0.05	2.15 ± 0.36	0.28
Диапазон	0.32–0.97	1.12–3.90	–	0.24–0.78	1.17–3.75	–
$V, \%$	30	29	–	24	38	–

Таблица 7. Содержание циркония в зерне и соломе пшеницы и овса в разных природных зонах Западного Забайкалья, мг/кг

Показатели	Пшеница			Овес		
	зерно	солома	зерно : солома	зерно	солома	зерно : солома
Лесостепная зона ($n = 8$)						
$M \pm m$	0.81 ± 0.11	2.97 ± 0.42	0.27	0.80 ± 0.03	2.54 ± 0.37	0.31
Диапазон	0.54–0.97	1.23–3.90	–	0.72–0.89	1.54–3.30	–
Степная зона ($n = 10$)						
$M \pm m$	0.54 ± 0.07	2.50 ± 0.27	0.22	0.67 ± 0.07	2.28 ± 0.43	0.29
Диапазон	0.29–0.87	1.16–3.66	–	0.54–1.06	1.24–3.75	–
Сухостепная зона ($n = 12$)						
$M \pm m$	0.29 ± 0.03	1.32 ± 0.12	0.22	0.35 ± 0.06	1.64 ± 0.28	0.21
Диапазон	0.22–0.38	1.12–1.75	–	0.24–0.56	1.17–2.64	–

до 2.8 мг/кг (среднее – 1.81 мг/кг). Максимальное содержание элемента выявлено в разнотравной растительности с. Большой Луг, минимальное (0.66–0.73 мг/кг) – в злаковой растительности (с. Унэгэтэй, с. Поворот), в разнотравно-злаковой (с. Малый Куналей, с. Унэгэтэй) и разнотравной растительности (с. Усть-Кяхта). В большинстве проб растительности содержание циркония находилось в пределах от 1.0 до 2.0 мг/кг.

Содержание циркония в осоковой растительности лугов избыточного увлажнения варьировало в пределах 1.44–5.34 мг/кг при среднем показателе 2.55 мг/кг, что в 1.4 раза больше, чем в растительности лугов нормального увлажнения, но в 1.2 раза меньше, чем в степной растительности.

В вегетативной массе культурной растительности (с преобладанием овса) в фазе колошения содержание циркония изменялось от 0.65 до 3.2 мг/кг. В большинстве проб содержание циркония было в пределах 1.1–2.0 мг/кг. Максимальное количество элемента отмечено в злаковой растительности с. Большой Луг, минимальное – с. М. Куналей. Между величинами содержания циркония в растительности агроценозов, а также степных и луговых фитоценозов и его концентрации в почвах корреляция отсутствовала (табл. 3).

Сопоставление с различными критериями (среднее в растительности континентов – 7.5 мг/кг [1],

норма в кормах для животных – 6–9 мг/кг [22], токсичная концентрация – 15 мг/кг [6]) показало, что содержание циркония в надземной массе растительности степных, луговых и агроценозов региона находится в пределах нормальных концентраций.

Сравнение с 10-балльной шкалой по приросту биомассы [23] показало, что степная растительность в связи с низкой водообеспеченностью (150–200 мм осадков за вегетацию) относится к очень малопродуктивной (1 балл – <10 ц/га), луговая – к малопродуктивной (3, 4 балла – 26–40 ц/га). Поэтому вовлечение циркония в биогенную миграцию луговой (8.31), культурной (7.98) и особенно степной (2.42 г/га) растительности региона (табл. 6) на 2 порядка меньше, чем в среднем захват циркония годовым приростом растительности суши (108 г/га [1]), или на один порядок меньше, чем вовлечение его в биогеохимический цикл вегетирующей частью разнотравно-злаковой растительностью луговой степи (78 г/га) и полынно-типчаковой растительностью сухой степи (24 мг/кг) Европейской части России [24].

Распределение химических элементов в тканях, органах, различных клеточных структурах и органеллах клеток, как и поглощение их из питательной среды, контролируется барьерными механизмами, способствующими в одних случаях концентрированию элементов

(безбарьерные биообъекты), в других — ограничению их поступления.

Как свидетельствуют данные табл. 6 и 7, содержание циркония в генеративных (зерно) и вегетативных (солома—листья + стебли) органах основных злаковых культур существенно различалось. В среднем отношение величин содержания Zr в зерне пшеницы и соломе составляло 0.24, овса — 0.28, т.е. в соломе пшеницы накапливалось Zr в 4.1 раза, овса — в 3.5 раза больше, чем в зерне. Это свидетельствует о наличии барьера при передвижении элемента из вегетативных частей в генеративные. Накопление Zr в зерне и соломе пшеницы и овса зависело от условий произрастания: оно было больше в лесостепной зоне, наименьшее содержание элемента отмечено в сухостепной зоне, что, очевидно, связано с разной биодоступностью элемента из различных типов почв при различной водообеспеченности. Как отмечено выше, в лесостепных ландшафтах распространены серые лесные почвы, среднегодовое количество осадков — 350–420 мм; в степных — черноземы малогумусные, количество осадков — 320–340 мм; в сухостепных ландшафтах — каштановые типичные почвы, количество осадков — 150–250 мм.

ВЫВОДЫ

1. Разнообразие ландшафтно-геохимических и литологических факторов определяет неоднородность содержания и распределения циркония в почвообразующих породах, почвах и растительности Забайкалья. Содержание циркония в почвообразующих породах меняется от 105 до 495 мг/кг при среднем региональном 298 мг/кг: обогащение от его кларка в осадочных породах составляет 1.75, от кларка земной коры — 1.86. По среднему содержанию элемента почвообразующие породы располагаются в следующем убывающем ряду: осадочные и метаморфические > элювио-делювий кислых пород > элювио-делювий основных пород > песчаники > аллювиальные.

2. Содержание циркония в различных по генезису типах почв региона варьировало от 150 до 510 мг/кг при среднем региональном показателе 302 мг/кг, что составило 1.13 от его кларка в почвах. По уровню среднего содержания почвы образуют следующий ряд: каштановые > серые лесные > черноземы > аллювиальные. Между содержанием циркония в почвообразующих породах и формирующихся на них почвах выявлено тождество, обусловленное тем, что трудно выветриваемые минералы циркония в процессе

почвообразования существенному изменению не подвергаются.

3. Вариации в содержании циркония в растительности степных, луговых и агроценозов были значительно больше, чем в почвах (0.66–5.94 мг/кг сухого вещества). Это связано как с биологическими особенностями растений и соотношением разных ботанических групп, так и с разной биодоступностью элемента в почвах. В среднем содержание циркония в растительности региона составляло 0.24–0.42 от его кларка в растительности континентов и практически столько же от нормы для сельскохозяйственных животных. По величине коэффициента биологического поглощения цирконий отнесен к элементам с очень низкой интенсивностью накопления на автоморфных почвах (КБП 0.10–0.12), что существенно меньше, чем средний КБП циркония растительности суши (0.88).

4. Вынос циркония надземной массой и вовлечение его в биогенную миграцию наиболее интенсивны в луговой (8.3) и культурной растительности (8.0 г/га) и минимальны в малопродуктивной степной растительности (2.4 г/га). Геохимическая роль растений при включении циркония в биологическую миграцию определяется прежде всего биомассой и в меньшей степени — видовым составом (структурой сообществ) и интенсивностью поглощения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Добровольский В.В. Основы биогеохимии. М.: Изд. дом «Академия», 2003. 400 с.
2. Чертко Н.К., Чертко Э.Н. Геохимия и экология химических элементов. Минск: Изд. центр БГУ, 2008. 140 с.
3. Гринвуд Н., Эрншо А. Химия элементов. М.: БИНОМ, Лаборатория знаний, 2008. Т. 1. 607 с.
4. Требования к производству и результатам многоцелевого геохимического картирования. М.: ИМГРЭ, 2002. 92 с.
5. Григорьев Н.А. Среднее содержание химических элементов в горных породах, слагающих верхнюю часть континентальной коры // Геохимия. 2003. № 7. С. 785–792.
6. Kabata A. Trace Elements in soils and plants. 4th ed. London—N.Y.: CRC Press Taylor and Francis Group Boca Raton, 2011. 534 p.
7. Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. М.: Недра, 1998. 366 с.
8. Ребров В.Г., Громова О.А. Витамины, макро- и микроэлементы. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2008. 960 с.
9. Водяницкий Ю.Н. Нормативы содержания тяжелых металлов и металлоидов в почвах // Почвоведение. 2012. № 3. С. 368–375.

10. Вернадский В.И. О некоторых основных проблемах биогеохимии // Изв. АН СССР. ОМОН. Сер. геол. 1938. Т. 18. № 1. С. 19–34.
11. Кашин В.К. Барий в компонентах ландшафтов Западного Забайкалья // Почвоведение. 2015. № 10. С. 1242–1253.
12. Ковалевский А.Л. Биогеохимия растений. Новосибирск: Наука, 1991. 294 с.
13. Макрыгина В.А., Суворова Л.Ф. Спессартин в зеленосланцевой фации: условия проявления // Геохимия. 2011. № 3. С. 314–323.
14. Ногина Н.А. Почвы Забайкалья. М.: Наука, 1964. 314 с.
15. Протасова Н.А., Щербаков А.П. Микроэлементы (Cr, V, Ni, Mn, Zn, Cu, Co, Ti, Ga, Be, Ba, I, Mo) в черноземах и серых лесных почвах Центрального Черноземья. Воронеж: Воронеж. гос. ун-т, 2003. 368 с.
16. Сысо А.И. Закономерности распределения химических элементов в почвообразующих породах и почвах Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. 277 с.
17. Burt R., Wilson M.A., Mays M.D., Lee C.W. Major and trace elements of selected pedons in the USA // J. Environ. Qual. 2003. V. 32. P. 2109–2121.
18. Eriksson J. Concentrations of 61 trace elements in sewage sludge, farmyard manure, mineral fertilizer, precipitation and in oil and crops. Swedish environmental protection agency, 2001. 69 p.
19. Takeda A., Kimura K., Yamasaki S.-L. Analysis of 57 elements in Japanese soils, with special reference to soil group, and agricultural use // Geoderma. 2004. V. 119. P. 291–307.
20. Bove M.A., Ayuso R.A., De Vivo B. Geochemical and isotopic study of soils and waters from an Italian contaminated site: Agro Aversano (Campania) // J. Geochem. Explor. 2011. V. 109. № 1–3. P. 38–50.
21. Карначевский Л.О., Боровинская Л.Б., Хайданова Д.Д. Роль корневых систем в почвообразовании в сухой степи // Почвоведение. 1994. № 11. С. 77–84.
22. Лебедев Н.И. Использование микродобавок для повышения продуктивности жвачных животных. Л.: Агропромиздат, 1990. 96 с.
23. Базилевич Н.И. Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. М.: Наука, 1993. 293 с.
24. Добровольский В.В. Геохимия почв и ландшафтов. М.: Научн. мир, 2009. 752 с.

The Zirconium in the Components of the Western Transbaikalia Landscapes

V.K. Kashin

Institute of General and Experimental Biology, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,

ul. Sakhyanovoi 6, Ulan-Ude 670047, Russia

E-mail: kashin-39@mail.ru

The content of zirconium in parent rocks, soils and vegetation of the forest steppe, steppe, and flood plain meadow landscapes of the Transbaikalia region have been studied. The average regional content of Zr in the parent rocks was 1.75 times higher than its Clarke value in the sedimental rocks while its soil content was 1.13 higher than its average value for the world soils. Average zirconium content in vegetation was 1.79 mg kg⁻¹ in cereals, 1.81 in meadow vegetation under regular moisture regime, 2.55 in swampy meadow vegetation, and 3.15 mg kg⁻¹ in steppe vegetation (on dry matter basis). These figures correspond to 0.24–0.42 of its Clarke value for the world vegetation. Based on its rate of accumulation by vegetation Zr was classified as an element of very low uptake from mineral soil (KBU = 0.10–0.12).

Key words: zirconium, landscape components, Western Transbaikalia.