

УДК 630*160.2:550.47] (571.63)

Н.С. ШИХОВА

Некоторые закономерности биогеохимии растений лесов южного Приморья

Представлены результаты биогеохимических исследований растительности слабо нарушенных лесных экосистем п-ова Муравьев-Амурский (юг Приморского края). Впервые для широкого спектра дальневосточных видов деревьев, кустарников, деревянистых лиан и лесного разнотравья, формирующих природные фитоценозы южного Приморья, определена специализация в накоплении тяжелых металлов. Проведена сравнительная оценка аккумулятивных способностей к тяжелым металлам у разных видов и жизненных форм растений. На основе эколог-геохимических критерий установлена специфика растительности и почв региона исследований.

Ключевые слова: дальневосточная флора, биогеохимия растений, тяжелые металлы, аккумуляция тяжелых металлов растениями.

On biogeochemical regularity of the plants in the South Primorye forests. N.S. SHIKHOVA (Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, FEB RAS, Vladivostok).

The article deals with the results of biogeochemical research of the forest ecosystems, still conserved, in the Muravyov-Amursky Peninsula (south of Primorye Territory). For the first time, the species specificity on the heavy metal accumulations has been identified for many Far-Eastern species of the trees, bushes, woody climbing plants and wood forbs, which participate in the formation of the natural phytocenoses of the South Primorye. The accumulative properties to heavy metals were compared in the different species and life forms of the plants. Basing on the ecological and geochemical criteria the wild plant and regional soil specificity were identified.

Key words: flora of the Far East, biogeochemistry of plants, heavy metals, biological accumulation of heavy metals by plants.

Постоянно возрастающий антропогенно-техногенный пресс на живые организмы и увеличение поступающих в биосферу поллютантов – реалии нашего индустриального времени и технического прогресса. Растения являются чуткими индикаторами происходящих в экосистемах процессов и адекватно реагируют на все их изменения. Это обусловило широкое использование растений для фитомониторинга состояния как естественных, так и техногенно-преобразованных экосистем, фитоиндикации прямых и косвенных воздействий загрязняющих веществ на биоту. Весьма перспективны для этих целей биогеохимические методы исследования. Биогеохимия растений, изучающая элементный состав, особенности миграции, трансформации, биоаккумуляции химических элементов растениями, является научной базой для эффективного решения многих научных и прикладных экологических проблем. Большой интерес представляют данные по биогеохимической специализации разных таксономических рангов растений в накоплении химических элементов, толерантности и устойчивости видов к поллютантам в условиях техногенеза, а также определение региональных и локальных фоновых содержаний элементов в основных функциональных блоках экосистем – растениях и почвах.

ШИХОВА Нина Сергеевна – кандидат географических наук, старший научный сотрудник (Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН, Владивосток).

E-mail: shikhova@ibss.dvo.ru

Элементный химический (биогеохимический) состав растений формируется под воздействием многих факторов, которые можно объединить в две большие группы: экологические (внешние) и собственно биологические (внутренние). Наиболее значимыми из первых являются минеральный состав подстилающих пород и почв, подземных и поверхностных вод, газовый состав атмосферы – то есть все, что определяет источники питания растений. Сюда же относятся и техногенная составляющая экосистем, степень и характер протекающих в них процессов антропо- и техногенеза. Из биологических факторов важнейшим является систематическая принадлежность растений, которая отражает их эволюционно обусловленный и генетически закрепленный химический состав. В региональных фоновых условиях химический состав растений определяется зонально-региональными закономерностями биогенной миграции элементов и закреплен в растениях генетически на организменном уровне. Биогеохимическая специфичность растений автономных фоновых экосистем наиболее ярко проявляется, согласно ряду исследований [22, 23], на уровне жизненных форм растений (экобиоморф).

В настоящее время накоплен большой фактический материал по содержанию химических элементов в дикорастущих и культурных растениях многих регионов и стран, установлены планетарные кларки их содержаний. В научной литературе фрагментарно освещены и некоторые аспекты биогеохимии растений российского Дальнего Востока [1, 2, 3, 11, 14, 15, 26, 27 и др.]. Однако систематических биогеохимических исследований богатейшей и во многом уникальной дальневосточной природной флоры до сих пор не проводилось. В наших работах сделана попытка в какой-то мере восполнить этот научный пробел на примере растительности п-ова Муравьев-Амурский, территориально относящегося к южному Приморью с богатым составом арборифлоры (дendрофлоры), во многом характерном для юга российского Дальнего Востока. Биогеохимические особенности растений и почв лесных экосистем полуострова рассмотрены в настоящей работе на примере содержания тяжелых металлов как эффективных маркеров интенсивности воздействия техногенного пресса на биоту и почвенный покров.

Основной целью выполненных исследований являлось изучение биогеохимических закономерностей в накоплении тяжелых металлов дальневосточными наземными растениями и определение локального биогеохимического фона тяжелых металлов в почвах и растениях лесных экосистем п-ова Муравьев-Амурский.

Объекты и методы

Объектами исследования служили растительность и почвы лесных экосистем п-ова Муравьев-Амурский, входящего административно в состав Владивостокского городского округа южного Приморья. По геоботаническому районированию территория исследования относится к горно-приморскому Сучано-Владивостокскому округу дубовых, широколиственных, кедрово-широколиственных с грабом и чернопихтово-широколиственных лесов Восточно-Азиатской хвойно-широколиственной области [19], по почвенному – к бурым лесным типам почв [12]. Для полуострова характерны сложное геологическое строение, обусловленное высокой комплексностью пород, тектонических структур, палеорежимов, и сложный металлогенический облик [5].

Исследования были выполнены на 26 пробных площадях, входящих в систему многолетнего мониторинга растительности селитебной и зеленой зон г. Владивостока [25]. Обследовались наименее нарушенные лесные экосистемы полуострова, удаленные на 2 км и более от городской черты, чтобы исключить или свести к минимуму техногенное влияние урбанизированной среды. Непосредственными объектами изучения являлись преимущественно растительные сообщества с доминированием или значительным участием дуба монгольского *Quercus mongolica* Fisch. ex Ledeb. как наиболее широко распространенные на лесной территории полуострова. Под рассматриваемыми лесами преобладают

бурые горно-лесные почвы, в разной степени гумусированные и оподзоленные [13]. Ранее нами было установлено, что обследованным дубнякам присущи полидоминантный состав древостоя и значительное видовое разнообразие кустарников и травянистого покрова [24]. В процессе исследований были изучены аккумулятивные способности к тяжелым металлам (ТМ) практически у полного видового состава деревянистых растений полуострова: 36 деревьев, 36 кустарников и 6 деревянистых лиан, принадлежащих 24 семействам и 48 родам.

Для фитогеохимического опробования отбирались ассимиляционные органы растений – листья и хвоя деревьев и кустарников как показатель ежегодного накопления элементов. На каждой пробной площади брали смешанный образец листьев (хвои) растений (с 5–10 особей) каждого вида в нижней части кроны деревьев и средней части кроны кустарников, а также смешанный образец лесного разнотравья с 10 учетных площадок (1 м^2). Параллельно с растительным материалом по диагоналям пробной площади в 10 точках отбирались индивидуальные пробы поверхностных горизонтов почв (0–20 см). Опробование проводилось в конце вегетационного сезона (до начала пожелтения листьев), соответствующего времени максимального накопления элементов. Содержание тяжелых металлов (Pb, Ni, Co, Cd, Zn, Cu, Mn, Fe) в растениях и валовое содержание в почвах определено методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии на спектрофотометре Shimadzu AA 6800. Предварительная подготовка проб растений к анализу проведена методом сухого озоления при 450°C , почв – прокаливанием при 600°C и последующей минерализацией в смеси плавиковой и соляной кислот марки ОСЧ. Концентрацию металлов в растениях и валовое содержание в почвах пересчитывали на сухую массу и выражали в миллиграммах на килограмм сухого вещества (мг/кг сух. в-ва).

При определении экологического фона в качестве методической основы было принято положение [6, 22 и др.], согласно которому региональный биогеохимический фон растений формируется преимущественно биогеохимическим потенциалом эдификаторных зональных биоморф растений. В лесных экосистемах эту роль выполняют древесные растения плакорных фитоценозов. Локальный экологический фон (ЛЭФ) металлов у растений полуострова был определен на основе биогеохимических показателей 78 видов арборифлоры, формирующих древесно-кустарниковые ярусы обследованных фитоценозов. Фактической базой для расчета ЛЭФ почв послужили данные по содержанию ТМ в 26 образцах поверхностных горизонтов почв исследованной территории.

Эколо-геохимическая специфика растительного покрова и почв полуострова была установлена путем сравнения локально фоновых содержаний металлов в почвах и растениях с имеющимися в научной литературе наиболее известными кларками и стандартными значениями химических элементов, рассчитанными для больших территорий [4, 7, 8, 9, 10, 16, 17, 21].

Результаты и обсуждение

Выполненные исследования показали высокое биогеохимическое разнообразие обследованной флоры на разных уровнях ее организации. Обобщенные данные по среднему содержанию тяжелых металлов в обследованной арборифлоре приведены в табл. 1. Наблюдается высокая биогеохимическая специализация растений в накоплении большинства рассматриваемых ТМ, максимально выраженная в аккумуляции Zn (коэффициент вариации – 96 %) и Mn (87 %) – наиболее типичных для древесных растений биогенных элементов, а также Cd (71 %) – характерного техногенного металла. Биогеохимический фон разных видов опробованной выборки отличается весьма существенно: от 13 (Fe) и 24 (Co) раз до 170 (Mn) и 270 (Zn) раз. Слабое накопление металлов отмечено у сосны корейской (кедра корейского) и небольшой лианы – древогубца плетеобразного. Наилучшие аккумулятивные способности к целому ряду металлов наблюдаются у ивы удской и двух видов рубуса.

Статистические показатели содержания тяжелых металлов в ассимиляционных органах видового состава арборифторы п-ва Муравьев-Амурский и условная норма содержания металлов в зрелых тканях листьев

Химический состав	Содержание металлов, мг/кг сухого вещества				V (%)	Виды растений		Примерное содержание в зрелых тканях листьев, мг/кг (Кабага-Пендиас, Гендиас [17])
	M ± m	min	max	с минимальным содержанием металлов		с максимальным содержанием металлов	диффит	
Зольность (%)	9,72 ± 0,33	1,86	17,05	30	Древогубец плетеобразный (<i>Celastrus flagellaris</i> Rupr.)	Рубус сахалинский, малина сахалинская (<i>Rubus sachalinensis</i> Lévl.)	—	—
Cd	0,91 ± 0,07	0,07	2,71	71	Сосна корейская, кедр корейский, <i>(Pinus koraiensis</i> Siebold et Zucc.)	Ива усская (<i>Salix udensis</i> Trautv. et Mey.)	—	0,05-0,2
Co	1,43 ± 0,09	0,16	3,84	58	Сосна корейская	Жимолость голубая (<i>Lonicera caerulea</i> L.)	—	0,02-1
Ni	2,07 ± 0,12	0,13	5,08	53	Сосна корейская	Чубушник Шренка (<i>Philadelphia schrenkii</i> Rupr. et Maxim.)	—	0,1-5
Pb	6,08 ± 0,42	0,36	17,48	61	Сосна корейская	Рубус сахалинский	—	5-10
Cu	6,20 ± 0,24	0,79	24,38	34	Древогубец плетеобразный	Ольха волосистая (<i>Alnus incisa</i> (Spach) Fisch. ex Rupr.)	2-5	5-30
Zn	30,40 ± 3,34	1,53	415,17	96	Древогубец плетеобразный	Ива усская	10-20	27-150
Fe	138,0 ± 5,4	20,0	260,0	34	Древогубец плетеобразный	Рубус боярышниковый (<i>Rubus crataegifolius</i> Bunge)	—	—
Mn	148,8 ± 14,8	7,7	1153,1	87	Яблоня маичурурская (<i>Malus mansurica</i> (Maxim.) Kom.)	Ива усская	15-25	20-300
							300-500	

Примечание. M ± m – среднее значение и ошибка среднего; min, max – минимальное и максимальное значение; V – коэффициент вариации.

При сравнении полученных нами данных с известными в литературе примерными нормами содержаний в зрелых тканях листьев [17] установлено, что из общего комплекса рассматриваемых металлов лишь среднее содержание Cd несколько превышает его условную физиологическую норму. В то же время максимальные концентрации Cu, Zn и особенно Mn, обнаруженные в некоторых видах, являются даже токсичными для растений. Следует заметить, что А.А. Кабата-Пендиас, Х. Пендиас рассчитали условные нормы содержания ТМ [17] преимущественно на основе травянистых растений и сельскохозяйственных культур, что, по-видимому, не совсем корректно для оценки нормального, дефицитного или избыточного содержания химических элементов в деревянистых растениях. По нашему мнению, подобная диагностика арборифлоры в какой-то мере может быть проведена путем сравнения содержания элементов в растениях с их локальным или региональным биогеохимическим фоном с учетом жизненного состояния видов.

Локальное фоновое содержание ТМ (среднее по выборке) для растений обследованной территории представлено в табл. 2. Приведенные данные свидетельствуют также о специфичности накопления металлов растениями разных жизненных форм. Наблюдается значительное обогащение лиственных деревьев Mn и Zn; кустарников – Pb, Co, Cd,

Таблица 2
Среднее содержание тяжелых металлов в листьях (хвое) растений разных жизненных форм
в природных лесах п-ова Муравьев-Амурский

Анализируемая фракция и жизненная форма	Кол-во видов (проб)	Зольность (%)	Содержание химических элементов (мг/кг сухого вещества)							
			Pb	Ni	Co	Cd	Zn	Cu	Mn	Fe
Листья деревьев	33	9,03	3,88	1,71	0,99	0,56	48,46	6,58	173,2	125,0
Хвоя деревьев	3	4,22	1,82	1,20	0,82	0,27	27,38	2,33	156,2	72,0
Листья кустарников	36	10,56	8,10	2,48	1,81	1,26	32,35	6,36	164,0	160,3
Листья лиан	6	11,12	8,19	2,00	1,86	1,08	16,12	8,17	84,4	110,4
Листья, хвоя деревянистых видов (среднее по выборке)	78	9,72	6,08	2,07	1,43	0,91	30,40	6,20	148,8	138,0
Надземная фитомасса травянистых растений	(14)	13,23	6,13	3,19	1,04	1,03	36,01	6,37	101,9	207,6

Ni и Fe; лиан – Pb, Co, Cd, Cu. Хвойные деревья слабо накапливают большинство металлов, лианы – Mn и Zn. Из полученных данных также видно, что кустарники интенсивнее деревьев накапливают Pb (примерно в 3,5 раза), Fe (2,5 раза), Cd (2 раза), Co и Ni (до 1,5 раза), а деревья, хотя и менее существенно, – Mn и Zn (1,2–1,4 раза). В листьях деревьев и кустарников по сравнению с хвойой почти в 2,5 раза выше содержание Cu. В целом деревянистые растения по сравнению с травянистыми обогащены Mn и избирательно – Zn (лиственные деревья) и Co (кустарники и лианы), а травянистые в 1,5 раза интенсивнее накапливают в зеленой фитомассе Ni и Fe.

Средние содержания ТМ в почвах полуострова, соответствующие локальному экологическому фону, приведены в табл. 3. Самая высокая вариабельность отмечена для кадмия (75 %). Вероятно, на баланс этого металла в почвах в наибольшей степени повлияла геохимическая специфика коренных пород, в том числе его повышенный региональный геохимический фон (Фонды ПГУ. Изв. № 13340). Этот вывод в какой-то мере подтверждают и полученные нами данные по распределению металлов по профилю почв. В частности, во многих из них отмечено 1,5-кратное возрастание вниз по профилю содержания Cd, Co и Ni. Свой вклад в валовое содержание Cd вносит, видимо, и техногенная составляющая, обусловленная влиянием транспорта и городской агломерации. В единичных пробах почв зафиксированы сверхнормативные концентрации Pb – 62,69 мг/кг (в 2 раза выше ПДК) и Cd – 2,75 мг/кг (в 1,4 раза выше ОДК).

Таблица 3

**Содержание тяжелых металлов в поверхностном горизонте почв (0–20 см)
природных лесов п-ова Муравьев-Амурский**

Статистический показатель	Содержание химических элементов (мг/кг сухого вещества)							
	Pb	Ni	Co	Cd	Zn	Cu	Mn	Fe
Среднее (M)	19,59	39,18	29,07	1,00	105,19	13,70	699	28 415
Стандартная ошибка ($\pm m$)	1,92	4,06	1,51	0,16	6,15	1,15	31	1826
Стандартное отклонение ($\pm \delta$)	8,60	18,60	6,92	0,75	27,49	5,16	141	8366
Минимум (min)	0,34	9,45	11,26	0,04	59,54	5,52	462	15 203
Максимум (max)	35,61	72,07	42,78	2,75	167,50	24,11	1019	47 775
Коэффициент вариации (V, %)	44	47	24	75	26	38	20	29
ПДК* [7]/ОДК** [8] почв	32/130	80**	—	2,0**	220**	132**	1500*	—

При сравнении полученных нами данных с региональным геохимическим фоном металлов в почвообразующих породах и горных породах, не подверженных процессам выветривания (Фонды ПГУ. Изв. № 13340), в поверхностных горизонтах почв полуострова наблюдается интенсивная биологическая аккумуляция Co (4–5-кратная), Cd (3,5-крат.), Zn и Ni (2-крат.) и менее значимая – Pb (1,3–1,4-крат.) и Mn (1,2-крат.).

Важным биогеохимическим показателем является коэффициент биологического накопления (КБН). Он характеризует интенсивность накопления растениями химических элементов посредством корневого поглощения и рассчитывается как отношение содержания элемента в растении к его содержанию в почве. Средние значения КБН для разных жизненных форм растений приведены в табл. 4.

Таблица 4

**Средняя интенсивность биологического накопления тяжелых металлов
растениями разных жизненных форм в условиях южного Приморья**

Жизненные формы растений (кол-во видов, проб*)	Ранжированные ряды КБН металлов							
Деревья лиственные (n = 32)	$\frac{\text{Cu}}{0,60} > \frac{\text{Cd}}{0,50} > \frac{\text{Zn}}{0,42} > \frac{\text{Mn}}{0,22} > \frac{\text{Pb}}{0,14} > \frac{\text{Ni}}{0,05} > \frac{\text{Co}}{0,03} > \frac{\text{Fe}}{0,005}$							
Деревья хвойные (n = 3)	$\frac{\text{Cd}}{0,61} > \frac{\text{Zn}}{0,35} > \frac{\text{Cu}}{0,26} > \frac{\text{Mn}}{0,23} > \frac{\text{Pb}}{0,07} > \frac{\text{Ni}}{0,04} > \frac{\text{Co}}{0,03} > \frac{\text{Fe}}{0,002}$							
Кустарники (n = 29)	$\frac{\text{Cd}}{1,16} > \frac{\text{Cu}}{0,63} > \frac{\text{Pb}}{0,32} > \frac{\text{Zn}}{0,25} > \frac{\text{Mn}}{0,20} > \frac{\text{Ni}}{0,06} > \frac{\text{Co}}{0,05} > \frac{\text{Fe}}{0,007}$							
Деревья и кустарники в целом (n = 64)	$\frac{\text{Cd}}{0,81} > \frac{\text{Cu}}{0,60} > \frac{\text{Zn}}{0,34} > \frac{\text{Pb}}{0,22} > \frac{\text{Mn}}{0,21} > \frac{\text{Ni}}{0,05} > \frac{\text{Co}}{0,04} > \frac{\text{Fe}}{0,006}$							
Травянистые растения (n = 21*)	$\frac{\text{Cd}}{2,36} > \frac{\text{Cu}}{0,47} > \frac{\text{Pb}}{0,37} > \frac{\text{Zn}}{0,36} > \frac{\text{Mn}}{0,15} > \frac{\text{Ni}}{0,09} > \frac{\text{Co}}{0,04} > \frac{\text{Fe}}{0,008}$							

Установленные значения КБН металлов позволяют отнести их, согласно классификации А.И. Перельмана [20], к элементам среднего (Cd, Cu, Zn, Pb, Mn), слабого и очень слабого (Ni, Co, Fe) биологического захвата растениями. Наиболее высокий показатель почвенного накопления металлов растениями установлен для Cd: для древесных растений (деревья и кустарники) – 0,81, для трав – 2,36. Минимальные же значения КБН получены для Fe: 0,006 – древесные виды; 0,008 – травянистые виды. Для Fe характерена также слабая изменчивость КБН внутри проанализированного видового состава арборифлоры: от 0,001 у сосны корейской (*Pinus koraiensis* Siebold et Zucc.) до 0,021 у мелкоплодника ольхолистного (*Micromeles alnifolia* (Siebold et Zucc.) Koehne) при коэффициенте вариации,

равном 56 %. Максимальная же межвидовая вариабельность КБН (коэффициент вариации – 93 %) зафиксирована в накоплении Zn: от 0,09 у жестера даурского (*Rhamnus davurica* Pall.) до 1,69 у осины (*Populus tremula* L.).

Сравнение КБН у разных жизненных форм растений свидетельствует о более интенсивном почвенном поглощении ТМ травянистыми растениями (Cd, Ni, Pb) и кустарниками (Co, Pb), что обусловлено в наибольшей степени преимущественным расположением их корневой системы в верхних почвенных горизонтах и преобладающим почвенным типом питания. Деревья по сравнению с кустарниками и травами более активно поглощают из почвы Zn и Cu (особенно лиственные породы) и менее значимо – Mn. В полученных результатах нашли отражение как физиологические особенности растений и их жизненных форм (например, избирательность в накоплении древесными видами Mn, Zn и Cu; особенности корневой системы и связанные с ней глубина и площадь охвата растениями питательного субстрата почв; преимущественный тип накопления элементов – фолиарный, почвенный или смешанный), так и химические свойства самих металлов (подвижность и доступность растениям, способность к комплексообразованию, конкуренция между элементами и др.).

Известно, что при поглощении химических элементов растениями возможен барьерный и безбарьерный тип их накопления [18]. С использованием программы STATISTICA 10 были выполнены регрессионный и корреляционный анализы данных и построены диаграммы рассеяния для 13 видов деревьев и кустарников, имеющих наибольшее распространение на пробных площадях и соответственно высокие выборки фактических данных. Судя по полученным результатам, для большинства вошедших в выборку видов установлены положительные связи в содержании в почвах и растениях Zn, Cu, менее достоверные – Mn и Ni. Тенденция к безбарьерному накоплению металлов в наибольшей степени прослеживается у кленов (*Acer mono* Maxim., *A. pseudosieboldianum* (Pax) Kom.) по отношению к Zn и Cu; ясения носолистного (*Fraxinus rhynchophylla* Hance) и лигустрины амурской (*Ligustrina amurensis* Rupr.) – к Zn, Cu, Ni и Mn; чубушника тонколистного (*Philadelphus tenuifolius* Ropr. et Maxim.) – к Ni и Mn. Для остальных включенных в анализ видов достоверных закономерностей не обнаружено, хотя в целом ряде случаев все-таки наблюдается слабая положительная направленность этого процесса. Перечисленные выше виды в наибольшей степени подходят для фитоиндикации почвенного загрязнения лесных экосистем региона.

Обратная зависимость наиболее характерна для поглощения растениями Co, а также почти у половины включенных в анализ видов – Pb, Cd и Fe. Это, вероятнее всего, обусловлено слабой доступностью этих металлов растениям в условиях слабокислой и близкой к нейтральной реакции почв, взаимодействием с минеральными и органическими компонентами почвенной среды, иммобилизацией некоторых металлов в нерастворимой форме, а для ряда элементов, как, например, Cd и Pb – включением физиологических механизмов барьевой защиты.

Корреляционный анализ общей выборки данных по содержанию ТМ в почвах ($n = 26$) и растений ($n = 78$) полуострова позволил установить некоторые закономерности формирования их элементного состава и выявить ассоциативные группы металлов с наиболее тесными корреляционными связями. В почвах наиболее существенные положительные связи ($r = 0,61–0,81$) получены для ассоциации металлов (Cd–Ni–Zn) и между Pb–Cu, в выборке деревянистых растений ($r = 0,72–0,84$) – для ассоциации металлов (Pb–Cd–Co–Ni) и для Mn–Zn.

Установленные для химического элементного состава растений закономерности были подтверждены результатами факторного анализа (метод главных компонент). Были выделены два главных фактора, объясняющих 71 % общего статистического разброса данных. Первый фактор объединяет группу из четырех значимых элементов с отрицательными показателями факторной нагрузки: Cd (–0,91), Ni (–0,90), Pb (–0,85), Co (–0,84). Для них характерна существенная аккумуляция в почвах полуострова относительно коренных пород

(Co, Cd, Ni, Pb); превышение кларковых уровней, указанных для почв мира и России (Cd, Co, Pb); интенсивное техногенное загрязнение городских почв Владивостока (Pb, Cd). Вероятнее всего, это фактор повышенного содержания металлов в почве, связанный с геохимическими особенностями территории и индицирующий присутствие техногенной составляющей в балансе химического состава растений. При возрастании техногенного давления эти металлы могут оказывать негативное влияние на жизнедеятельность растений региона исследований. На момент исследований эта ассоциация ТМ внесла наибольший вклад в формирование химического состава кустарниковых и травянистых растений. Второй фактор показал высокие положительные значения для Zn (0,86) и Mn (0,83). Это позволяет интерпретировать его как фактор типичных биофильных элементов, связанных с физиолого-биохимическими особенностями растений. Они принимают наибольшее участие в формировании химического состава древесных растений.

Обобщение полученных данных и сравнение их с литературными по другим регионам России и мира позволило выявить следующие эколого-геохимические особенности региона исследований. Фоновый химический состав растений п-ова Муравьев-Амурский значительно превышает кларки растительности суши [10] по содержанию Cd (свыше 20 раз), Pb (до 5 раз) и Co (до 3 раз). Араборифлора полуострова также отличается повышенным содержанием Cd (в 3–4 раза), Co и Cu (до 1,5 раза) относительно растений Европейской России [21], а Cd (в 7 раз) и Co (в 3 раза) – к тому же по сравнению с примерной физиологической нормой для зрелых тканей листьев [17]. Почвы полуострова превышают кларки почв мира [4, 17] и бывшего СССР [16] по Co (до 4 раз), Pb (до 2,5 раза), Cd и Zn (до 1,5–2 раз). По сравнению с региональным кларком почв российского Дальнего Востока [9] они также характеризуются повышенным содержанием Co, Cd и Zn (до 1,6 раза). В то же время содержание в них типичных биогенных элементов – Mn и Cu – ниже указанных в литературе сравниваемых показателей [4, 9, 16, 17] соответственно до 2,5 и 3,5 раза.

Повышенное содержание Cd и Co в почвах и растениях (в почвах, к тому же, Pb и Zn) обусловлено в наибольшей степени региональными геохимическими особенностями горных пород южного Приморья, в которых содержание свинца и особенно кадмия превышает кларковые уровни (Фонды ПГУ. Инв. № 13340). Вероятно, определенную долю в общий баланс элементов вносит и загрязнение среды в результате воздушного переноса техногенных выбросов промышленных предприятий и автотранспорта городской агломерации Владивостока и крупной транспортной магистрали Владивосток–Хабаровск. В то же время содержание Mn в почвах и растениях, а также Zn в растениях ниже средних значений для сравниваемых объектов России и мира.

Основные выводы

1. Установлена высокая биогеохимическая специализация растений в накоплении тяжелых металлов на видовом и биоморфном уровнях организации растительности. Максимальная межвидовая биогеохимическая дифференциация отмечена в содержании наиболее типичных для древесных растений биогенных элементов – Zn (коэффициент вариации – 96 %) и Mn (87 %), а также типичного техногенного металла – Cd (71 %). Наиболее же стабильно в растениях содержание Fe и Cu (34 %). На уровне жизненных форм установлено преимущественное накопление Mn и Zn лиственными деревьями; Pb, Co, Cd – кустарниками и деревянистыми лианами. Деревянистые растения по сравнению с травянистыми обогащены Mn и избирательно Zn (лиственные деревья) и Co (кустарники и лианы), а травянистые – Fe и Ni.

2. По интенсивности почвенного поглощения металлов растениями, количественно выраженной в значениях КБН, получен следующий ранжированный убывающий ряд биологического накопления: Cd > Cu > Zn > Pb > Mn > Ni > Co > Fe. Лучшими концентраторами Cd, Pb, Ni и Fe при этом являются травянистые растения (КБН = 2,36; 0,37; 0,09; 0,008

соответственно), Cu – кустарники (КБН = 0,63), Zn – лиственные деревья (КБН = 0,42), Mn – хвойные деревья (КБН = 0,23).

3. Согласно результатам корреляционного и факторного анализов для почв слабо нарушенных лесных экосистем п-ова Муравьев-Амурский наиболее характерна (Cd–Ni–Zn) ассоциация металлов, для зональных биоморф растений – (Pb–Cd–Co–Ni) ассоциация. На формирование химического состава нижних ярусов растительности (кустарники, травы) наибольшее влияние оказывает повышенное содержание в почвах Pb, Cd, Co и Ni, древесного яруса – биогенные элементы Zn и Mn.

4. Впервые определены для лесных экосистем п-ова Муравьев-Амурский фоновые содержания тяжелых металлов в почвах и растительности (табл. 2 и 3). Они служат локальным экологическим фоном при оценке состояния зеленых насаждений и почв городской агломерации Владивостока и вносят вклад в разработку регионального экологического фона растений и почв южного Сихотэ-Алиня.

5. Выявлены эколого-геохимическая специфика природных лесных экосистем п-ова Муравьев-Амурский, которая заключается в повышенном по сравнению с другими регионами содержании в почвах и растениях Cd и Co (в почвах также Pb и Zn) и более низком – Mn (в растениях, к тому же, Zn).

ЛИТЕРАТУРА

1. Аржанова В.С., Елпатьевский П.В. Геохимия ландшафтов и техногенез. М.: Наука, 1990. 196 с.
2. Бабурин А.А. Биогеохимические особенности растений Дальнего Востока и их таксономическое значение // Лесоведение. 1979. № 1. С. 45–51.
3. Бабурин А.А. Элементный состав растений Дальнего Востока // Экосистемы юга Дальнего Востока. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1981. С. 36–40.
4. Виноградов А.П. Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах. 2-е изд. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 239 с.
5. Геология СССР. Т. 32. Приморский край. Ч. 1. Геологическое строение. М.: Недра, 1969. 696 с.
6. Глазовская М.А., Касимов Н.С. Ландшафтно-геохимическая основа фонового мониторинга природной среды // Вестн. МГУ. Серия 5, География. 1987. № 1. С. 11–18.
7. ГН 2.1.7.2042-06. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве: гигиенические нормативы: утв. 19.01.2006. – http://ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/46/46714/index.php (дата обращения: 26.03.2017).
8. ГН 2.1.7.2511-09. Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве: гигиенические нормативы: утв. 18.05.2009. – http://ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/46/46714/index.php (дата обращения: 26.03.2017).
9. Голов В.И. Микроэлементный состав почв Приморья // Характеристика агроземов Приморья. Уссурийск: ФГУ ГЦАС «Приморский», 2002. С. 145–155.
10. Добровольский В.В. Основы биогеохимии: учеб. пособие. М.: Вышш. шк., 1998. 413 с.
11. Елпатьевский П.В., Аржанова В.С. Поглощение химических элементов древесной растительностью в различных эколого-геохимических условиях // География и природные ресурсы. 1985. № 3. С. 117–125.
12. Иванов Г.И. Почвообразование на юге Дальнего Востока. М.: Наука, 1976. 200 с.
13. Иванов Г.И., Журавков А.Ф. Почвы пригородных лесов Владивостока // Итоги изучения лесов Дальнего Востока: сб. статей. Владивосток: ДВФ СО АН СССР, 1967. С. 72–74.
14. Ивашов П.В. Биогеохимическая индикация загрязнения экосистем химическими элементами // Биогеохимические и гидрологические исследования техногенных экосистем. Вып. 14. Владивосток: Дальнаука, 2004. С. 7–114.
15. Ивашов П.В. Биогеохимическая индикация оловянной минерализации. М.: Наука, 1987. 248 с.
16. Ильин В.Б., Сысо А.И. Микроэлементы и тяжелые металлы в почвах и растениях Новосибирской области. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. 229 с.
17. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.
18. Ковалевский А.Л. Биогеохимия растений. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1991. 294 с.
19. Колесников Б.П. Растительность // Дальний Восток: Физико-географическая характеристика. М.: Изд-во АН СССР, 1961. С. 183–245.
20. Перельман А.И. Геохимия. М.: Вышш. шк., 1979. 423 с.
21. Ровинский Ф.Я., Петрухин В.А., Виженский В.А. и др. Фоновое содержание микроэлементов в природных средах (по мировым данным) // Проблемы фонового мониторинга состояния природной среды. Вып. 4. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. С. 3–50.

22. Скарлыгина-Уфимцева М.Д. Системно-иерархический анализ микроэлементного состава фитобиоты ландшафтов // Тр. Биогеохим. лаборатории АН СССР. 1991. Т. 22. С. 120–134.
23. Уфимцева М.Д., Терехина Н.В. Фитоиндикация экологического состояния урбоэкосистем Санкт-Петербурга. СПб.: Наука, 2005. 339 с.
24. Шихова Н.С. Аккумуляция тяжелых металлов древесными породами в условиях интенсивного техногенеза // Лесоведение. 1997. № 5. С. 32–42.
25. Шихова Н.С., Полякова Е.В. Деревья и кустарники в озеленении города Владивостока. Владивосток: Дальнаука, 2006. 236 с.
26. Шихова Н.С. Комплексная оценка состояния лесов зеленой зоны Владивостока // Лесоведение. 2015. № 6. С. 436–446.
27. Шихова Н.С. Некоторые закономерности в накоплении свинца растениями в условиях урбанизации (на примере г. Владивостока) // Сиб. экол. журн. 2012. № 2. С. 285–294.