

## Биогеохимическая миграция элементов-загрязнителей в урбоэкосистеме

© 2010. Т. А. Михайлова, д.б.н., зав. лабораторией, О. В. Шергина, к.б.н., н.с.,  
Сибирский институт физиологии и биохимии растений СО РАН,  
e-mail: mikh@sifibr.irk.ru, sherolga80@mail.ru

В пределах урбанизированной территории (на примере г. Иркутска) исследовано содержание серы и тяжёлых металлов (свинца, кадмия, меди, цинка) в системе «генетический профиль почв – древесная растительность». Показано высокое накопление элементов-загрязнителей в хвое сосны и лиственницы, листьях берёзы и тополя, а также во всех генетических горизонтах серых лесных почв города. Выявлен дисбаланс элементов в ассимиляционных органах городских деревьев, выражающийся в увеличении доли элементов-загрязнителей на фоне снижения долей азота, фосфора, кальция, магния, калия, марганца. Обнаружена тесная связь между концентрацией поллютантов в хвое (листьях) деревьев и их содержанием в генетических горизонтах почвенного профиля. Полученные результаты свидетельствуют о высокой миграционной способности элементов-загрязнителей в системе почвенного профиля и их активном поступлении в ассимиляционные органы древесных растений из всех горизонтов городских почв. Заключается, что данные о биогеохимической миграции и аккумуляции элементов-загрязнителей в почвах и ассимиляционных органах древесных растений дают возможность адекватно оценить степень техногенной нагрузки на урбоэкосистему.

Within an urbanized territory (by the example of Irkutsk) the content of sulfur and heavy metals (lead, cadmium, copper, zinc) was investigated in the system «genetic soil profile – woody vegetation». High amount of pollutants is found out in the needles of pine and larch, as well as in birch and poplar leaves and in all genetic horizons of grey forest soils. An imbalance of elements in the assimilation organs of city trees is found out. It consists in increasing the amount of pollutants and lessening the amount of nitrogen, phosphorus, calcium, magnesium, potassium, manganese. There was found a close connection between pollutants' concentration in needles (leaves) of trees and their amount in the genetic horizons of soil profile. The results show the ability of pollutants to migrate within the system of soil profile, pollutants get into the assimilation organs of woody plants from all the city soil horizons. It was stated that the data showing biogeochemical migration and pollutants' accumulation in soils and in assimilation organs of woody plants give a good opportunity to estimate the degree of technoigenic impact on the urban ecosystem.

Ключевые слова: урбоэкосистема, промышленное загрязнение, диоксид серы, тяжёлые металлы, древесные растения, генетический профиль почв

Key words: an urban ecosystem, industrial pollution, sulfur dioxide, heavy metals, woody plants, genetic profile of soil

В связи с усилением урбанизации возрастает актуальность исследований состояния окружающей среды городов, особенно тех её компонентов, которые выполняют ключевые средообразующие и средозащитные функции – зелёных насаждений и почвенного покрова. Современные города характеризуются высокой интенсивностью и масштабностью химического загрязнения, поэтому их можно рассматривать как техногенные биогеохимические провинции [1, 2]. Исходя из этого, при оценке качества окружающей среды, на урбанизированных территориях возникает необходимость исследования процессов биогеохимической миграции загрязняющих веществ в системе «почва – растение». Результаты таких исследований дают возможность не только

выявить и спрогнозировать негативные изменения в урбоэкосистемах, но и разработать научно обоснованные рекомендации для оптимизации состояния растений и почвенного покрова в городах.

Постоянно действующими сильными негативными факторами в урбоэкосистемах являются техногенные выбросы и высокая рекреационная нагрузка, именно к ним в первую очередь вынуждены адаптироваться почвы и растения. Анализ данных наших многолетних исследований свидетельствует, что почва как компонент урбоэкосистемы обладает большей устойчивостью к антропогенной нагрузке, более высокой способностью к нейтрализации загрязняющих веществ, чем растительность. Древесные растения, особенно хвойные, являются компонентом, более

уязвимым для воздействия антропогенных факторов. В комплексных исследованиях урбоэкосистем оба эти компонента – почвенный покров и древесная растительность – рассматриваются как высокоинформативные индикаторы накопления и перераспределения поступающих с выбросами химических элементов и их соединений в экосистеме города [3]. Поэтому взаимосвязанное изучение почв и древесных растений позволяет объективно оценить интенсивность техногенного пресса и степень неблагополучия экологической ситуации в городе.

Цель данной работы – исследовать биогеохимическое перераспределение потоков элементов-загрязнителей (серы, свинца, кадмия, меди, цинка) на урбанизированной территории в системе «генетический профиль почв – древесные растения».

Исследования проводились в 2002–2007 гг. на территории города Иркутска – административного и промышленного центра Восточной Сибири. Город включён в приоритетный список населённых пунктов РФ с самым высоким уровнем загрязнения. В 2009 г. индекс загрязнения атмосферного воздуха в Иркутске составил 21,1 [4]. В городе насчитывается 178 предприятий и более 300 котельных. На данный момент основным и наиболее опасным источником загрязнения атмосферы Иркутска является автотранспорт, на его долю приходится около 60% от общего количества выбросов. Такой высокий показатель связан с ежегодным увеличением (на 12–15%) количества автомобилей на дорогах Иркутска. С выбросами промышленности и автотранспорта в атмосферу города поступает до 140 тыс. т токсичных аэрозолей, кислотных компонентов, а также металлов преимущественно в растворимой форме. При этом в атмосферном воздухе выявлено превышение ПДК по 46 вредным веществам [5]. Так, уровень растворимых форм тяжёлых металлов в атмосферном воздухе города составляет 4–10 ПДК, диоксида серы – 6 ПДК [6, 7].

Высокая степень загрязнения города обусловлена также сложными орографическими и климатическими особенностями, препятствующими самоочищению приземного слоя атмосферы. Повышенная влажность воздуха и слабая продуваемость замкнутой котловинной территории Иркутска приводят к формированию сложных ореолов высоких концентраций токсичных соединений, часто с эффектом суммации и синергизма. Высокая загрязнённость воздушного бассейна Иркутска обуславливает

в свою очередь значительный уровень загрязнения зелёных насаждений и почвенного покрова.

Иркутск расположен в зоне подтаёжных сосновых лесов. Почвенный покров представлен преимущественно супесчаными и суглинистыми серыми лесными почвами, формирование которых происходило на продуктах выветривания юрских пород. Для исследования процессов биогеохимической миграции токсикантов в системе «почва–растение» были выбраны парковые и лесопарковые зоны города. Почвы на этих участках сохранили естественное расположение горизонтов в генетическом профиле и природные геохимические свойства, а насаждения лучше адаптируются к загрязнению. Всего было обследовано 16 ключевых участков (парков и лесопарков), расположенных в разных районах города – в центральном, северо-западном, восточном и на городских окраинах. Фоновые участки выбирались на значительном удалении от промышленного центра (в 50–120 км) в естественных лесах Предбайкалья с идентичным генезисом почв.

Объектами исследования служили серые лесные почвы и древесные породы: сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), лиственница сибирская (*Larix sibirica* Ledeb.), тополь (*Populus* sp.), береза повислая (*Betula pendula* Roth). На каждом ключевом участке проводился отбор проб хвои (листьев) на содержание химических элементов, исследовался также ряд морфоструктурных параметров крон деревьев. Обследование почв осуществлялось как методом отбора проб по генетическому профилю до глубины 1,5 м, так и квадратно-конвертным способом усреднённых проб из верхних слоев (0–20 см) почвенного покрова.

В лабораторных условиях в растительных образцах определяли содержание серы общей, а в почвенном растворе – концентрацию подвижных форм серы турбидиметрическим методом осаждения сульфата хлоридом бария [8]. Измерение валовых и подвижных форм тяжёлых металлов в растительных и почвенных образцах производилось методом атомной абсорбции с электротермической атомизацией на приборе-компьютере AAS Vario-6 [9]. Содержание биогенных элементов (азота, фосфора, калия, натрия, кальция, магния, марганца) в ассимиляционных органах древесных растений и почвенном растворе определялось в соответствии с международной методикой ICP Forests [10].

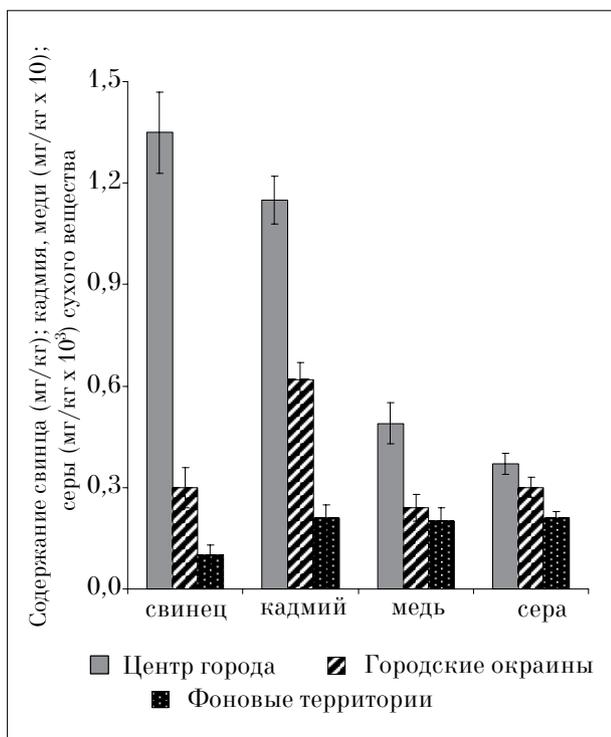


Рис. 1. Содержание элементов-загрязнителей в хвое сосны на городских и фоновых территориях

Полученные результаты свидетельствуют о значительном накоплении тяжёлых металлов и серы в ассимиляционных органах древесных растений Иркутска (рис. 1). Так, концентрация свинца в хвое сосны, произрастающей в центре города, превышает фоновые значения в 13,5 раза, кадмия – в 5,5, меди – в 2,5, серы – в 2. Для деревьев, произрастающих на городских окраинах, выявлено небольшое (до 3 раз) превышение элементов-загрязнителей в хвое и листьях растений.

Следует отметить, что на городских территориях, расположенных вблизи ТЭЦ и ряда промышленных предприятий (заводы сборного железобетона, авиационный, кирпичный), выявляются аномально высокие концентрации тяжёлых металлов и серы в ассимилирующей

фитомассе деревьев. Превышение фонового уровня свинца в хвое сосны и листьях берёзы достигает 25 раз, в хвое лиственницы – 20, в листьях тополя – 15.

Воздействие элементов-загрязнителей на городские древесные растения является одним из факторов ухудшения их морфоструктурных параметров. Выявлены корреляционные связи высокого уровня значимости между характеристиками крон деревьев и содержанием свинца в их хвое (табл. 1). Достоверные корреляционные связи обнаружены также между содержанием серы, кадмия, меди и измеренными морфоструктурными показателями деревьев. На фоновых территориях корреляции не достоверны.

На основании этих связей были установлены математические зависимости между ростовыми параметрами деревьев и содержанием элементов-загрязнителей в ассимиляционных органах. Все показатели (суммарное содержание элементов-поллютантов, величины морфоструктурных параметров) нормировались относительно фоновых значений, которые принимались за один балл. Нормирование производилось по программе STATISTICA. Полученные зависимости (табл. 2) позволяют рассчитать возможное изменение ростовых параметров древесных растений (на примере сосны) при разном уровне содержания элементов-загрязнителей в ассимилирующей фитомассе. Так, при увеличении концентрации поллютантов в хвое сосны происходит выраженное увеличение дефолиации крон деревьев, снижение длины побегов, массы и длины хвои.

В условиях техногенного загрязнения в хвое и листьях деревьев происходят нарушения в соотношениях элементов [11]. Нами показано, что в ассимиляционных органах городских деревьев увеличивается доля серы, свинца, кадмия, меди на фоне снижения долей

Таблица 1

Коэффициенты корреляции между морфоструктурными показателями крон деревьев и содержанием свинца в их хвое ( $P=0,05, n=16$ )

Параметры	Сосна	Лиственница
Масса хвои побега*	-0,69	-0,65
Масса 100 хвоинок	-0,66	-0,71
Охвоенность побега	-0,72	-0,63
Длина побега	-0,78	-0,53
Длина хвои	-0,72	-0,75
Уровень дефолиации крон	0,74	0,64
Уровень дехромации хвои	0,69	0,71

Примечание: \*учитывались побеги 2-го года жизни.

Таблица 2

Зависимости между морфоструктурными параметрами крон деревьев сосны и накоплением элементов-загрязнителей (сумма содержания серы, свинца, кадмия, меди) в их хвое ( $P=0,05, n=16$ )

Параметры	Уравнение (полином)	Величина достоверности аппроксимации ( $R^2$ )
Масса хвои одного побега	$y^*=0,05x^2-1,27x^{**}+13,77$	$R^2 = 0,84$
Длина побегов	$y=0,10x^2-2,12x+13,19$	$R^2 = 0,81$
Длина хвои	$y=0,02x^2-0,67x+12,96$	$R^2 = 0,82$
Уровень дефолиации крон	$y= - 0,07x^2+1,79x+0,41$	$R^2 = 0,85$

Примечание: \* $y$  – морфоструктурные параметры деревьев, балл, \*\* $x$  – уровень накопления (в сумме) загрязнителей в хвое, балл.

азота, фосфора, кальция, магния, калия, марганца (табл. 3). Так, при увеличении концентрации свинца в 15 раз в хвое сосны и листьях березы доля азота и фосфора уменьшается в 8–9 раз, кальция и калия – в 12–13, марганца – в 20, магния – в 30. При увеличении концентрации техногенной серы в 2 раза в хвое и листьях деревьев центральной части города доля азота, фосфора, кальция уменьшается в 1,5 раза, магния, калия – в 2–3, марганца – в 3,5–4,5. На городских окраинах дисбаланс между элементами наименьший. Полученные результаты косвенно свидетельствуют о более высокой токсичности свинца и его соединений для растительного организма.

Исследование почв Иркутска проводилось по всему генетическому профилю, который включает совокупность следующих горизонтов: О – Ad – А – АВ – В (ВЕ) – Vf,t – ВС – С. Каждый из этих горизонтов характеризуется определенными морфологическими призна-

ками: О – маломощная (1–2 см) органическая подстилка средней степени разложения; Ad – гумусово-аккумулятивный горизонт мощностью от 5 до 12 см; А – гумусово-элювиальный горизонт (5–15 см); АВ – переходный элювиально-иллювиальный горизонт (10–20 см); В(ВЕ) – иллювиальный горизонт (10–40 см); Vf,t – иллювиальный текстурный горизонт (15–40 см); ВС – переходный горизонт от иллювиального к почвообразующей породе (15–50 см); С – почвообразующий горизонт (20–70 см).

Полученные результаты свидетельствуют о выраженном изменении содержания подвижных форм серы, свинца, кадмия, меди, цинка по вертикали генетического профиля городских почв. Так, уровень свинца в горизонтах почв (от Ad вглубь до С) может превышать фоновые значения от 2 до 20 раз, кадмия – от 2 до 10, меди – от 1,5 до 15. На примере свинца и серы показано, что

Таблица 3

Изменение соотношений концентраций биогенных элементов и элементов-загрязнителей в хвое и листьях деревьев городских и фоновых территорий

Соотношение элементов	Сосна			Берёза		
	Центр города	Городские окраины	Фон	Центр города	Городские окраины	Фон
Свинец						
N/Pb	1,3	4,2	11,8	1,9	5,8	10,3
P/Pb	2,3	4,6	19,3	2,9	8,6	12,4
Ca/Pb	5,1	16,4	59,8	7,2	24,1	51,3
Mg/Pb	1,8	12,9	54,5	4,1	24,7	38,1
K/Pb	1,1	3,9	14,9	2,3	5,3	10,5
Mn/Pb	1,2	17,6	23,4	2,5	17,5	24,7
Сера						
N/S	4,2	4,6	5,8	4,3	4,8	6,9
P/S	5,6	6,3	8,7	5,7	6,1	8,3
Ca/S	21,3	25,3	28,2	28,9	30,5	34,2
Mg/S	8,2	15,8	24,7	7,8	17,3	25,3
K/S	3,1	4,2	6,8	3,4	4,5	6,5
Mn/S	1,9	5,3	8,2	4,5	12,5	16,5

наибольшее содержание подвижных форм элементов-загрязнителей обнаруживается в верхних гумусово-аккумулятивных горизонтах почв (рис. 2), что объясняется прочной фиксацией этих элементов органическим веществом. В минеральных горизонтах В(ВЕ) отмечается снижение уровня свинца и серы, что обусловлено промывным типом режима серых лесных почв городской территории. В иллювиальных текстурных горизонтах концентрация токсикантов снова возрастает за счет прочной фиксации ионов свинца и серы иллювиальными коллоидами. В почвообразующих горизонтах зарегистрировано значительное увеличение содержания свинца и серы в сравнении с фоновым уровнем, что свидетельствует об активном вертикальном перемещении этих элементов с фильтрационными водами.

На городской территории обнаружены также значительные изменения в составе почвенного поглощающего комплекса (ППК): уровень обменных форм кальция в верхних горизонтах почв увеличивается по сравнению с фоновым в 1,4–10 раз, магния и калия – в 1,2–2,5, натрия – в 1,2–6. О поступлении этих элементов на поверхность почвы с техногенными выбросами и их дальнейшей

вертикальной миграции в почвенном профиле свидетельствуют достоверные корреляционные связи ( $r = 0,75-0,90$ ) между содержанием этих элементов в органической подстилке и в почвенных генетических горизонтах: Ad (гумусово-аккумулятивном), Bt,f (иллювиальном текстурном), C (почвообразующем).

Смещение реакции почвенного раствора в сторону подщелачивания (вблизи автодорог) либо подкисления (в зонах промышленных предприятий) также является фактором нарушения химического равновесия почв Иркутска. Установлено, что при изменении кислотности городских почв происходит взаимодействие свинца, кадмия, меди, серы с обменными катионами ППК в системе почвенного профиля, причём во всех его горизонтах. В почвах фоновых районов подобные взаимодействия выявляются только в гумусовых и почвообразующих горизонтах и в меньшей степени.

При сопоставлении данных о содержании токсикантов в почвенных горизонтах с их концентрацией в хвое и листьях деревьев на городской территории установлены прямые корреляционные связи. Например, довольно высоки коэффициенты корреляции между накоплением свинца в горизонтах почв и его содержанием в ассимиляционных органах растений ( $r = 0,52-0,75$ ) (табл. 4). Исходя из этих данных, можно говорить о наличии процесса высвобождения свинца в почвенный раствор и об его активном поступлении в корневую систему и далее в ассимиляционные органы древесных растений из всей глубины профиля серых лесных почв города.

В целом полученные результаты свидетельствуют, что при техногенном загрязнении городской среды происходит активное накопление и интенсивная миграция элементов-загрязнителей в системе «почва – древесные растения». Показано, что поллютанты неорганической природы (тяжёлые металлы и диоксид серы) оказывают сильное негативное воздействие на минеральный статус деревьев и физико-химические свойства почв. На городской территории аккумуляция токсикантов в ассимиляционных органах древесных растений является значимым фактором, вызывающим нарушение их ростовых характеристик. Уровень элементов-загрязнителей в хвое и листьях городских деревьев превышает их фоновое содержание от 2 до 25 раз, что вызывает дисбаланс между биогенными элементами и поллютантами. Существенно увеличивается

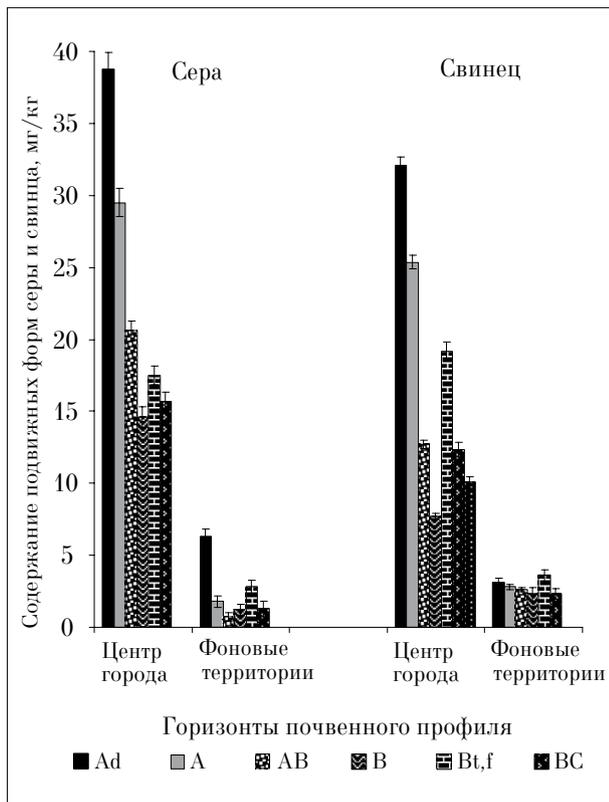


Рис. 2. Содержание подвижных форм серы и свинца в генетических горизонтах городских и фоновых почв

Таблица 4

Коэффициенты корреляции между содержанием свинца в горизонтах почв и хвое (листьях) деревьев на городской территории ( $P=0,05, n=16$ )

Объект анализа	Индексы горизонтов почвенного профиля							
	O	Ad	A	AB	B(BE)	Bt,f	BC	C
Хвоя сосны	0,73	0,61	0,71	0,70	0,60	0,68	0,63	0,71
Хвоя лиственницы	0,54	0,62	0,58	0,68	0,55	0,54	0,54	0,67
Листья берёзы	0,59	0,74	0,62	0,54	0,67	0,65	0,62	0,61
Листья тополя	0,61	0,69	0,75	0,60	0,52	0,58	0,52	0,63

доля свинца, а также серы на фоне снижения долей азота, фосфора, кальция, магния, калия, марганца.

Обнаружено значительное содержание элементов-загрязнителей во всех генетических горизонтах серых лесных почв. Особенно высокий их уровень выявлен в гумусово-аккумулятивных и иллювиальных текстурных горизонтах, где фоновые значения превышены в 20 раз. Установлены нарушения в составе ППК, обусловленные изменением кислотного режима и увеличением содержания элементов-загрязнителей в почвенном растворе генетических горизонтов. Наличие достоверных корреляционных связей между содержанием элементов-загрязнителей в горизонтах почвенного профиля и уровнем их концентрации в хвое и листьях городских деревьев подтверждает высокую экологическую значимость почвенного покрова и древесных растений в перераспределении потоков загрязняющих веществ на урбанизированной территории.

### Литература

1. Ковальский В.В. Геохимическая экология. М.: Наука, 1974. 298 с.
2. Экология города. М.: Научный мир, 2004. 624 с.
3. Шергина О.В., Михайлова Т.А. Состояние древесных растений и почвенного покрова парковых и ле-

сопарковых зон г. Иркутска. Иркутск: Изд-во Института географии СО РАН, 2007. 200 с.

4. Государственный доклад. О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области в 2008 году. Иркутск: Облмашинформ, 2009. 410 с.

5. Региональный экологический атлас. Новосибирск: СО РАН, 1998. 321 с.

6. Экогеохимия городов Восточной Сибири. Якутск: Институт мерзлотоведения СО РАН, 1993. 108 с.

7. Атлас. Иркутская область (экологические условия развития). Москва–Иркутск: Изд-во Института географии СО РАН, 2004. 90 с.

8. Мочалова А.Д. Спектрофотометрический метод определения серы в растениях // Сельское хозяйство за рубежом. 1975. № 4. С. 17.

9. Пройдакова О.А., Цыханский В.Д., Матвеева Л.Н., Гормашева Т.С., Халтуева В.К. Физико-химические методы при определении макро- и микроэлементов в объектах окружающей среды // Геохимия техногенеза. Новосибирск: Наука, 1986. С. 124–130.

10. Manual on methodologies and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. Hamburg and Prague. United Nations Environment Programme and Economic Commission for Europe. 1994. 477 p.

11. Михайлова Т.А., Бережная Н.С., Игнатьева О.В. Элементный состав хвои и морфофизиологические параметры сосны обыкновенной в условиях техногенного загрязнения. Иркутск: Изд-во Института географии СО РАН, 2006. 134 с.