

УДК 504.73:504.53.054

Биогеохимическое перераспределение свинца в урбоэкосистеме (на примере Иркутска)

О. В. ШЕРГИНА, Т. А. МИХАЙЛОВА

*Сибирский институт физиологии и биохимии растений Сибирского отделения РАН, ул. Лермонтова, 132, Иркутск 664033 (Россия)**E-mail: mikh@sifibr.irk.ru*

(Поступила 27.01.10; после доработки 30.03.10)

Аннотация

На территории Иркутска – крупного промышленного центра Восточной Сибири – исследовано содержание свинца в древесной растительности и в почве на профилно-генетическом уровне. Показано, что поступление свинца с техногенными выбросами вносит существенный вклад в загрязнение урбоэкосистемы. Накопление свинца в хвое и листьях древесных растений на городской территории может превышать фоновые значения более чем в 10 раз, максимально – до 25 раз. Высокий уровень свинца выявлен также в органической подстилке и гумусово-аккумулятивных горизонтах. Обнаружена его активная вертикальная миграция в текстурные иллювиальные и почвообразующие горизонты генетического профиля почв. Показано, что при перераспределении подвижных форм свинца в почвенном растворе органических и минеральных горизонтов происходит его взаимодействие с фосфат- и сульфат-ионами, с обменными катионами (натрия, кальция, магния), а также с ионами тяжелых металлов (цинка, меди, кадмия, марганца). Выявлены достоверные прямые связи между содержанием подвижного свинца в городских почвах и его концентрацией в ассимиляционных органах древесных растений.

Ключевые слова: урбоэкосистема, техногенное поступление свинца, генетический профиль почв, древесные растения

ВВЕДЕНИЕ

Техногенное загрязнение городов становится все более значимой проблемой человечества, масштаб и опасность которой подтверждаются сведениями о значительном поступлении токсикантов на урбанизированные территории [1, 2]. В спектре загрязняющих веществ городской среды значительное место занимают тяжелые металлы, особенно свинец и его соединения. Этот элемент относится к токсикантам первого класса опасности, обладает высокой растворимостью, биохимической активностью и канцерогенностью; имеет повышенную тенденцию к биоаккумуляции и комплексообразованию; может находиться в окружающей среде в минеральной и органической формах [3]. В атмосферном воздухе свинец способен образовывать разнообразные оксиды, вступать в реакции

с кислотами и щелочами. К основным источникам свинца как элемента-загрязнителя относятся выхлопные газы, аэрозоли автотранспорта и техногенная пыль, которая содержит большое количество свинца в виде соединений, плохо растворимых в воде, например оксидов и сульфидов [4]. Суммарное поступление свинца в атмосферу от автотранспорта на территории РФ оценивается в 30 тыс. т ежегодно [5]. Особо опасно применение автомобилистами этилированного бензина, в состав которого входит тетраэтилсвинец. Хотя в России этилированный бензин был запрещен Федеральным законом (№ 34-ФЗ от 2003 г.), на территории РФ до сих пор действует ГОСТ 2084–77, который позволяет выпускать как неэтилированный (концентрация свинца 0.015 г/л), так и этилированный бензин нового поколения (содержание свинца снижено с 0.45–0.35 до 0.15 г/л). В этой связи проблема

свинцового загрязнения окружающей среды по-прежнему остается актуальной, и ее решение связано с полным отказом от использования свинецсодержащего бензина.

При сгорании автомобильного топлива около 70 % свинца, добавленного к бензину с этиловой жидкостью, попадает в окружающую среду с отработанными газами, из них 30 % оседает на поверхности сразу, а 40 % остается в атмосфере [6]. Особенность загрязнения атмосферы автотранспортом заключается в том, что вредные вещества не концентрируются в определенной зоне с ограниченным радиусом, а распространяются по всей территории города.

В результате техногенного поступления соединений свинца в урбоэкосистему во всех ее компонентах значительно повышается содержание этого токсиканта. Так, установлено, что загрязнение почв свинцом носит в основном необратимый характер (период его полураспада в почвах составляет 740–5900 лет), поэтому накопление свинца в почвах не прекращается даже в условиях небольшого его поступления [3]. Особенно сильно содержание этого элемента возрастает в почвах и растениях, расположенных вдоль автомагистралей. Соединения свинца негативно влияют на микробиологическую активность почв и рост растений. При поступлении в растительный организм свинец нарушает процессы фотосинтеза и дыхания, деление клеток, поглощение воды корневыми системами, обмен веществ в целом, ингибируя ряд ферментов. Кроме того, свинец может существенно снижать доступность для растений многих биогенных элементов [7, 8].

Изучение биогеохимического перераспределения свинца в важнейших компонентах урбоэкосистемы – растениях и почве – позволяет получить адекватное представление об интенсивности процессов техногенеза и основных миграционных потоках этого токсиканта на урбанизированной территории.

Цель данной работы – исследование накопления и перераспределения техногенного свинца в генетическом профиле городских почв, выявление связи этих процессов с его аккумуляцией в ассимилирующей фитомассе древесных растений.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования проводились на территории Иркутска – крупного индустриального центра Восточной Сибири. По данным Минприроды России [9], Иркутск входит в десятку самых загрязненных городов страны: его индекс загрязнения атмосферного воздуха составляет 21.1 [10]. При этом на долю автотранспорта приходится около 60 % от общего количества городских выбросов. Экологическая ситуация усугубляется также наличием многочисленных отопительных предприятий, использующих уголь низкого качества, при сжигании которого в атмосферу города поступает большое количество тяжелых металлов, в том числе и токсичного свинца. Еще один фактор, обуславливающий высокую степень загрязнения города, – сложные орographic и климатические условия, приводящие к застаиванию воздушных масс и скоплению загрязняющих веществ на городской территории [11]. По результатам экологических исследований, ореол повышенной концентрации свинца охватывает центральную часть города, где его содержание в воздухе достигает 7.6 мкг/м^3 (при ПДК 0.3 мкг/м^3), в почве – $60\text{--}100 \text{ мг/кг}$, в твердом осадке снега – 220 мг/кг [12].

Иркутск расположен в зоне подтаежных сосновых лесов. Почвенный покров прилегающих к городу территорий представлен преимущественно серыми лесными почвами супесчаного и суглинистого состава. Формирование почв происходило на четвертичных суглинистых отложениях, генетически связанных с юрскими песчаниками и сланцами, что во многом определяет их состав и свойства [13].

Исследования проводились в 2002–2007 гг. в парковых и лесопарковых зонах разных районов Иркутска. Участки для исследований выбирались в соответствии с картой атмосферного загрязнения [14]. На городской территории было заложено 16 постоянных пробных площадей (ПП), на 13 из которых распространены серые лесные почвы [11]. В центральной части города обследовались Центральный парк культуры и отдыха, парк в микрорайоне Лисиха, парк им. Парижской коммуны, лесопарк вблизи курорта “Ангара”; в северо-западной части города – Железно-

дорожный парк в Ново-Ленино, лесопарковая зона в 6-м микрорайоне Ново-Ленино, парк в Иркутске-2; в восточной части – парк в микрорайоне Байкальский, лесопарк в районе аэропорта; на городских окраинах – лесопарковая зона Академгородка, лесопарковая зона в микрорайоне Юбилейный, лесопарковая зона вблизи Областной станции юннатов, лесопарковая зона в пригородном пос. Искра. Фоновые ПП были заложены на территориях с идентичным типом почвообразования, расположенных на значительном удалении (50–120 км) от города.

Объектами исследования служили серые лесные почвы и древесные породы: сосна обыкновенная, лиственница сибирская, береза повислая, тополь. Параллельно с обследованием древесной растительности на ПП проводилось комплексное изучение почвенного покрова. Обследованные городские почвы относятся к естественным, с разной степенью нарушенности верхних горизонтов. Натурное обследование почв проводилось методом почвенных разрезов глубиной до 1.5 м и посредством отбора усредненных проб квадратно-конвертным методом. В лабораторных условиях выполнялось определение подвижного и валового свинца в растительных и почвенных пробах методом атомной абсорбции с электротермической атомизацией на приборе AAS Vario-6 фирмы Analytik Jena. Погрешность определения на уровне предела обнаружения составляет 10–30 %. Определение содержания свинца в растительных пробах и подстилке осуществлялось после предварительного озоления материала с соляной кислотой. В почвенных пробах измерение подвижного свинца выполнялось в вытяжке раствора 1 М HCl. Кроме того, в почвенных образцах определяли содержание фосфора фотоколориметрическим методом с образованием фосфомолибденового комплекса в сернокислрой вытяжке (метод Труога); содержание серы – турбидиметрическим методом осаждения сульфата хлоридом бария в солевой вытяжке; содержание калия, натрия – методом эмиссионной пламенной фотометрии в вытяжке с уксуснокислым аммонием; содержание кальция, магния, марганца, цинка, меди – методом атомной абсорбционной спектроскопии с пламенной атомизацией в уксуснокислой и солянокислой вы-

тяжках; содержание кадмия – методом атомной абсорбции с электротермической атомизацией в солянокислой вытяжке [15–17]. Все полевые и лабораторные исследования почв и древесных растений проводились в соответствии с международной методикой ICP Forests [18].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При определении содержания свинца в хвое и листьях древесных растений выявлено его значительное увеличение на всей городской территории по сравнению с фоновым уровнем (рис. 1). Самое высокое содержание свинца зарегистрировано в центральной части города, где оно превышает фоновые значения в хвое сосны в 13.5 раз, в хвое лиственницы – в 9 раз, в листьях березы – в 8 раз, тополя – в 6 раз. Довольно высокий уровень свинца в ассимиляционных органах растений зарегистрирован также и в северо-западной части города, подпадающей под перенос загрязненного воздуха от предприятий крупного соседнего индустриального центра – г. Ангарска. Необходимо отметить, что на локальных участках в центральной и северо-западной частях города обнаружены аномально высокие концентрации свинца в хвое и листьях деревьев, превышающие фоновые более чем в 20–25 раз.

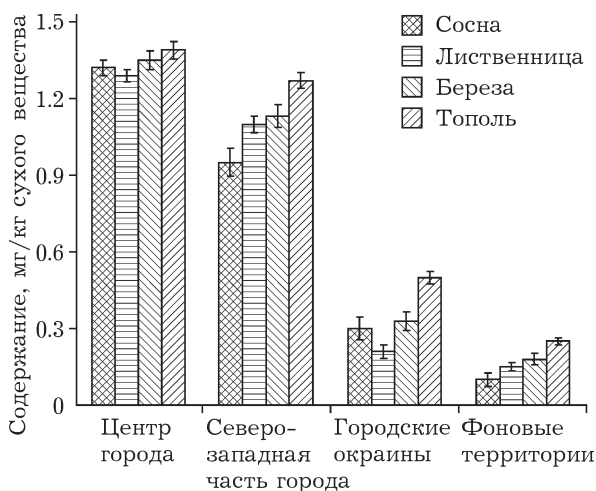


Рис. 1. Содержание свинца в хвое и листьях древесных растений в разных районах Иркутска.

На городских окраинах уровень свинца в ассимиляционных органах растений заметно ниже: его содержание превышает фоновые значения в 1.5–3 раза (см. рис. 1). По данным работ [7, 19], в промышленных районах увеличение содержания свинца в хвое и листьях растений даже в два раза свидетельствует о техногенном загрязнении окружающей среды. Следовательно, можно говорить о значительном загрязнении Иркутска соединениями свинца.

Необходимо отметить, что результаты фитоиндикации дают общую картину загрязнения той или иной экосистемы, т. е. это результирующая атмосферного и почвенного загрязнения среды. Для получения представления о степени загрязненности свинцом такого компонента, как почва, исследовано геохимическое поведение этого токсиканта и оценена возможность его поглощения корневыми системами растений.

Исследование почв Иркутска проводилось по всему генетическому профилю, который включает совокупность следующих горизонтов: О–Ad–А–AB–B(BE)–Bt,f–BC–C. Обнаружено, что органическая подстилка О (лесная подстилка) почв города, как правило, маломощная (обычно менее 2 см) и плохо разложившаяся. При изучении содержания в подстилке подвижных и валовых форм свинца обнаружен достоверно высокий уровень корреляции между этими показателями ($r = 0.86$), что свидетельствует о двух совместно протекающих процессах – активном высвобождении подвижных форм свинца в почвенный раствор и его аккумуляции в органическом веществе. При этом подвижные формы свинца в органической подстилке городских почв составляют 65–75 % от их валового содержания. Уровень концентрации подвижного свинца в органической подстилке на городской территории превышает фоновые значения в 1.5–17 раз, максимальное значение зафиксировано в центральной части города и составляет 42 мг/кг сухого вещества (фоновое – 2.5 мг/кг).

Основной определяющий фактор поведения соединений свинца в подстилке и их дальнейшего перераспределения в почвенном профиле – кислотность почвенного раствора. Величина потенциальной кислотности органической подстилки парков и лесопарков Ир-

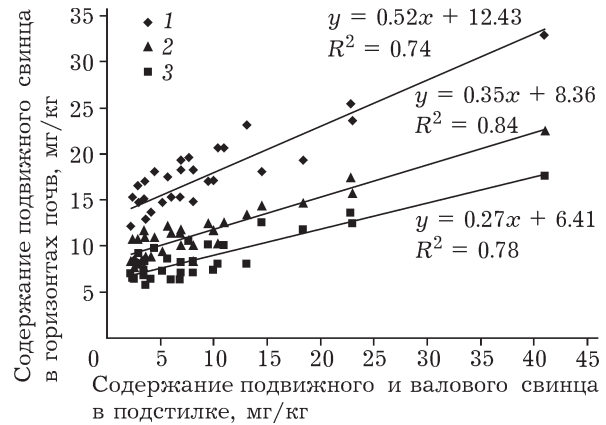


Рис. 2. Зависимость между содержанием свинца в подстилке и в почвенных горизонтах городских почв: 1 – горизонты Ad, 2 – горизонты Bt,f, 3 – горизонты C.

кутска находится в диапазоне нейтральных и слабощелочных значений (pH_{KCl} 5.6–6.5). Известно, что при таком уровне кислотности раствора органической подстилки могут легко образовываться гидроксид $Pb(OH)_2$, мобильные комплексы фульвокислот со свинцом [20]. Так, выявлены линейные зависимости между содержанием подвижного свинца в органической подстилке и в генетических горизонтах почв: Ad (гумусово-аккумулятивном), Bt,f (иллювиальном текстурном), C (почвообразующем) (рис. 2). Эти результаты свидетельствуют о значительном поступлении соединений свинца с техногенными выбросами на поверхность почвы и их дальнейшей фиксации в составе органического вещества (горизонт Ad) и илистой фракции (горизонт Bt,f) почв. На высокую миграционную способность соединений свинца в пределах всей почвенной толщи указывает их присутствие на глубине почвообразующего горизонта C.

Таким образом, в серых лесных почвах Иркутска перераспределение подвижных форм свинца происходит по всему генетическому профилю. По сравнению с почвами фоновых территорий содержание подвижного свинца в городских почвах значительно выше (рис. 3). В то же время генетические горизонты проявляют различную аккумулятивную способность по отношению к техногенному свинцу. Основная доля подвижных форм свинца в городских почвах сосредоточена в верхних гумусово-аккумулятивных горизонтах Ad и A, где его концентрация превышает фоно-



Рис. 3. Содержание подвижного свинца в генетических горизонтах городских и фоновых почв.

вые значения в 9–10 раз, максимальная концентрация (57.5 мг/кг) зарегистрирована в верхнем слое почвы Центрального парка города. В нижележащих горизонтах городских почв АВ и В отмечается выраженное снижение уровня подвижного свинца, в минеральных горизонтах Bt,f его концентрация снова возрастает, что можно объяснить прочной фиксацией ионов свинца иллювиальными коллоидами.

При исследовании миграционной способности подвижного свинца в почвенном растворе генетических горизонтов обнаружены корреляционные связи между содержанием подвижных форм этого токсиканта и обменными формами кальция, магния, натрия, подвижными формами серы, фосфора, кадмия, меди, цинка, марганца. Так, выявленная связь между содержанием подвижных форм свинца и обменного кальция (рис. 4) указывает на совместную миграцию соединений этих элементов в системе почвенного профиля. Подобный характер взаимодействия между соединениями свинца и кальция рассмотрен в ряде работ [21, 22]. Исследователи считают, что при этом химическом процессе происходит образование заряженных комплексов $[Pb(OH)]^+$, а также малорастворимой соли – карбоната свинца. При регрессионном анализе данных о содержании подвижного свинца и обменного натрия в горизонтах генетического профиля городских почв также выявляе-

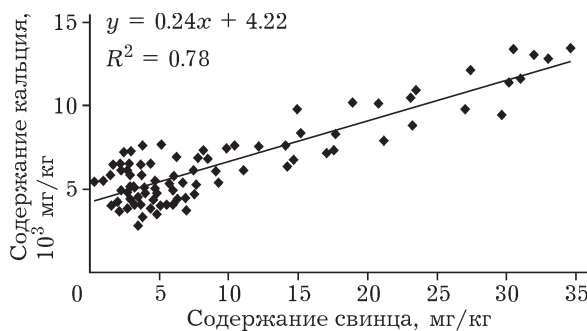


Рис. 4. Зависимость между содержанием подвижных форм свинца и обменных форм кальция в генетическом профиле почв.

на прямая зависимость между этими показателями ($r = 0.68$), что свидетельствует о совместной миграции подвижных соединений свинца и натрия. Для верхних гумусово-аккумулятивных горизонтов почвенного покрова города обнаружены прямые корреляционные связи между содержанием подвижного свинца и обменного магния ($r = 0.73$), а также подвижного фосфора ($r = 0.45$), что указывает на совместное присутствие этих элементов в составе органических соединений почв. Кроме того, для всех почвенных горизонтов обнаружены высокие положительные корреляционные связи между содержанием подвижных форм свинца и серы ($r = 0.90$) – одного из самых распространенных техногенных загрязнителей в городской среде (рис. 5). По мнению исследователей [20, 23], подвижные формы свинца в почвенном растворе взаимодействуют с мобильными соединениями серы, при этом поведение и миграция соединений свинца в существенной мере зависят от кислотного режима почв.

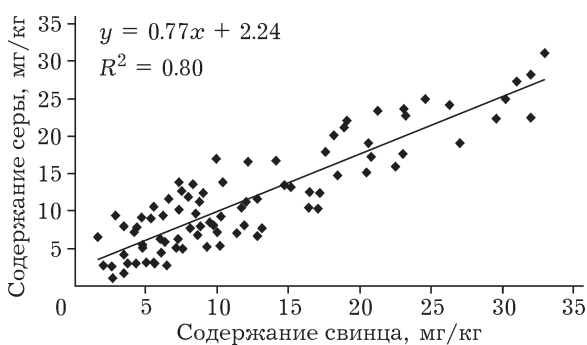


Рис. 5. Зависимость между содержанием подвижных форм свинца и серы в генетическом профиле почв.

ТАБЛИЦА 1

Зависимость между содержанием свинца (x) и других тяжелых металлов (y) в серых лесных почвах Иркутска ($P = 0.05$, $n = 80$)

Элемент	Линейное уравнение	R^{2*}
Цинк	$y = 0.46x + 6.36$	0.71
Медь	$y = 0.17x + 1.92$	0.65
Кадмий	$y = 0.10x + 0.42$	0.60
Марганец	$y = 0.05x + 1.87$	0.48

*Величина достоверности аппроксимации.

Что касается содержания подвижных форм тяжелых металлов, то на основании полученных данных для городских почв выявлен следующий ряд их корреляций (в порядке убывания) с подвижным свинцом в пределах почвенного профиля: $Zn > Cu > Cd > Mn$. Таким образом, можно говорить об общности механизмов миграции соединений свинца и соединений цинка, меди, кадмия, марганца в системе почвенного профиля. Зависимости между содержанием подвижного свинца и других тяжелых металлов в генетическом профиле городских почв описываются линейными уравнениями (табл. 1).

При сопоставлении данных о содержании свинца в почвенных горизонтах с его концентрацией в хвое и листьях деревьев на территории Иркутска выявлено наличие прямых достоверных связей между этими параметрами (табл. 2).

Практически для всех горизонтов почв установлены связи высокого уровня значимости. Следовательно, полученные данные о профилно-генетическом перераспределении техногенного свинца указывают на возможность его активного корневого поглоще-

ния древесными растениями из загрязненных почв урбанизированных территорий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поступление свинца с техногенными выбросами – существенный фактор загрязнения урбоэкосистем, о чем свидетельствуют данные по его аккумуляции и перераспределению в горизонтах почвенного профиля и в растениях. Содержание свинца в хвое и листьях древесных растений на городской территории может возрастать на порядок и более по сравнению с фоновым уровнем. В ряде случаев выявлены аномально высокие концентрации свинца в ассимиляционных органах, превышающие фоновые значения в 25 раз. Во всех генетических горизонтах почвенного профиля городских почв также обнаружено значительное содержание подвижного свинца, при этом его концентрация в 2–20 раз превышает фоновые значения. О выраженном техногенном загрязнении почв города свидетельствует высокое содержание подвижного свинца в органической подстилке (O), гумусово-аккумулятивных горизонтах (Ad и A), а также его активная вертикальная миграция в текстурные иллювиальные (Bt,f) и почвообразующие горизонты (C) генетического профиля почв. Обнаружены достоверные корреляционные связи между содержанием свинца и биогенными элементами (кальцием, магнием, натрием, серой, фосфором), а также тяжелыми металлами (цинком, медью, кадмием, марганцем) в почвах города, указывающие на общность механизмов миграции соединений этих элементов в системе генетического профиля городских почв. На основа-

ТАБЛИЦА 2

Значимые коэффициенты корреляции между содержанием свинца в почвах и хвое (листьях) древесных растений на территории Иркутска ($P = 0.05$, $n = 16$)

Часть растения	Индексы горизонтов почвенного профиля							
	O	Ad	A	AB	B	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 тополя	0.61	0.69	0.75	0.60	0.52	0.58	0.52	0.63
Листья березы	0.59	0.74	0.62	0.54	0.67	0.65	0.62	0.61

нии выявленных прямых связей между содержанием подвижного свинца в почвах и его концентрацией в хвое (листьях) деревьев можно заключить, что почвенный покров в городе во многом определяет степень накопления техногенного свинца в ассимиляционных органах растений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Экогеохимия городских ландшафтов. М.: Изд-во МГУ, 1995.
- 2 Б. А. Ревич. "Горячие точки" химического загрязнения окружающей среды и здоровье населения России. М.: Акрополь, 2007.
- 3 Методические указания по оценке степени опасности загрязнения почвы химическими веществами. М.: МЗ СССР, 1998.
- 4 Воробьев С. А. // Безопасность жизнедеятельности. 2003. № 10. С. 36–38.
- 5 Доклад о свинцовом загрязнении окружающей среды Российской Федерации и его влиянии на здоровье населения. М.: РЭФИА, 1997.
- 6 Гурьев Т. А., Тутыгин Г. С., Филимонкова Е. Ю. // Автомоб. дороги. 1999. № 1. С. 24–39.
- 7 Парибок Т. А., Леина Г. Д., Сазыкина Н. А. // Ботан. журн. 1981. Т. 66, № 11. С. 1646–1654.
- 8 Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989.
- 9 Государственный доклад о состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2008 году. МПР и экологии РФ, Москва, 2009.
- 10 Государственный доклад о состоянии окружающей среды Иркутской области в 2007 г. Иркутск: Облмашинформ, 2008.
- 11 Михайлова Т. А., Шергина О. В., Бережная Н. С. // Хим. уст. разв. 2007. Т. 15, № 3. С. 351–358.
- 12 Геоэкологическая характеристика городов Сибири. Иркутск: изд. Ин-та географии СО АН СССР, 1990.
- 13 Рынкс И. Н. Почвы Приангарской лесостепи и их сельскохозяйственное использование. Иркутск: Иркут. кн. изд-во, 1959.
- 14 Атлас. Иркутская область (экологические условия развития). М.–Иркутск: изд. Ин-та географии СО РАН, 2004.
- 15 Аринушкина Е. В. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ, 1962.
- 16 Физико-химические методы исследования почв. М.: Наука, 1966.
- 17 Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975.
- 18 Manual on Methodologies and Criteria for Harmonized Sampling, Assessment, Monitoring and Analysis of the Effects of Air Pollution on Forests. United Nations Environment Programme and Economic Commission for Europe. Hamburg and Prague, 1994.
- 19 Феник С. И., Трофимьяк Т. Б., Блюм Я. Б. // Усп. совр. биол. 1995. Т. 115, № 3. С. 261–275.
- 20 Орлов Д. С. Химия почв. М.: Изд-во МГУ, 1985.
- 21 Ладонин Д. В. // Почвоведение. 2000. № 10. С. 1285–1293.
- 22 Понизовский А. А., Мироненко Е. В., Кондакова Л. П. // Почвоведение. 2001. № 7. С. 817–822.
- 23 Полянский Н. Г. Свинец (Аналитическая химия элементов). М.: Наука, 1986.