

Влияние аэротехногенной нагрузки на накопление тяжёлых металлов сельскохозяйственными культурами вблизи мегаполиса

Е.А. Карпова

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Изучался вклад аэротехногенной нагрузки в накопление тяжёлых металлов (ТМ) сельскохозяйственными растениями вокруг мегаполиса (г. Москва). Поток ТМ – Cd, Pb, Ni – на территорию четырёх опытных станций был в пределах фонового для агроландшафтов Центральной Европы и ЕТР. Выпадения хрома на территории учебно-опытного центра МГУ Чашниково значительно превышали уровень, характерный для Центральной Европы и обнаруженный на других опытных станциях. В почвах определяли подвижные и кислоторастворимые формы ТМ. В растениях с индикаторным типом накопления (овёс, викоовсяная смесь, клевер) содержание Cd, Cr, Pb зависело от суммарного уровня атмосферных выпадений и от содержания кадмия и свинца в подвижной и кислоторастворимой формах в почве. В зерне злаков (отражательный тип накопления) концентрация ТМ значительно ниже, чем в растениях (органах)-индикаторах. Атмосферные выпадения оказывали влияние на концентрацию Cd и Cr в зерне. Отмечена также зависимость между количеством кадмия в зерне и в кислотной вытяжке из почвы.

The influence of aerotechnogenic load on heavy metals (HM) accumulation in agricultures in the vicinity of Moscow megapolis is considered. The emission of HM such as Cd, Pb, Ni on the territory of the four experimental stations took place within the background framework for agro-landscapes of Central Europe and European Russia. Chromium fall-outs on the territory of the training-experimental centre Chashnikovo of the MSU exceeded the level characteristic for Central Europe and registered in other experimental stations. In soil mobile and acid-soluble forms of HM were determined. In plants with indicator type accumulation (oats, vetch-oats mixture, clover) the amount of Cd, Cr, Pb depends on the amount of atmospheric precipitates as well as on the amount of cadmium and lead in mobile and acid-soluble forms in soil. In the seeds of gramineous plants (catoptric type of accumulation) concentration of HM is considerably lower than in indicator plants (organs). Atmospheric precipitates influenced the concentration of Cd and Cr in grain. There also was found out some dependence of the amount of cadmium either in grain or in soil extract.

Ключевые слова: аэротехногенная нагрузка, тяжёлые металлы, сельскохозяйственные растения, почва, ПДК, подвижные и кислоторастворимые формы

Введение

Полноценная жизнь человечества невозможна без благоприятной экологической среды и безопасной качественной пищи. В перечне веществ, представляющих наибольшую опасность для человека и животных, одно из первых мест занимают тяжёлые металлы (ТМ). Их содержание нормируется в почве, атмосферном воздухе, питьевой воде, продуктах питания. Именно с продуктами питания в организм человека попадает основная доля ТМ (по оценкам разных исследователей, около 70 – 80% от всех поступлений).

Получение пищевого сырья находится в сфере сельскохозяйственного производства. Агроэкосистема и её основа – агроценоз – формируют определённую (необходимую) биопroduкцию, которая характеризуется не только количественными показателями, т. е. продуктивностью, но и показателями качества, в том числе и безопасности.

Характер накопления ТМ сельскохозяйственными культурами в агроэкосистеме зависит от множества факторов: свойств почвы и каждого из металлов; состояния металлов в почве; соотношения металлов и элементов питания; аэротехногенной нагрузки, форм и доз применяемых удобрений, погодных условий вегетационного периода, а также от биологических особенностей (вида) растения.

Целью работы было изучение роли аэротехногенной нагрузки в накоплении ТМ сельскохозяйственными растениями. Объектом данного исследования служили агроэкосистемы, расположенные в Московской области вблизи г. Москвы (на расстоянии 1,5 – 20 км от кольцевой автодороги) и испытывающие разную техногенную нагрузку.

Методика исследования

На территории трёх агрохимических опытных станций: Долгопрудной (ДАОС), Люберецкой (ЛОП), Раменской (РАОС)

и учебно-опытного почвенно-экологического центра МГУ «Чашниково» отбирали пробы почв, растений и снега. Для того чтобы исключить влияние агрохимических средств на накопление ТМ сельскохозяйственными культурами, образцы почв и растений отбирали на контрольных (без внесения удобрений) вариантах полевых опытов. Пробы снега [1] были отобраны в феврале 2002 и марте 2003 гг. на всех опытных полях. В жидкой и твёрдой фазе осадков определяли ТМ. В твёрдой фазе – после разложения смесью концентрированных $\text{HCl} + \text{HNO}_3$. Все результаты – средние за 2 года.

Пробы почв и растений были отобраны в 1989, 1990, 1995, 2001 – 2004 гг. Подвижные и кислоторастворимые соединения ТМ в почвах определяли в вытяжках ацетато-аммонийного буферного (ААБ) раствора с рН 4,8 и 1М р-ра HCl соответственно. Соотношение почва:раствор в обоих случаях – 1:10. Растения анализировали после сухого озоления при 450°C и растворения в 10%-ном растворе $\text{HCl} + \text{HNO}_3$.

Во всех растворах ТМ определяли атомно-абсорбционным методом в пламенном и электротермическом варианте, а также атомно-эмиссионным методом с индуктивно-связанной аргоновой плазмой.

Достоверность результатов проверялась с помощью вариационно-статистической обработки с использованием Windows-приложения Excel.

Дополнительно в массив данных для корреляционных расчётов были включены сведения о содержании ТМ в почвах и растениях

контрольных вариантов опытов ДАОС и Чашниково из работ [2 – 5].

Результаты и их обсуждение

Одним из источников поступления ТМ в агроэкосистемы (и в почвы, и на поверхность растений) являются атмосферные осадки. От интенсивности и состава выпадений в большой мере зависит уровень загрязнения почв и качество сельскохозяйственной продукции агроценозов, особенно находящихся вблизи промышленных городов. Структура потока ТМ на поверхность агроэкосистем приведена в табл. 1.

Суммарное количество ТМ, выпадающих на исследуемые территории в зимнее время года, представлено в табл. 2. По данным [6] в тёплое время года (с апреля по октябрь) на территории Московской области выпадает вдвое больше осадков, чем в холодное время (с ноября по март). На этом основании были рассчитаны ориентировочные потоки тяжёлых металлов и неметаллов за год (табл. 2).

Исследуемые агроэкосистемы значительно различались по атмосферному потоку металлов. Сопоставление полученных данных со сведениями о величинах выпадений в фоновых и сельскохозяйственных районах нашей страны и соседних стран (табл. 3) показало, что уровень выпадений Cd для всех территорий был в пределах фонового для Европейской территории России (ЕТР). Но если для ЛОП, ДАОС и РАОС – на нижней границе фоновых значений, то для Чашниково – близ-

Таблица 1

Структура потока ТМ на исследуемые территории в зимнее время, mg/m^2
(1 – в растворимой форме, 2 – с твёрдыми частицами)

Элемент	ЛОП		РАОС		ДАОС		Чашниково	
	1	2	1	2	1	2	1	2
Cd	0,0089	$\leq 0,001$	0,015	0,0034	$\leq 0,0016$	$\leq 0,01$	0,027	0,136
Cr	0,17	0,21	0,17	0,46	0,12	0,49	0,25	4,20
Ni	0,21	0,1	0,088	0,18	0,078	0,61	0,27	6,02
Pb	0,20	2,29	0,052	0,43	0,031	0,45	0,038	4,08

Таблица 2

Выпадения химических элементов на почвы исследуемых территорий, mg/m^2

Элемент	ЛОП		РАОС		ДАОС		Чашниково	
	За зимний период	За год	За зимний период	За год	За зимний период	За год	За зимний период	За год
Cd	0,0099	0,030	0,018	0,054	$\leq 0,01$	$\leq 0,03$	0,163	0,49
Cr	0,38	1,14	0,63	1,89	0,61	1,83	4,45	13,35
Ni	0,31	0,93	0,27	0,81	0,69	2,07	6,29	18,87
Pb	2,49	7,47	0,48	1,44	0,48	1,44	4,12	12,36

Таблица 3

Потоки тяжёлых металлов на подстилающую поверхность в фоновых и сельскохозяйственных районах разных стран, мг/м² в год [7 – 11]

Элемент	Фоновые районы			Сельскохозяйственные районы			
	ЕТР	Средняя Азия	Ледник Абрамова	Чехия	Польша	Швеция	Австрия
Cd	0,036 – 0,8	0,18 – 0,8	–	0,086	0,25	0,03 – 0,08	0,15 – 0,3
Pb	0,53 – 8,0	1,4 – 10	–	2,88	12,5	–	2 – 3,5
Ni	4,3	4,5	1,09	–	–	–	1,5 – 8,5
Cr	–	–	–	–	–	–	1–2

Таблица 4

Содержание подвижных и кислоторастворимых форм ТМ в исследуемых почвах (1– ААБ с рН 4,8; 2 – 1М р-р HCl), мг/кг

ТМ	РАОС		ДАОС		Чашниково		ЛОП	
	1	2	1	2	1	2	1	2
Cd	0,14	0,10	0,10	0,08	0,31	0,13	0,07	0,01
Ni	1,45	0,35	4,2	1,0	1,6	0,30	0,6	0,2
Cr	0,63	0,10	4,9	0,3	2,8	0,12	2,2	1,2
Pb	2,84	0,60	8,3	0,8	6,6	1,78	10,3	1,3

кий к верхнему, что было выше потока металла на сельскохозяйственные районы Центральной Европы.

Для Ni и Pb уровень выпадений на опытные поля в Чашниково был на уровне или превышал поток металлов для Центральной Европы, на территории ЛОП, РАОС и ДАОС он был в пределах фоновых значений для ЕТР. По выпадениям Cr почти все исследуемые агроэкосистемы были на уровне агроландшафтов Центральной Европы, и только на территории Чашниково аэротехногенный поток был значительно выше. Таким образом, даже в условиях одного региона различия в уровне выпадения ТМ на агроэкосистемы могут достигать порядка и более.

Основным источником поступления ТМ в растения служат почвы. Количество подвижных и кислоторастворимых соединений ТМ в исследуемых почвах приведено в таблице 4.

Растения проявляют различную способность поглощать тяжёлые металлы как из почвы, так и из воздушной среды.

Тип аккумуляции элементов растениями связан в первую очередь с генетическим фактором, обуславливающим состав и соотношение химических элементов в тканях растений, а содержание химического элемента в растении согласно [12] – это, прежде всего, результат действия генетического и экологического факторов.

Для злаковых культур, особенно их репродуктивных органов, характерен так называемый отражательный тип аккумуляции

большинства металлов. Физиологические барьеры растений защищают (до определённого предела) свои репродуктивные органы от избыточного проникновения ТМ (в основном это имеет отношение к корневому поглощению ТМ растениями). Именно поэтому все исследованные зерновые культуры, выращенные без применения удобрений, на дерново-подзолистых почвах разного гранулометрического состава с различным, но находящимся в пределах ПДК (ОДК) содержанием ТМ (как валовым, так и подвижных соединений) и неодинаковой аэротехногенной нагрузкой, имеют относительно низкую (значительно ниже ПДК и временный максимально-допустимый уровень (ВМДУ) концентрацию металлов (рис. 1).

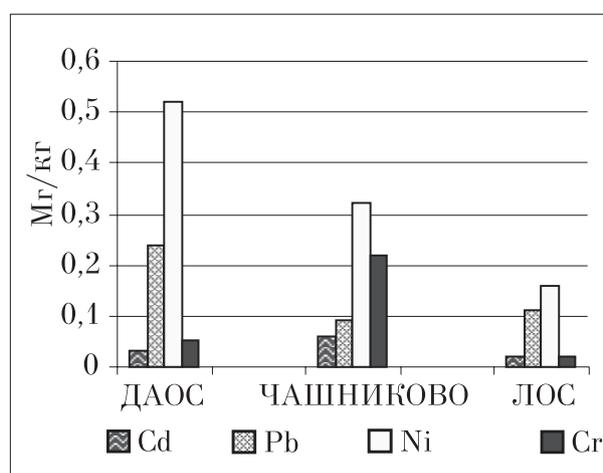


Рис.1. Содержание ТМ в зерне злаков, выращенных на контрольных вариантах опытов (усреднённые данные)

Таблица 5
ПДК и ВМДУ ТМ в сельскохозяйственных растениях, мг/кг сырой массы [15 – 16]

Культура	Cd	Pb	Ni	Cr
Зерно злаков				
ПДК	0,1	0,5	–	–
ВМДУ	0,3	5,0	1,0	0,5
Зеленые корма				
ВМДУ	0,3	5,0	3,0	0,5

ПДК и ВМДУ ТМ в растениях приведены в табл. 5.

Корреляционный анализ показал наличие тесной связи между содержаниями Cd и Cr в зерне злаков и атмосферными выпадениями этих металлов в составе твёрдой фазы ($r = 0,97$ и $0,99$ соответственно при $\alpha = 0,1$), что может свидетельствовать о механическом загрязнении поверхности растений аэротехногенными частицами, обогащёнными Cd и Cr. Для Cd также отмечена тесная статистически значимая связь между концентрацией в зерне и количеством кислоторастворимых соединений металла в почве ($r = 0,98$). Вероятнее всего, эти два показателя взаимосвязаны. Запас потенциально доступных для растений соединений Cd в почве (кислоторастворимые формы) формируется с участием атмосферных поступлений металла. Влияние других исследованных показателей (поток металлов в составе жидкой фазы осадков; содержание подвижных соединений в почве)

было значительно меньше. Тесных статистически значимых зависимостей обнаружено не было. Содержание Pb и Ni в зерне злаков не зависело от уровня атмосферных выпадений металлов и количества их подвижных и кислоторастворимых соединений в почвах.

Содержание ТМ в вегетативных органах многих культур может служить индикатором состояния окружающей среды (и почвы, и атмосферного загрязнения). В данном случае влияние атмосферного загрязнения не сводится к чисто механическому задерживанию твёрдых частиц на поверхности растений. Большое значение, особенно в условиях значительного техногенного воздействия на агроэкосистемы, приобретает поступление тяжёлых металлов в растения через листовую поверхность (фолиарное поглощение). Считается, что фолиарное поглощение состоит из двух фаз – неметаболического проникновения через кутикулу, которое в целом рассматривается как основной путь поступления химических элементов при некорневом поглощении, и метаболических процессов, вызывающих накопление металлов, противоположное действию градиента концентрации [13]. В некоторых случаях поступление металла, например Pb, из атмосферы может быть главным источником, давая до 90% его общего содержания во всех частях зрелого растения [14].

С.Е. Головатым [17] на основании данных опытов с возрастающими дозами ТМ были составлены ряды сельскохозяйственных расте-

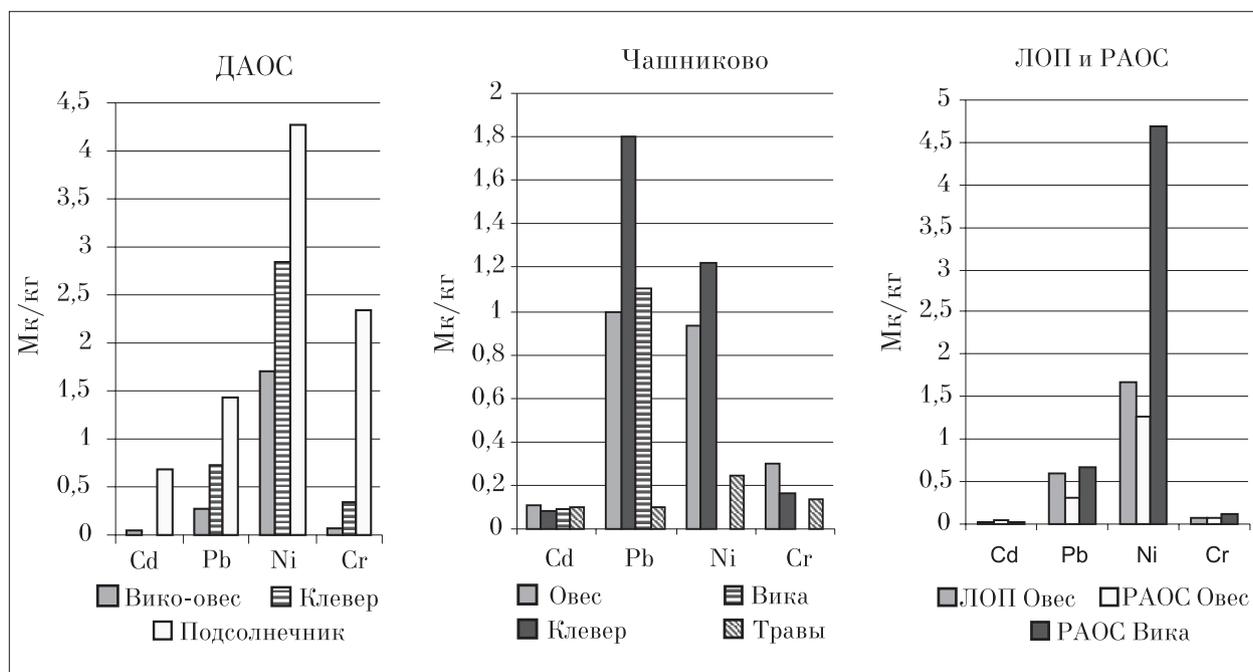


Рис. 2. Содержание ТМ в кормовых культурах, выращенных на почвах контрольных вариантов изучаемых опытов (усредненные данные)

ний, ранжированных по степени накопления металлов, с целью выявления растений-индикаторов. Почти во всех случаях наибольшей интенсивностью накопления металлов отличались кормовые культуры. Для Pb фитоиндикаторами могут служить растения вики и овса, для Cd – овёс и клевер, для Cr – клевер.

Концентрации ТМ в кормовых культурах исследуемых опытов показаны на рисунке 2. Исходя из приведённых данных, а также рядов растений, составленных [17], можно полагать, что для большинства ТМ фитоиндикаторами интегральной оценки экологического состояния исследуемых агроценозов в зависимости от природных факторов и аэротехногенной нагрузки будут являться овёс (викоовсяная смесь) и клевер.

Максимальные концентрации Cd присутствовали в культурах, выращенных на легкосуглинистой почве «Чашниково» – 0,08 – 0,11 мг/кг. Содержание металла в названных растениях из других опытов составляло от 0,009 до 0,06 мг/кг и практически не различалось между собой.

По концентрации Cr распределение культур в зависимости от особенностей участков (почвы и аэротехногенное воздействие) их выращивания было аналогичным. Больше количество металла присутствовало в растениях, выращенных на легкосуглинистых почвах «Чашниково» – от 0,3 (овёс) до 0,16 мг/кг (вика). Содержание Cr в вегетативной массе овса, выращенного на почвах других опытов, было близким и составляло от 0,05 до 0,09 мг/кг.

По уровню накопления Pb различались культуры, выращенные на почвах разных опытных участков. Наибольшей концентрацией металла отличались также культуры из «Чашниково» (в отличие от зерновых). Количество Pb в растениях овса, вики и клевера составляло от 1,0 (овёс) до 1,8 мг/кг (вика). В растениях овса, выращенных на супесчаной почве ЛОП, содержание Pb было меньше – 0,59 мг/кг. Минимальными концентрациями металла характеризовались культуры, произраставшие на тяжелосуглинистой почве ДАОС и легкосуглинистой почве РАОС – от 0,26 (викоовсяная смесь в среднем) до 0,73 мг/кг (клевер) и от 0,32 (овёс) до 0,63 мг/кг (вика) соответственно.

По содержанию Ni культуры, выращенные на почвах исследуемых опытных участков, также значительно различались. Наибольшая концентрация металла обнаружена в растениях из опыта РАОС – от 1,28 (овёс)

до 4,70 мг/кг (вика). В данном случае содержание Ni в вике приближалось к ВМДУ (в пересчёте на сухую массу). В вегетативной массе овса, выращенного на супесчаной почве ЛОП и тяжелосуглинистой почве ДАОС, количество Ni было близким – 1,67 и 1,63 мг/кг, соответственно. Минимальными концентрациями металла характеризовались растения из опыта «Чашниково» – от 0,93 (овес) до 1,22 (вика) мг/кг.

По данным интегральной (фитоиндикаторной) оценки состояния исследуемых агроэкосистем по содержанию ТМ, были получены следующие ряды в убывающем порядке.

«Чашниково» > ДАОС ~ ЛОП ~ РАОС по Cd и Cr;

«Чашниково» > ЛОП > РАОС ~ ДАОС по Pb; РАОС > ЛОП ~ ДАОС > «Чашниково» по Ni.

На рисунке 3 показано содержание ТМ в растениях-индикаторах, почвах, а также уровни суммарного потока и растворимых выпадений металлов с атмосферными осадками для исследуемых опытов.

Концентрация Cd в растениях практически линейно зависела от аэротехногенных выпадений и содержания кислоторастворимых соединений металла в почвах. Коэффициент корреляции между содержанием металла в растениях и его суммарным атмосферным потоком, определяемым в основном твёрдофазной составляющей, достигал 0,996 при $\alpha = 0,01$. Между концентрациями Cd в растениях и потоком в составе жидкой фазы осадков значимая связь отсутствовала. Также не отмечалась достоверная связь и с количеством подвижных соединений металла в почвах, извлекаемых ацетатно-аммонийным буферным раствором с рН 4,8. Коэффициент корреляции (r) между концентрацией Cd в растениях и содержанием его кислоторастворимых соединений в почвах составлял 0,995 при $\alpha = 0,01$.

Что касается Pb, то его содержание в растениях практически линейно зависело от уровня суммарной аэротехногенной нагрузки ($r=0,99$, $\alpha = 0,01$), а также от количества металла, извлекаемого ацетатно-аммонийным буферным раствором из почвы ($r=0,96$, $\alpha = 0,01$), причём с концентрацией его в растениях в суммарной аэротехногенной нагрузке коррелировала её твёрдофазная составляющая. Между потоком Pb в жидкой фазе и его содержаниями в растениях связь отсутствовала.

Содержание Cr и Ni в растениях не зависело от количества металлов в почвах, извлекаемых как ацетатно-аммонийным буферным раствором, так и 1М раствором HCl (для Cr

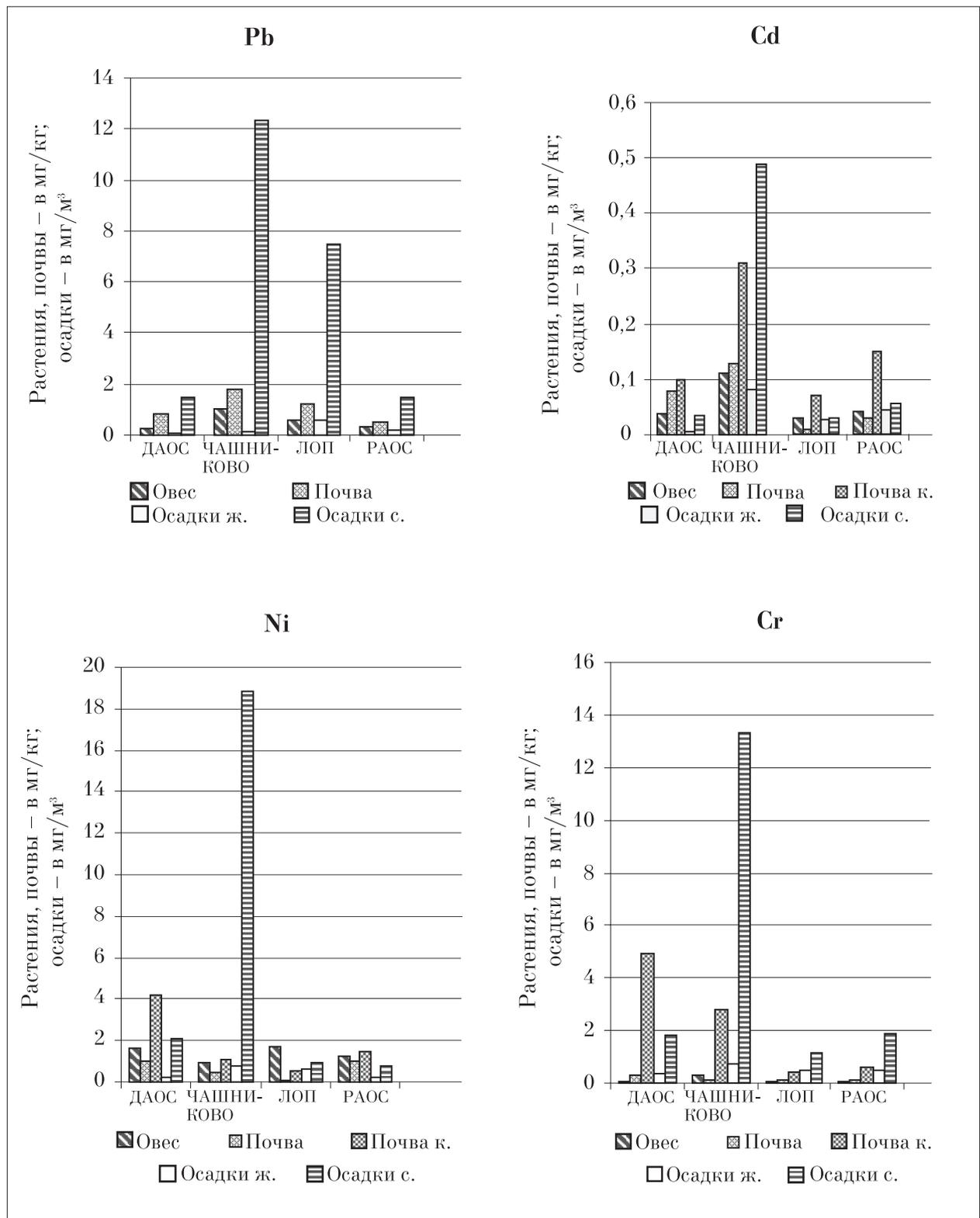


Рис. 3. Содержание ТМ в растениях, почвах (почва – в ацетатно-аммонийной вытяжке; почва – в вытяжке 1М р-ра HCl), а также поток металлов на поверхность агроэкосистемы

и Ni). Для Cr связь с суммарными атмосферными осадками очень тесная и значимая ($r = 0,99$ при $\alpha = 0,01$).

Очевидно, данные вытяжки из почв не могут адекватно оценивать уровень доступности металлов для растений овса и (или) овёс не является фитоиндикатором для Ni. Это подтверждается отсутствием связи между концентрациями Ni в растениях и атмосферных выпадениях (как суммарных, так и в составе жидкой или твёрдой фазы), а также со свойствами почв.

Заключение

В условиях сельскохозяйственного производства вблизи мегаполиса влияние аэротехногенной нагрузки в большей степени проявлялось для растений или их органов с индикаторным типом накопления (овёс, викоовсяная смесь, клевер). Концентрация Cd, Cr и Pb в них зависела от суммарного уровня атмосферных выпадений (твёрдофазной их части). Накопление такими культурами Cd и Pb зависело и от количества подвижных (Pb) и кислоторастворимых (Cd) соединений в почвах.

Для зерна злаков (отражательный тип накопления) уровень атмосферных выпадений оказывал влияние на концентрацию Cd и Cr, но она была значительно ниже, чем в растениях (органах)-индикаторах. И в этом случае отмечалась зависимость между содержанием Cd в зерне и количеством его кислоторастворимых соединений в почве. Все зерновые культуры, выращенные без применения удобрений на дерново-подзолистых почвах разного гранулометрического состава с различным исходным содержанием ТМ (как валовых, так и подвижных) и неодинаковой аэротехногенной нагрузкой, имеют относительно низкую (значительно ниже ПДК и ВМДУ) концентрацию ТМ.

Литература

1. Методические рекомендации по оценке степени загрязнения атмосферного воздуха населённых пунктов металлами по их содержанию в снеговом покрове и почве. М.: Минздрав СССР, 1990. № 5174-90. 21 с.
2. Гомонова Н.Ф. Влияние длительного применения агрохимических средств на дерново-подзолистых почвах на трансформацию тяжёлых металлов в системе почва-растение // Мат-лы науч.-практ. конф. «Тяжёлые металлы и радионуклиды в агроэкосистемах». М., 1994. С. 180-186.

3. Минеев В.Г., Гомонова Н.Ф. Оценка экологических функций агрохимии по поведению Cd в агроценозе на дерново-подзолистой почве // Вестник Московского университета. Сер. Почвоведение. 1999. № 1. С. 46-50.
4. Носовская И.И. Влияние длительного применения удобрений на содержание и хозяйственный баланс микроэлементов и тяжёлых металлов в системе почва – удобрения – растения. Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. М., 2001. 24 с.
5. Петелин А.А. Влияние агрохимических средств на состояние свинца, кадмия и стронция в системе почва – растение. Автореф. дисс. ... канд. М., МГУ. 2000. 24 с.
6. Справочник эколого-климатических характеристик г. Москвы. Т. 1. М.: Издательство Московского университета. 2003. 300 с.
7. Обзор фонового состояния окружающей природной среды в СССР за 1989 г. М.: Гидрометеоиздат. 1990. 96 с.
8. Обзор фонового состояния окружающей природной среды на территории стран СНГ за 1994 г. М.: ИГКЭ, 1995. 47 с.
9. Ivarsson K., Bjurling E., Johansson M., Sjosvard L. Swedish Seal of Quality and cadmium assured crop production // Cadmium from Plough to Plate. Report FOOD 21. № 5, 2002. P. 26-27.
10. Martinek J., Zigoва A., Skrivan P. Factors affecting the trace elements distribution in a soil developed on granite bedrock in central Bohemia (Czech republic) // Scientia agriculturae Bohemica. 1999. V. 30 (1). P. 55-71.
11. Kabata-Pendias A., Tarlowski P., Dudka S. Atmospheric following of trace elements on surface soils // Roczniki gleboznawcze T.XXXVI. 1985. № 1. P. 137-140.
12. Ильин В.Б. Элементный химический состав растений. Факторы, его определяющие. // Изв. СО АН СССР. 1977. № 10. Сер. биол. Вып. 2. С. 3-14.
13. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.
14. Kabata-Pendias A. Фитоиндикация как инструмент для изучения окружающей среды // Сибирский экологический журнал. 2001. № 2. Т. VIII. С. 125-130.
15. Временный максимально-допустимый уровень (МДУ) содержания некоторых химических элементов и госсипола в кормах для сельскохозяйственных животных и кормовых добавках. М.: Государственный агропромышленный комитет СССР. № 123-41281-87. 1987. 5 с.
16. СанПиН 2.3.2.500-96. Гигиенические нормативы качества и безопасности продовольственного сырья и пищевых продуктов.
17. Головатый С.Е. Тяжёлые металлы в агроэкосистемах. Минск, 2002. 239 с.