

УДК 504.064.2

АККУМУЛЯЦИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ ДРЕВЕСНЫМИ ПОРОДАМИ И СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫМИ КУЛЬТУРАМИ В УСЛОВИЯХ ПРИМАГИСТРАЛЬНОЙ ЭКОСИСТЕМЫ

Олива Т.В., Колесниченко Е.Ю., Панин С.И., Манохина Л.А.

ФГБОУ ВО «Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина»,
Белгородская область, пос. Майский, e-mail: olivatv@mail.ru

В статье описаны результаты исследования по аккумуляции тяжелых металлов свинца и кадмия в почве, в листьях древесных пород и зеленой массе сельскохозяйственных культур примагистральной экосистемы. Результаты исследования показали, что в зависимости от удаленности от автомобильной дороги свинец и кадмий по-разному распределяются в почвах экосистемы. Максимальные значения тяжелых металлов установлены для почв примагистральной лесополосы. «Зеленый щит» выполняет свое назначение, почвы лесополосы и листья деревьев максимально аккумулируют свинец и кадмий, изымая их из миграции в агроценозе. Минимальная концентрация валового свинца обнаружена в почвенных образцах в 20 м, а кадмия – в 200 м от полевосащитной лесополосы. Установлен ряд снижения способности листьев деревьев накапливать свинец: *Robinia pseudoacacia* L. < *Ulmus parvifolia* Jacq. < *Fraxinus lanceolata* Borkh. < *Acer negundo* L. Уровень свинца в листьях *Acer negundo* L. выше в 2,8 и в 1,3 раза, чем в листьях *Robinia pseudoacacia* L. и *Ulmus parvifolia* Jacq. соответственно. В листьях всех древесных пород примагистральной полосы содержание свинца выше ПДК (по Прохоровой) в 2,5–6,9 раза, содержание кадмия – значительно ниже ПДК. Среднее содержание свинца в зеленой массе сельскохозяйственных культур формирует возрастающий ряд: пшеница < ячмень < горох < люцерна. Коэффициент биологического поглощения свинца увеличивается по мере увеличения расстояния от примагистральной лесозащитной полосы. Среднее содержание кадмия в зеленой массе сельскохозяйственных культур формирует возрастающий ряд: на расстоянии 20–100 м от лесополосы: горох > пшеница > ячмень > люцерна; на расстоянии 200 м от лесополосы: горох > пшеница > люцерна > ячмень. Коэффициент биологического поглощения кадмия для изучаемых сельскохозяйственных культур выше по сравнению с аналогичным коэффициентом для свинца. Коэффициент биологического накопления кадмия зеленой массой люцерны – самый высокий и при увеличении расстояния от примагистральной лесозащитной полосы становится максимальным.

Ключевые слова: примагистральная экосистема, свинец, кадмий, древесные породы растений, сельскохозяйственные культуры, коэффициент поглощения

HEAVY METALS ACCUMULATION BY WOOD SPECIES AND AGRICULTURAL PLANT IN CONDITIONS OF ROADSIDE ECOSYSTEM

Oliva T.V., Kolesnichenko E.Yu., Panin S.I., Manokhina L.A.

The Belgorod state agrarian university named after V. Gorin, Belgorod region,
Mayskiy, e-mail olivatv@mail.ru

The article describes the results of a study on the heavy metals accumulation of lead and cadmium in soil, in tree leaves and in the green mass of agricultural plant of a roadside ecosystem. The results of the study demonstrated lead and cadmium measured off differently in the ecosystem depending on the distance from the road. The maximum values of heavy metals are set for soils of the roadside wood line. The «Green Shield» serves its purpose, the soils of wood line and tree leaves accumulate lead and cadmium as much as possible, removing them from migration in agroecosystem. A minimum concentration of total lead was found in soil samples of 20 m, and cadmium 200 m from the field-protective wood line. The number of impairment in ability the tree leaves accumulate to accumulate lead have been established: *Robinia pseudoacacia* L. < *Ulmus parvifolia* Jacq. < *Fraxinus lanceolata* Borkh. < *Acer negundo* L. Lead level in leaves *Acer negundo* L. are in 2,8 and 1,3 times higher than in *Robinia pseudoacacia* L. and *Ulmus parvifolia* Jacq. leaves respectively. In the leaves of all wood species of the roadside the lead content is 2,5–6,9 times higher than the maximum concentration limit (according to Prokhorova), the cadmium content is significantly lower than the maximum concentration limit. The average content of lead in the green mass of agricultural plant forms an increasing series: wheat < barley < pea < lucern. The coefficient of biological absorption of lead increases as the distance from roadside wood line increases. The average cadmium content in the green mass of agricultural plant forms an increasing number: at a distance of 20–100 m from the wood line: peas > wheat > barley > lucern; 200 m from the wood line: peas > wheat > lucern > barley. The coefficient of biological absorption of cadmium for the studied agricultural plant is higher than the same coefficient for lead. The coefficient of biological accumulation of cadmium by the green mass of lucern is the highest and as the distance from the roadside wood line increases, it becomes maximum.

Keywords: roadside ecosystem, lead, cadmium, wood species, agricultural plant, the coefficient of accumulation

Для формирования устойчивого состояния примагистральных экосистем, подвергающихся постоянному антропогенному воздействию, необходимо тщательно подбирать древесные породы, способные поглощать экотоксиканты из окружающей

среды, а также превращать их в клеточные метаболиты [1–3]. Следует отметить, что высшие растения существенно различаются между собой способностью ассимилировать токсиканты, в том числе тяжелые металлы (ТМ) [4, 5]. Известно, что их аккумулирую-

щие способности зависят от роста, развития, биологического потенциала дерева, а также от природно-климатических условий территории и функционального назначения лесозащитной полосы [6–8]. Рассчитано, что от эксплуатации автомобильного транспорта доля загрязняющих веществ составляет более 55% от общей массы газообразных загрязнителей воздуха. Основную опасность из тяжелых металлов для растений составляют свинец и кадмий, так как они имеют особенность концентрироваться в приземном слое атмосферы и неблагоприятно воздействовать на древесные породы и сельскохозяйственные культуры [9, 10]. Тяжелые металлы начинают воздействовать на организм растения при самом первом контакте и сорбции надземными вегетативными органами, прежде всего листьями. Вследствие этого крона деревьев с большой ассимилирующей поверхностью является барьером для распространения многих ксенобиотиков, но и они сами в разной степени повреждаются этими токсикантами [11–13]. Поэтому для создания зеленой лесозащитной зоны необходимо оптимально подбирать древесные культуры, имеющие высокие накопительные способности и интенсивный темп роста и в то же время наивысшую устойчивость к воздействию этих веществ. В Белгородской области разработана и внедряется стратегия развития «Зеленая столица», которая предусматривает озеленение и ландшафтное обустройство территорий области, формирование лесополос на территориях объектов дорожной и придорожной инфраструктуры.

Целью нашей работы было изучение аккумуляции тяжелых металлов свинца и кадмия разными древесными породами и сельскохозяйственными культурами в условиях примагистральной экосистемы. Задачами исследований были: изучение особенностей накопления свинца и кадмия в почве и листьях деревьев придорожной лесозащитной лесополосы; изучение особенностей накопления свинца и кадмия растениями агроценоза, скрининг древесных культур, максимально аккумулирующихся в листьях ТМ; а также расчет коэффициента биологического поглощения свинца и кадмия древесными и сельскохозяйственными растениями придорожной лесозащитной лесополосы.

Материалы и методы исследования

Все исследования проведены в 2018–2019 гг. в условиях стационара Лаборатории по изучению систем земледелия им. Н.Р. Асыки ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, который тер-

риториально расположен вдоль федеральной трассы М2 «Крым»: Москва – Симферополь.

Объектами исследований являлись старовозрастные древесные породы растений лесополосы и ряд сельскохозяйственных культур, произрастающих согласно зернобобовому севообороту стационара. Древесные растения, наиболее широко представленные в лесозащитной полосе: ясень ланцетный (*Fraxinus lanceolata* Borkh.), вяз мелколистный (*Ulmus parvifolia* Jacq.), клен американский (*Acer negundo* L.), акация белая (*Robinia pseudoacacia* L.). Сельскохозяйственные культуры: озимая пшеница (*Triticum aestivum* L.), ячмень (*Hordeum vulgare* L.), горох (*Pisum sativum* L.), люцерна (*Medicago sativa* L.). Для изучения аккумуляции тяжелых металлов древесными породами и сельскохозяйственными культурами в условиях примагистральной экосистемы были отобраны 68 растительных и 72 почвенных образца.

Почва изучаемого участка стационара – это чернозем типичный. Количество общего гумуса в почвенных образцах равно 5,2–5,6%. Сумма поглощенных оснований и гидролитическая кислотность составляют около 40 мг-экв. и 2,2 мг-экв. соответственно. Степень насыщенности основаниями – около 98%. Следовательно, почвы стационара продуктивны и предполагают в соответствии с принятыми севооборотами высокие урожаи сельскохозяйственных культур. Сбор почвенного и растительного материала проводился в июле и августе – в период максимального развития и физиологической активности фотосинтетического аппарата древесных растений. Пробоотбор средних образцов почвы, зеленой массы сельскохозяйственных культур и листьев древесных пород осуществляли в одно и то же время, в одних и тех же точках отбора согласно рекомендациям нормативных документов и ГОСТ 17.4.4.02. Отбор листьев проводили с нижней части кроны деревьев приблизительно одного средневозрастного генеративного состояния. Отбор образцов зеленой массы сельскохозяйственных культур соответствовал системе севооборота в агроценозе Лаборатории по изучению систем земледелия. Отбор почвы и зеленой массы сельскохозяйственных культур проводили на расстоянии от примагистральной защитной лесополосы 20, 100 и 200 м. Все химические испытания проводили при нашем участии в Аккредитованной испытательной лаборатории ФГБОУ ВО «Белгородский государственный аграрный университет им. В.Я. Горина».

Таблица 1

Динамика среднего валового содержания свинца в почве лесополосы и агроценоза, мг/кг (натуральной влажности)

№ п/п	Место отбора почвенного образца	Валовая концентрация Pb	ОДК	РГФ
1	Лесополоса (защитная зона)	42,20 ± 0,44	1,3 ОДК	2,5РГФ
2	20 м от лесополосы (буферная зона)	18,84 ± 0,16	0,6 ОДК	1,1РГФ
3	100 м от лесополосы	21,46 ± 0,22	0,7 ОДК	1,3 РГФ
4	200 м от лесополосы	23,30 ± 0,15	0,7 ОДК	1,4 РГФ

валовое содержание свинца, мг/кг

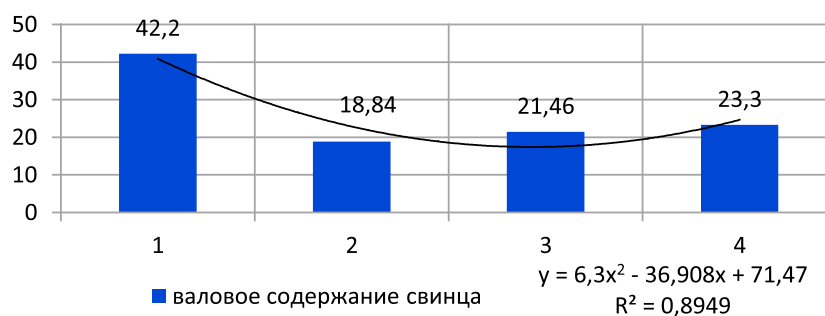


Рис. 1. Распределение свинца в почвах примагистральной экосистемы: 1 – почва полезащитной лесополосы; 2 – почва в 20 м от полезащитной лесополосы (буферная зона); 3 – почва агроценоза в 100 м от полезащитной лесополосы; 4 – почва агроценоза в 200 м от полезащитной лесополосы

Массовую долю тяжелых металлов в растительных образцах определяли методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии (ГОСТ 30178-96). Содержание подвижных форм почвенных микроэлементов определяли по методическим указаниям ЦИНАО. Металлы из образцов почвы извлекали ацетатно-аммонийным буферным раствором (рН 4,8). Отношение почвы к буферному раствору 1:10. Время экстракции 1 ч при взбалтывании на ротаторе. Были рассчитаны коэффициенты биологического поглощения свинца и кадмия растительными объектами. Составление диаграмм по результатам исследований осуществляли с использованием компьютерной программы Excel в среде операционной системы Microsoft Windows.

Результаты исследования и их обсуждение

Динамика среднего валового содержания свинца в изучаемых образцах почвы из-под деревьев защитной лесополосы и пахотной почве агроценоза представлена в табл. 1 и на диаграммах.

ОДК (ориентировочно допустимая концентрация) свинца в пахотных почвах

составляет 32 мг/кг, РГФ (региональный геохимический фон) для свинца находится в пределах 14,6–16,8 мг/кг. При анализе данных табл. 1 и диаграммы (рис. 1) видно, что уровень валового содержания свинца в почве примагистральной защитной лесополосы превышает в 1,3 раза значения ОДК и в 2,5 раза значения РГФ.

Установлено, что в почве на расстоянии от 20 до 200 м от примагистральной лесополосы валовое содержание свинца не превышает ОДК и находится в пределах 0,6–0,7 ОДК. Но при сравнении уровня тяжелого металла в пахотных почвах агроценоза со значениями регионального геохимического фона обнаружены факты загрязнения почв токсичным свинцом от 1,1 до 2,5 значений РГФ. Зону в 20 м от полезащитной лесополосы можно отнести к так называемой буферной зоне. Зависимость представлена полиномиальной линией тренда: уменьшение уровня содержания металла на расстоянии 20 м от лесополосы и затем увеличение на расстоянии 100, максимальное содержание – 200 м от примагистральной лесополосы. Величина достоверности аппроксимации $R = 0,9$, т.е. стремится к единице, что свидетельствует о достоверности

происходящих изменений. Валовое содержание тяжелых металлов является потенциальным резервом подвижных форм токсичных элементов, так как они могут активно участвовать в биогеохимическом цикле веществ при некоторых условиях и свойствах окружающей среды. Валовое содержание указывает на общую загрязненность почвы металлами, но в целом не отражает их доступности для организма растений, а уровни содержания подвижных металлов отражают путь миграции и доступности для организма растений. Динамика среднего содержания подвижных форм металла свинца в изучаемых образцах почвы из-под деревьев защитной лесополосы и пахотной почвы агроecosистемы представлена в табл. 2.

Содержание подвижной формы свинца в почвах варьировало от 5,56 до 12,8 мг/кг. Концентрация подвижного свинца в почвах примагистральной лесополосы превышала значения ОДК, а на расстоянии 20 и 100 м стремилась к ориентировочно допустимому уровню. На расстоянии 200 м от защитной зеленой полосы содержание подвижной формы свинца не превышало ОДК. Процентное содержание подвижного свинца от валового количества составляло: для лесополосы – 29,7%; для зоны 20 м от лесополосы (буферной) – 32,1%; для зоны 100 м от лесополосы – 28,3% и для зоны 200 м от лесополосы – 24,4%. Более низкое содержание подвижной формы свинца в пахотных плодородных почвах на расстоянии 200 м от примагистральной лесополосы возмож-

но объяснить более напряженным путем миграции химического элемента в организм растения, а это представляет определенные риски получения экологически безопасной растениеводческой продукции.

Динамика среднего валового содержания кадмия в изучаемых образцах почвы из-под деревьев защитной лесополосы и пахотной почвы агроecosистемы представлена в табл. 3.

Валовое содержание кадмия в пахотных почвах Белгородской области в среднем составляет 0,62–0,69 мг/кг. ОДК кадмия в пахотных почвах составляет 2 мг/кг, РГФ для кадмия находится в пределах 0,69 мг/кг. Валовое содержание кадмия в почвах изучаемой экосистемы варьировало от 0,78 мг/кг до 1,05 мг/кг. При анализе данных таблицы 3 видно, что уровень валового кадмия в почве примагистральной защитной лесополосы не превышает значения ОДК. Однако сравнение уровня тяжелого металла в пахотных почвах агроценоза со значением регионального геохимического фона обнаруживает напряженную ситуацию и аккумуляцию этого химического элемента: повышение уровня кадмия от 1,1 до 1,4 значений РГФ. Зависимость представлена линией тренда: линейная и величина достоверности аппроксимации $R = 0,7$ (рис. 2). Следовательно, обнаруженная тенденция постепенного уменьшения значений валового содержания кадмия от лесополосы в направлении пахотных земель агроценоза недостоверна.

Таблица 2

Динамика среднего содержания подвижных форм свинца в почве лесополосы и агроценоза, ацетатно-аммонийный буферный раствор, рН 4,8, мг/кг (натуральной влажности)

№ п/п	Место отбора почвенного образца	Подвижная форма свинца	ОДК (6,0)
1	Лесополоса (защитная зона)	12,55 ± 0,25	2,1 ОДК
2	20 м от лесополосы (буферная зона)	6,04 ± 0,14	1,0 ОДК
3	100 м от лесополосы	6,08 ± 0,20	1,0 ОДК
4	200 м от лесополосы	5,68 ± 0,12	0,95 ОДК

Таблица 3

Динамика среднего валового содержания кадмия в почве лесополосы и агроценоза, мг/кг (натуральной влажности)

№ п/п	Место отбора почвенного образца	Валовая концентрация кадмия	ОДК	РГФ
1	Лесополоса (защитная зона)	0,99 ± 0,06	0,5 ОДК	1,4 РГФ
2	20 м от лесополосы (буферная зона)	0,84 ± 0,03	0,4 ОДК	1,2 РГФ
3	100 м от лесополосы	0,90 ± 0,04	0,5 ОДК	1,3 РГФ
4	200 м от лесополосы	0,75 ± 0,03	0,4 ОДК	1,1 РГФ

валовое содержание кадмия, мг/кг

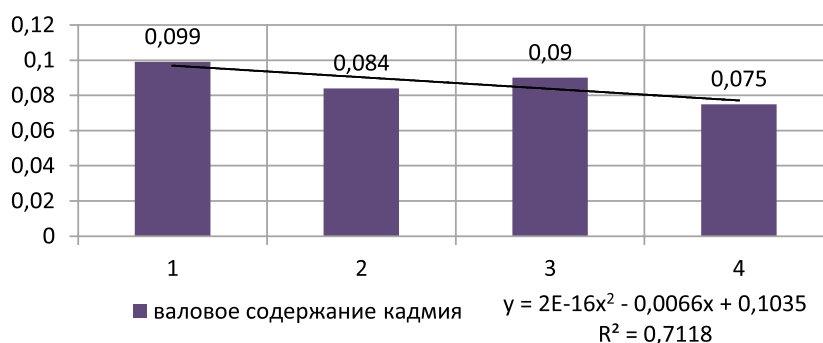


Рис. 2. Распределение кадмия в почвах примагистральной экосистемы: 1 – почва полезащитной лесополосы; 2 – почва в 20 м от полезащитной лесополосы (буферная зона); 3 – почва агроценоза в 100 м от полезащитной лесополосы; 4 – почва агроценоза в 200 м от полезащитной лесополосы

Таблица 4

Динамика среднего содержания подвижных форм кадмия в почве лесополосы и агроценоза, ацетатно-аммонийный буферный раствор, рН 4,8, мг/кг (натуральной влажности)

№ п/п	Место отбора почвенного образца	Подвижная форма Cd	ОДК
1	Лесополоса (защитная зона)	0,48 ± 0,06	2,4 ОДК
2	20 м от лесополосы (буферная зона)	0,20 ± 0,04	1,0 ОДК
3	100 м от лесополосы	0,20 ± 0,02	1,0 ОДК
4	200 м от лесополосы	0,15 ± 0,05	0,75 ОДК

Динамика содержания подвижных форм кадмия в изучаемых образцах почвы из-под деревьев защитной лесополосы и пахотной почве агроэcosystemы представлена в табл. 4.

Содержание подвижной формы кадмия в почвах варьировало от 0,10 мг/кг до 0,54 мг/кг. Концентрация подвижного кадмия в почвах примагистральной лесополосы превышала значения ОДК, а на расстоянии 20 м и 100 м стремилась к ориентировочно допустимому уровню. Обнаружено, что на расстоянии 200 м от защитной зеленой полосы содержание подвижной формы кадмия не превышало ОДК. Процентное содержание подвижного кадмия от валового количества составляло: для лесополосы – 48,5%; для зоны 20 м от лесополосы (буферной) – 23,8%; для зоны 100 м от лесополосы – 22,2% и для зоны 200 м от лесополосы – 20,9%. Более высокие значения подвижной формы кадмия в почвах примагистральной лесополосы, по всей видимости, объясняются существенным поступлением этого химического элемента и, возможно, изменением свойств данной почвенной экосистемы.

Итак, анализ динамики распределения ТМ в почвах экосистемы показывает, что минимальная концентрация валового свин-

ца обнаружена в почвенных образцах в 20 м от полезащитной лесополосы, а кадмия – в 200 м от полезащитной лесополосы. Максимальные значения ТМ установлены для почв примагистральной лесополосы. Следовательно, «зеленый щит» выполняет свое назначение и почвы лесополосы максимально аккумулируют свинец и кадмий, изымая таким путем их из миграции в агроценозе.

В табл. 5 показаны результаты динамики среднего содержания свинца и кадмия в листьях деревьев примагистральной лесополосы.

По литературным научным источникам, среднее фоновое содержание свинца и кадмия в надземной части древесных пород изменяется в широких пределах. Нами обнаружено, что в листьях клена американского и ясеня ланцетного свинец аккумулируется максимально по сравнению с другими изучаемыми породами древесных растений. Установлен ряд последовательности снижения способности листьев деревьев накапливать свинец: акация белая < вяз мелколистный < ясень ланцетный < клен американский. Уровень свинца в листьях клена американского был выше в 2,8 и в 1,3 раза, чем в листьях акации белой и вяза мелколистного соответственно.

При сравнении значений содержания данного токсичного металла в листьях с предельно допустимыми значениями, рассчитанными по Прохоровой, обнаружено, что для всех древесных пород прилегающей зеленой полосы имеет место превышение значения свинца в 2,5–6,9 раза. В отношении кадмия известны факты максимального поглощения металла корнями организма растения из окружающей среды, но меньшим образом – другими вегетативными органами, листьями в том числе. Это объясняют особенным механизмом организма растений, связанным с препятствием транспорта токсиканта из корневой системы в надземные органы и в генеративные органы. Механизм объясняют наличием особых белковых комплексов в тканях корней, которые связывают металл до определенного уровня, но после которого может начинаться некроз тканей корня. Поэтому предположительно, что в разных условиях произрастания концентрация кадмия в листьях будет примерно одинаковой при разных условиях вегетации растений. Данные табл. 5 демонстрируют, что содержание кадмия в листьях разных древесных пород достоверно не отличается, это значение значительно ниже ПДК. Отметим незначительно больший уровень кадмия в листьях клена американского и ясеня ланцетного. Средние значения коэффициентов биологического поглощения (КБП) свинца и кадмия листьями деревьев прилегающей лесополосы представлены в табл. 6.

Из данных табл. 6 видно, что самое высокое значение КБП свинца характерно для клена американского и ясеня ланцетного, а самое низкое значение – для акации белой. Самое высокое значение КБП кадмия характерно для клена американского и ясеня ланцетного, а для акации белой и вяза мелколистного коэффициенты были одинаковыми и ниже коэффициента для клена американского в 1,3 раза. Отметим, что КБП кадмия листьями древесных пород были существенно выше (в 1,8–3,8 раза) по сравнению с КБП свинца.

В табл. 7 показаны результаты динамики среднего содержания ТМ в натуральной зеленой массе сельскохозяйственных культур агроценоза, граничащего с прилегающей защитной лесополосой.

Анализ табличных данных свидетельствует, что сельскохозяйственная культура пшеница озимая по сравнению с другими изучаемыми культурами содержит наименьший уровень токсичного свинца в зеленой массе. Из литературных данных известно, что корень злаковых имеет особый барьерный механизм накопления и передачи по проводящей системе токсичных металлов в ткани. Наоборот, минимальные малые дозы свинца стимулируют белковый метаболизм, но высокие дозы свинца в почвенном растворе вызывают некроз тканей корней злаковых культур. На диаграммах (рис. 3) показана динамика накопления свинца в сельскохозяйственных культурах в зависимости от расстояния лесополосы.

Таблица 5

Динамика содержания свинца и кадмия в листьях деревьев прилегающей лесополосы (натуральной влажности)

№ п/п	Древесная порода прилегающей лесополосы	Концентрация свинца, мг/кг	Концентрация свинца, ПДК	Концентрация кадмия, мг/кг	Концентрация кадмия, ПДК
1	Акация белая (<i>Robinia pseudoacacia L.</i>)	1,24 ± 0,15	2,5 ПДК	0,18 ± 0,03	0,6 ПДК
2	Вяз мелколистный (<i>Ulmus parvifolia Jacq.</i>)	2,64 ± 0,24	5,3 ПДК	0,18 ± 0,06	0,6 ПДК
3	Клен американский (<i>Acer negundo L.</i>)	3,44 ± 0,36	6,9 ПДК	0,24 ± 0,04	0,8 ПДК
4	Ясень ланцетный (<i>Fraxinus lanceolata Borkh.</i>)	3,12 ± 0,12	6,3 ПДК	0,22 ± 0,02	0,7 ПДК

Таблица 6

Средние значения коэффициентов биологического поглощения свинца и кадмия листьями деревьев прилегающей лесополосы

№ п/п	Древесная порода прилегающей лесополосы	КБП свинца	КБП кадмия
1	Акация белая (<i>Robinia pseudoacacia L.</i>)	0,10 ± 0,01	0,38 ± 0,02
2	Вяз мелколистный (<i>Ulmus parvifolia Jacq.</i>)	0,21 ± 0,01	0,38 ± 0,04
3	Клен американский (<i>Acer negundo L.</i>)	0,28 ± 0,02	0,50 ± 0,02
4	Ясень ланцетный (<i>Fraxinus lanceolata Borkh.</i>)	0,25 ± 0,01	0,46 ± 0,01

Таблица 7

Динамика содержания свинца в зеленой массе сельскохозяйственных культур
в условиях примагистральной экосистемы, мг/кг

№ п/п	Сельскохозяйственная культура	Расстояние от полевосащитной лесополосы, м					
		20 м		100 м		200 м	
		Свинец	Кадмий	Свинец	Кадмий	Свинец	Кадмий
1	Пшеница озимая	1,88 ± 0,04	0,12 ± 0,02	2,45 ± 0,09	0,14 ± 0,02	2,88 ± 0,05	0,12 ± 0,01
2.	Ячмень	2,46 ± 0,12	0,15 ± 0,01	2,86 ± 0,10	0,20 ± 0,03	3,42 ± 0,12	0,28 ± 0,02
3	Горох	3,44 ± 0,04	0,09 ± 0,02	3,94 ± 0,12	0,10 ± 0,02	3,98 ± 0,08	0,09 ± 0,01
4	Люцерна	3,98 ± 0,10	0,22 ± 0,02	4,12 ± 0,15	0,30 ± 0,04	4,08 ± 0,05	0,26 ± 0,04

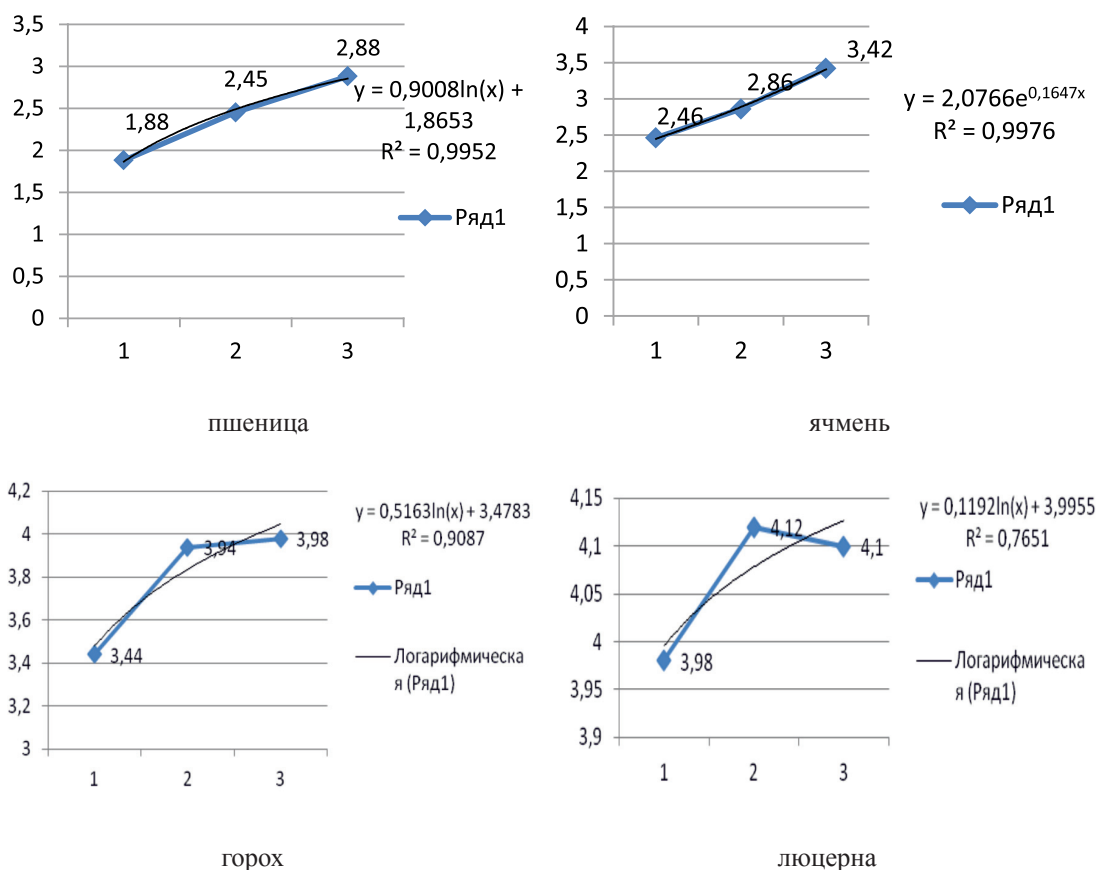


Рис. 3. Динамика накопления свинца в зеленой массе пшеницы, ячменя, гороха и люцерны в зависимости от расстояния: 1 – 20, 2 – 100 и 3 – 200 м до примагистральной лесополосы, мг/кг

Согласно диаграмме, пшеница аккумулирует свинец из окружающей среды, а динамика накопления свинца в зеленой массе растения имеет достоверный накопительный характер. Линия тренда логарифмическая. Величина достоверности аппроксимации $R = 0,995$, т.е. стремится к единице, что свидетельствует о достоверности происходящих изменений. Ячмень, как и пшеница, обладает накопительной способностью в отношении свинца. Линия тренда экспоненциальная. Величина

достоверности аппроксимации $R = 0,998$. Подобная зависимость обнаружена и для гороха. Линия тренда логарифмическая. Величина достоверности аппроксимации составляет $R = 0,909$. Максимальное содержание свинца обнаружено в зеленой массе кормовой культуры люцерны. Среднее содержание свинца в зеленой массе люцерны находилось в пределах 3,88–4,27 мг/кг. Наивысшее количество свинца обнаружено в зеленой массе люцерны на расстоянии 100 м от трассы. Отмечена тенденция даль-

нейшего снижения уровня свинца в зеленой массе люцерны с увеличением расстояния до 200 м от трассы. Это также соответствует уменьшению содержания в пахотных почвах подвижной формы данного металла. Итак, среднее содержание свинца в зеленой массе сельскохозяйственных культур формирует следующий возрастающий ряд: пшеница < ячмень < горох < люцерна.

На диаграммах (рис. 4) показаны результаты динамики среднего содержания кадмия в натуральной зеленой массе сельскохозяйственных культур агроценоза.

Пшеница аккумулирует кадмий из окружающей среды, динамика содержания кадмия в зеленой массе растения имеет накопительный характер. Максимальное количество кадмия обнаружено в зеленой массе пшеницы на расстоянии 100 м от трассы. Подобная зависимость обнаружена и для таких сельскохозяйственных культур, как горох и люцерна. Сельскохозяйственная культура горох по сравнению с другими изучаемыми культурами менее всего аккумулирует в зеленой массе токсичный кадмий.

Динамика накопления кадмия в зеленой массе ячменя в зависимости от расстояния до примагистральной лесополосы носит иной характер. Линия тренда экспоненциальная, сравнима с тенденцией аккумуляции в зеленой массе ячменя токсичного свинца. Величина достоверности аппроксимации составляет $R = 0,998$. Следовательно, сельскохозяйственная культура ячмень обладает достоверной накопительной способностью в отношении кадмия. Итак, уровень содержания кадмия в зеленой массе сельскохозяйственных культур формирует следующий возрастающий ряд: в условиях буферной зоны на расстоянии 20 м и на расстоянии 100 м от лесополосы: горох > пшеница > ячмень > люцерна; в условиях на расстоянии 200 м от лесополосы: горох > пшеница > люцерна ≥ ячмень.

В табл. 8 приводятся результаты расчета коэффициента биологического поглощения (КБП) свинца и кадмия сельскохозяйственными культурами в зависимости от расстояния произрастания до примагистральной лесополосы.

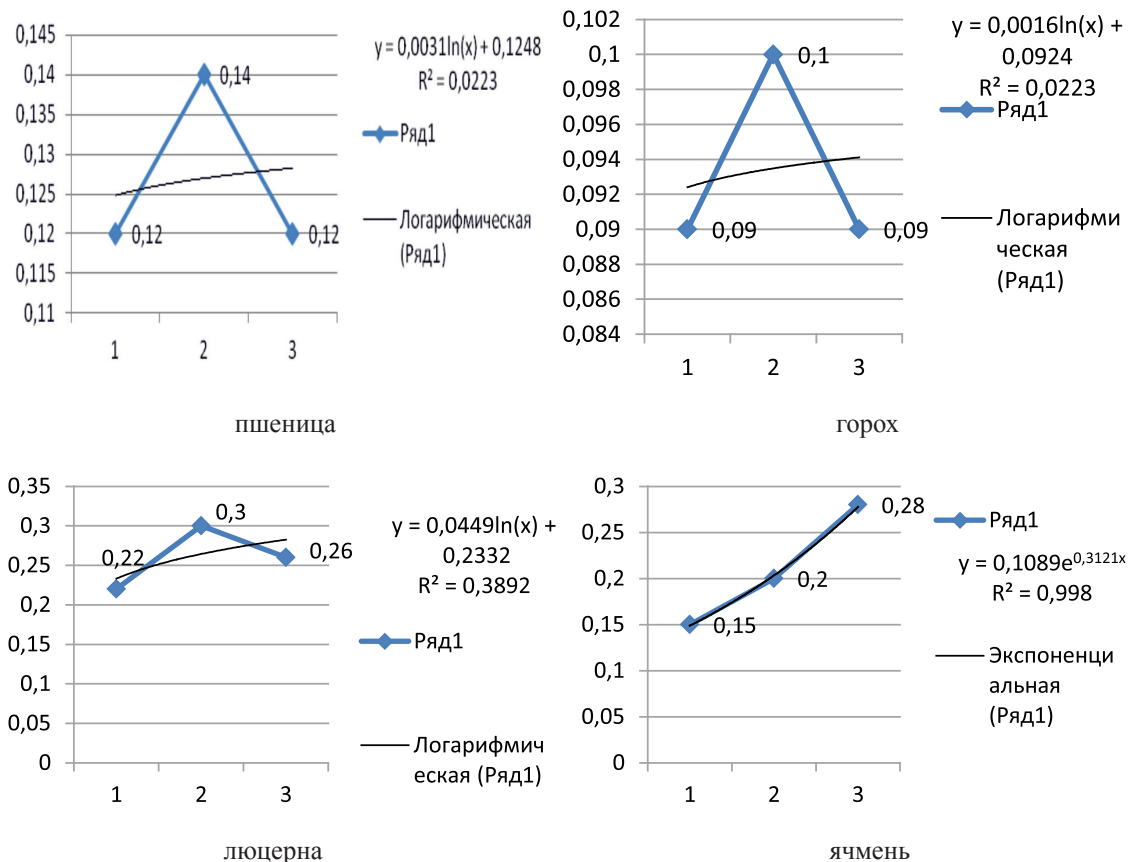


Рис. 4. Динамика накопления кадмия в зеленой массе пшеницы, гороха, люцерны и ячменя в зависимости от расстояния: 1 – 20, 2 – 100 и 3 – 200 м до примагистральной лесополосы, мг/кг

Таблица 8

Динамика значений КБП свинца и кадмия для сельскохозяйственных культур в условиях примагистральной экосистемы

№ п/п	Сельскохозяйственная культура	КБП, расстояние от полевосащитной лесополосы, м					
		20 м		100 м		200 м	
		Свинец	Кадмий	Свинец	Кадмий	Свинец	Кадмий
1	Пшеница озимая (<i>Triticum aestivum L.</i>)	0,31	0,60	0,40	0,70	0,51	0,80
2.	Ячмень (<i>Hordeum vulgare L.</i>)	0,41	0,75	0,47	1,0	0,60	1,60
3	Горох (<i>Pisum sativum L.</i>)	0,57	0,45	0,65	0,50	0,70	0,60
4	Люцерна (<i>Medicago sativa L.</i>)	0,66	1,1	0,68	1,50	0,72	1,55

Анализ данных табл. 8 показывает, что КБП свинца увеличивается по мере удаления (увеличения расстояния) от примагистральной лесозащитной полосы. Следовательно, увеличение валового содержания (до 200 м) и подвижных форм (до 100 м) в пахотной почве способствует аккумуляции свинца вегетативными тканями культур. КБП кадмия зеленой массой люцерны были самым высоким. Анализ данных показывает, что КБП кадмия увеличивается по мере удаления (увеличения расстояния) от примагистральной лесозащитной полосы. Отметим, что КБП кадмия для всех сельскохозяйственных культур было выше по сравнению с КБП свинца.

Заключение

«Зеленый щит» примагистральной защитной лесополосы выполняет свое назначение, почвы лесополосы и листья деревьев максимально аккумулируют свинец и кадмий, изымая их из миграции в агроценозе. Уровень валового содержания свинца в почве лесополосы превышает значения ОДК и РГФ. Уровень валового содержания свинца в пахотных почвах агроценоза не превышает значения ОДК, но составляет 1,1–2,5 РГФ. Это свидетельствует о фактах начального загрязнения свинцом пахотных почв примагистральной экосистемы. Концентрация подвижного свинца в почвах лесополосы составляла 2,1 ОДК, а в пахотных почвах – 0,95–1,0 ОДК. Минимальная концентрация валового свинца обнаружена в почвенных образцах в 20 м от лесополосы. Уровень валового содержания кадмия в почве лесополосы и в пахотной почве агроценоза не превышает значения ОДК, но незначительно превышает значения РГФ, что также говорит о возможном загрязнении пахотных почв примагистральной экосистемы кадмием. Минимальная концентрация валового кадмия обнаружена в почвенных

образцах в 200 м от полевосащитной лесополосы. Установлено, что в листьях древесных пород примагистральной зеленой полосы содержание свинца выше ПДК (по Прохоровой) в 2,5–6,9 раза. Установлен ряд снижения способности листьев деревьев накапливать свинец: акация белая < вяз мелколистный < ясень ланцетный < клен американский. Содержание кадмия в листьях разных древесных пород достоверно не отличалось и было значительно ниже ПДК. Самое высокое значение коэффициента биологического накопления свинца и кадмия характерно для клена американского и ясеня ланцетного, а самое низкое – для акации белой. Обнаружено, что сельскохозяйственная культура пшеница озимая по сравнению с другими изучаемыми культурами менее всего аккумулирует в зеленой массе свинец. Максимальное количество свинца обнаружено в зеленой массе люцерны на расстоянии 100 м от трассы. Среднее содержание свинца в зеленой массе сельскохозяйственных культур формирует возрастающий ряд: пшеница < ячмень < горох < люцерна. Среднее содержание кадмия в зеленой массе сельскохозяйственных культур формирует следующий возрастающий ряд: в условиях буферной зоны на расстоянии 20 м и на расстоянии 100 м от лесополосы – горох > пшеница > ячмень > люцерна; на расстоянии 200 м от лесополосы – горох > пшеница > люцерна > ячмень. Коэффициент биологического поглощения кадмия для изучаемых сельскохозяйственных культур выше по сравнению с аналогичным коэффициентом для свинца. Коэффициент биологического поглощения кадмия зеленой массой люцерны – самый высокий и при увеличении расстояния от примагистральной лесозащитной полосы становится максимальным. Отметим, что КБП кадмия для изучаемых сельскохозяйственных культур выше КБП свинца.

Список литературы / References

1. Здорнов И.А., Нагимов З.Я., Капралов А.В. Санитарное состояние придорожных защитных лесных полос в условиях Северного Казахстана // Успехи современного естествознания. 2018. № 3. С. 44–51.
- Zdornov I.A., Nagimov Z.Ya., Kapralov A.V. Sanitary state of roadside protective forest strips under Northern Kazakhstan conditions // Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya. 2018. № 3. P. 44–51 (in Russian).
2. Рагимов А.О., Мазиров М.А., Шентерова Е.М., Зунимаймайти А. Особенности аккумуляции тяжелых металлов в почвенном покрове придорожной территории автомобильной трассы на примере Судогорского района Владимирской области // Успехи современного естествознания. 2019. № 12–1. С. 122–127.
- Ragimov A.O., Mazirov M.A., Shenterova E.M., Zunimaymayti A. Features of accumulation of heavy metals in the soil cover of the road territory on the example of the Sudogodskiy district of the Vladimir region // Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya. 2019. № 12-1. P. 122–127 (in Russian).
3. Серегина Ю.Ю., Семенова И.Н., Кужина Г.Ш. Комплексная оценка загрязнения тяжелыми металлами почвенного покрова прибрежной зоны р. Белая Белорецкого района Республики Башкортостан // Живые и биокосные системы. 2013. № 3. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.jbks.ru/archive/issue-3/article-4> (дата обращения: 28.11.2021).
- Seregina Yu.Yu., Semenova I.N., Kuzhina G.Sh. Comprehensive assessment of heavy metal pollution of the soil cover of the coastal zone of the Belaya river of the Beloretsky district of the Republic of Bashkortostan // «Zhivye i biokosnye sistemy». 2013. № 3 [Electronic resource]. URL: <http://www.jbks.ru/archive/issue-3/article-4> (date of access: 28.11.2021). (in Russian).
4. Казанцев И.В., Матвеева Т.Б. Содержание тяжелых металлов в почвенном покрове в условиях техногенеза // Самарский научный вестник. 2016. № 1 (14). С. 34–37.
- Kazantsev I.V., Matveeva T.B. The content of heavy metals in the soil cover in the conditions of technogenesis // Samarskiy nauchnyy vestnik. 2016. № 1 (14). P. 34–37 (in Russian).
5. Олива Т.В., Романькова А.А. Использование различной накопительной способности тяжелых металлов органами растений в биоиндикации наземных экосистем // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел биологический. 2009. Т. 114. № 3. С. 313.
- Oliva T.V., Romankova A.A. The use of various accumulative capacity of heavy metals by plant organs in the bioindication of terrestrial ecosystems // Byulleten' Moskovskogo obshchestva ispytatelej prirody. Otdel biologicheskij. 2009. V. 114. № 3. P. 313 (in Russian).
6. Авдеев Ю.М., Костин А.Е., Титов Д.В., Попов Ю.П. Экологическое состояние зеленых насаждений // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2017. № 7. С. 114–118.
- Avdeev Yu.M., Kostin A.E., Titov D.V., Popov Yu.P. Ecological condition of green spaces // Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2017. № 7. P. 114–118 (in Russian).
7. Авдеев Ю.М., Попов Ю.П., Хамитова С.М., Швецов П.А. Жизненное состояние фитоценозов в урбанизированной среде // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2017. № 10. P. 148–153.
- Avdeev Yu.M., Popov Yu.P., Khamitova S.M., Shvetsov P.A. Vital state of phytocenoses in urban environment // Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2017. № 10. P. 148–153 (in Russian).
8. Меншиков С.Л., Завьялов К.Е., Кузьмина Н.А., Мохначев П.Е., Цепордей И.С. Распределение деревьев опытных культур *Betula pendula* Roth. по ступеням толщины и уровень загрязнения почвы в зоне действия выбросов комбината «Магnezит» // Успехи современного естествознания. 2016. № 10. С. 84–89.
- Menshikov S.L., Zavyalov K.E., Kuzmina N.A., Mokhnachev P.E., Tsepordey I.S. Distribution of *Betula pendula* Roth. test crops by diameter class and level of pollution of soil in the area of emissions of the JSC «Magnesite» integrated industrial complex // Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya. 2016. № 10. P. 84–89 (in Russian).
9. Жуйкова Т.В., Зиннатова Э.Р. Аккумулирующая способность растений в условиях техногенного загрязнения почв тяжелыми металлами // Поволжский экологический журнал. 2014. № 2. С. 196–207.
- Zhuykova T.V., Zinnatova E.R. Accumulating capability of plants in areas anthropogenically polluted with heavy metals // Povolzhskij ekologicheskij zhurnal. 2014. № 2. P. 196–207 (in Russian).
10. Михайлова Т.А., Шергина О.В. Экологические критерии для расчета площади зеленых насаждений в промышленных городах // Успехи современного естествознания. 2015. № 6. С. 123–128.
- Mikhailova T.A., Shergina O.V. Ecological criteria for calculation green plantation area within industrial cities // Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya. 2015. № 6. P. 123–128 (in Russian).
11. Ветчинникова Л.В., Кузнецова Т.Ю., Титов А.Ф. Особенности накопления тяжелых металлов в листьях древесных растений на урбанизированных территориях в условиях // Труды Карельского научного центра РАН. 2013. № 3. С. 68–73.
- Vetchinnikova L.V., Kuznetsova T.Yu., Titov A.F. Patterns of heavy metal accumulation in leaves of trees in urban areas in the North // Trudy Karel'skogo nauchnogo centra RAN. 2013. № 3. P. 68–73 (in Russian).
12. Михайлова Т.А., Шергина О.В., Калугина О.В. Подбор древесных и кустарниковых растений для озеленения территорий, загрязняемых техногенными фторидами // Успехи современного естествознания. 2018. № 11–2. С. 284–288.
- Mikhaylova T.A., Shergina O.V., Kalugina O.V. Selection of trees and shrubs for planting territories polluted by technogenic fluorides of trees and shrubs for planting territories polluted by technogenic fluorides // Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya. 2018. № 11–2. P. 284–288 (in Russian).
13. Уразова А.Ф., Нагимов З.Я. Современное состояние защитных лесных насаждений вдоль Свердловской железной дороги // Успехи современного естествознания. 2021. № 1. С. 26–31.
- Urazova A.F., Nagimov Z.Ya. Current state of protective forest stands along the Sverdlovsk railway // Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya. 2021. № 1. P. 26–31 (in Russian).