

ОСОБЕННОСТИ НАКОПЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ПОЧВЕННЫХ ЭКОСИСТЕМАХ САРАТОВСКОГО ПОВОЛЖЬЯ

В статье представлены результаты исследований особенностей аккумуляции тяжелых металлов антропогенного происхождения в черноземах и растениях в окрестностях урбанизированных территорий Саратовской области. Максимальная концентрация тяжелых металлов зарегистрирована в черноземах южных и в биомассе произрастающих на них растений в пределах Приволжской возвышенности.

Ключевые слова: тяжелые металлы, почвенная среда, биогенная миграция элементов, коэффициент биологического поглощения.

Саратовская область имеет разнообразное ландшафтное строение. В пределах области выделяются «азональные» ландшафтные провинции: Окско-Донская равнина и Приволжская возвышенность. Саратовская область характеризуется достаточно богатым земельным фондом в сравнении с другими регионами Среднего Поволжья. По данным государственного учета земельный фонд Саратовской области по всем категориям земель составляет 10123,9 тыс. га. В структуре земельного фонда области преобладают земли сельскохозяйственного назначения (84,1%) и земли лесного фонда (5,3%), причем отличительной особенностью области является высокая распаханность территории с удельным весом пашни до 70% от площади сельскохозяйственных угодий [1].

В последние десятилетия наблюдается устойчивая перестройка экологического режима почвенных экосистем в сторону регрессивного развития практически на всей территории области под воздействием мощных факторов загрязнения. К таким факторам относятся загрязнение земель тяжелыми металлами, входящими в состав различных отходов. Ежегодно в области суммарно образовывается около 3,5 млн. т промышленных и сельскохозяйственных отходов. Увеличилось количество отходов 3-го, 4-го, 5-го классов опасности. Отходы жилищно-коммунальной отрасли составляют более 3 млн. т, при этом удельный вес вторично использованных отходов в этой системе остается низким и составляет 0,7% [2].

Роль тяжелых металлов двойственна. С одной стороны, эти элементы необходимы для нормального протекания физиологических процессов, а с другой – при повышенных кон-

центрациях они токсичны. Наибольшую опасность для живых организмов и человека представляют лабильные формы, характеризующиеся высокой биохимической активностью, способностью накапливаться в почвенной среде, биогенной миграцией между пограничными с почвой средами. Содержание подвижных форм химических элементов (в том числе тяжелых металлов) существенно изменяется под воздействием погодных условий, которые за период проведения опытов характеризовались большим разнообразием [3, 7, 8].

Совокупное действие рельефа, климата, растительности и почвенных факторов определило высокую активность процессов водной эрозии, которые способствуют миграции, перераспределению и аккумуляции тяжелых металлов по элементам ландшафтов и агроландшафтов черноземной степи Саратовской области.

Систематическое проявление водной эрозии, в особенности в центральной части области, заметно снижает производительную способность экосистем. С поверхностным стоком теряется и перераспределяется огромное количество биогенных элементов. При этом возникает опасность концентрации элементов (в том числе и тяжелых металлов) на локальных участках почвенного покрова и в водной среде. Смыв и перенос высокогумусированных почвенных частиц способствуют перераспределению тяжелых металлов как по поверхности почвы, так и по ее профилю, в то же время осуществляя тесное взаимодействие между почвенным покровом, гидросферой и растительным покровом.

Тяжелые металлы обладают различными физико-химическими, биохимическими и ток-

Таблица 1. Влияние эколого-ландшафтных условий на содержание тяжелых металлов в почве (гор. А_{пах})

Ландшафты и подтипы черноземных почв	Тяжелые металлы, мг/кг							
	Cu	Zn	Pb	Cd	Ni	Hg	As	M _{ср}
Чернозем обыкновенный (Донская равнина)	10,4*	28,0	7,14	0,21	8,49	0,022	0,32	7,80
	11,4	38	7,14	0,22	8,5	0,02	1,2	9,5
Чернозем обыкновенный (Приволжская возвышенность)	7,2	15,4	7,90	0,10	13,7	0,010	1,05	6,5
	12,2	29	7,58	0,27	10,8	0,05	3,2	9,0
Чернозем южный (Приволжская возвышенность)	7,8	10,4	7,0	0,12	12,4	0,035	5,25	6,1
	14,6	30	8,87	0,05	15,6	0,08	4,54	10,6
НСР _{0,95}	0,26	0,031	0,123	0,023	0,918	0,012	0,782	
	0,13	2,62	0,15	0,05	1,06	0,013	0,26	
Достоверность результатов	P < 0,05							

* Числитель – малорастворимые формы металлов, знаменатель – растворимые формы

сикологическими свойствами [6]. В пределах Саратовской области недостаточно изучены механизмы накопления и миграции соединений тяжелых металлов в системе почва – вода – растение, что определяет актуальность данных исследований.

Мониторинговые исследования (2000–2009 гг.) черноземных почв Окско-Донской равнины проведены в Балашовском, Ртищевском, Аркадакском, Романовском, Турковском районах (западный регион области), черноземов Приволжской возвышенности – в Саратовском, Балаковском, Марксовском, Вольском, Хвалынском, Красноармейском районах (центральный регион). Общая обследованная площадь составила 97,4 тыс. га. При выполнении исследований использовались полевые, лабораторно-полевые, лабораторные, статистические и экспедиционные методы [4, 5, 6, 9]. Результаты исследований соответствуют 95%-ному статистическому уровню доверия.

Формирование малорастворимых форм тяжелых металлов в основном определяется химическим составом подстилающих пород (табл. 1).

Аккумуляция растворимых форм тяжелых металлов происходит с участием более широкого диапазона факторов. Поэтому в количественном отношении уровень содержания растворимых тяжелых металлов в среднем по всем ландшафтам на 44,7% выше, чем малорастворимых, что свидетельствует о важной роли прежде всего техногенного фактора в формировании депо тяжелых металлов.

Максимальное антропогенное и техногенное воздействие испытывают верхние гумусовые горизонты почв, в которых удерживается основная часть металлов и происходит их пер-

вичная трансформация.

Малорастворимые соединения цинка и меди, подвижные соединения цинка активнее накапливаются в пахотном слое почв Окско-Донской равнины. Растворимые формы меди, кадмия, никеля, свинца, ртути и мышьяка, малорастворимые соединения ртути и мышьяка преобладают в пахотном слое чернозема южного Приволжской возвышенности.

Обыкновенный чернозем Приволжской возвышенности имеет повышенное содержание малорастворимых соединений никеля и свинца и среднее содержание по остальным параметрам, что отражено в таблице 1.

Наиболее заметная аккумуляция тяжелых металлов по сравнению с другими ландшафтами отмечается в черноземе южном Приволжской возвышенности. Близость городского промышленного конгломерата (гг. Саратов, Балаково, Вольск и др.) с развитой транспортной системой, повышенный уровень применения химических средств в сельском хозяйстве способствуют более активному (74,5%) по сравнению с другими ландшафтами росту уровня содержания растворимых тяжелых металлов в почве.

Рельеф активно влияет на дифференциацию тяжелых металлов по элементам водосбора. В условиях повышенной активности водной эрозии вектор перераспределения тяжелых металлов направлен от водораздела по склону, через ложбину до лесной полосы и водных источников. На водораздельных участках остаются в относительно высоких концентрациях: фтор, медь, цинк, кадмий, а содержание ртути и свинца снижается. На склоновых почвах аккумулируется в основном ртуть, в меньшей степени – свинец. В ложбине, где скорость водных потоков увеличивается, содержание подвижных

соединений всех определяемых нами микроэлементов наименьшее.

Лесная полоса, целинные и залежные фитocenозы являются фитогеохимическими барьерами на пути миграции токсикантов. В них происходит накопление подвижных форм тяжелых металлов, особенно свинца, цинка, меди и кадмия.

Водоемы играют роль природного геохимического барьера. Находясь на пути транзитных стоков, донные отложения прудов и рек являются отражением уровня содержания тяжелых металлов и фтора в почвах.

Содержание тяжелых металлов и фтора снижается по схеме: донные отложения прудов – почва – донные отложения реки Медведица. Так ил прудов (в среднем по 5 прудам) содержал фтора в 4,6 раза больше, а ил р. Медведицы в 5,9 раза меньше, чем верхний горизонт почвы полевых севооборотов. В иле прудов по сравне-

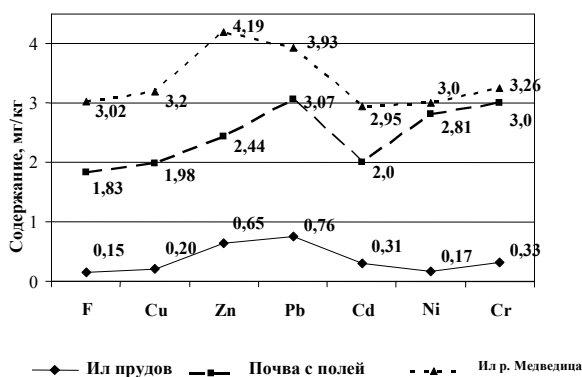


Рисунок 1. Тренды средневзвешенного содержания (в мг/кг) тяжелых металлов и фтора в различных природных объектах (2000–2009 гг.)

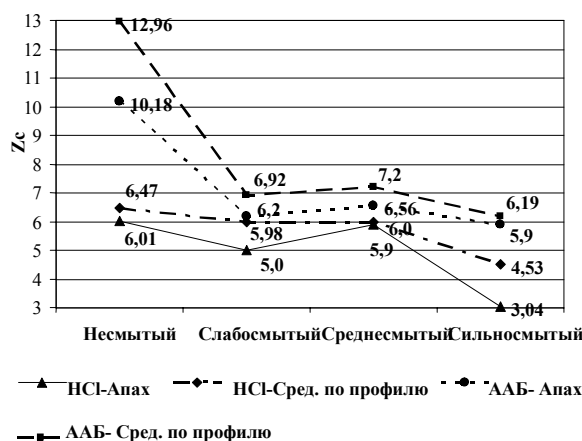


Рисунок 2. Показатель суммарного загрязнения (в мг/кг) почвенного профиля тяжелыми металлами различной растворимости (2000–2009 гг.)

нию с почвой отмечено более высокое содержание кислоторастворимых форм меди, свинца, никеля и пониженное цинка, кадмия и хрома. Из растворимых форм отмечается повышенная концентрация меди, свинца и никеля. В донных отложениях р. Медведица отмечено более низкое содержание тяжелых металлов, чем в прудовых отложениях, что является следствием различия в проточности этих водоемов (рис. 1).

Кратные отношения различных форм растворимости тяжелых металлов – показатель динамики содержания их в исследуемых объектах. Более узкие кратные отношения между кислоторастворимыми и подвижными формами в иле донных отложений прудов по сравнению с почвой отмечаются по меди, свинцу и хрому. По остальным показателям (цинку, кадмию, никелю) они стали более широкими, что указывает на менее интенсивный характер поступления их в водные источники из внешней среды.

В зональных (несмытых) черноземах обыкновенных выявлен высокий уровень положительной корреляционной связи ($r=0,93$) содержания тяжелых металлов гумусового слоя с материнской породой.

Перераспределение тяжелых металлов в почвенном профиле происходит в основном за счет растворимых форм и ограничивается гумусовым слоем. Дифференциация содержания малорастворимых форм тяжелых металлов по гумусовому горизонту выражена слабо и относительно материнской породы остается малозаметной. Закономерность перераспределения фтора имеет аналогичный характер с растворимой формой тяжелых металлов.

Поэтому по мере увеличения глубины почвенного профиля кратность отношения между содержанием малорастворимых и растворимых форм тяжелых металлов становится шире, что также указывает на высокий уровень аккумуляции растворимых форм тяжелых металлов в гумусовом слое почвы.

Показатель суммарного загрязнения, численно равный сумме отношений содержания тяжелых металлов в почвенных горизонтах к их фоновому содержанию в материнской породе, не превышает допустимых значений (рис. 2).

В условиях выраженного рельефа ежегодный сток талых и ливневых вод уносит с собой значительное количество почвенных частиц, а вместе с ними гумус, питательные вещества и

Таблица 2. Влияние ландшафтных условий на содержание тяжелых металлов в сельскохозяйственных культурах (в среднем по основным культурам) (2002–2009 гг.)

ТМ	Азональные ландшафты					
	Окско-Донская равнина		Приволжская возвышенность			
	Чернозем обыкн., степень эродированности почв 40%		Чернозем обыкн., степень эродированности почв 60%		Чернозем южный, степень эродированности почв 75%	
	гумус, %	ТМ, мг/кг	гумус, %	ТМ, мг/кг	гумус, %	ТМ, мг/кг
Cu	6,22	5,85	5,78	5,60	3,45	3,68
Zn		25,97		26,32		32,04
Pb		1,48		0,035		1,29
Cd		0,064		0,023		0,21
Ni		1,53		1,37		1,07
Cr		0,23		0,072		0,65
Достоверность результатов	P < 0,05					

тяжелые металлы. Уменьшение содержания микроэлементов в средне-сильносмытых почвенных аналогах по сравнению с несмытыми в среднем достигает соответственно: малорастворимых 27,6%, а растворимых 48,3%.

Проведенный анализ для каждой степени смытости почвы показал, что содержание различных форм тяжелых металлов в профиле почвы адекватно интенсивности проявления эрозионных процессов. Выяснилось, что каждый анализируемый элемент в зависимости от формы растворимости имеет индивидуальную реакцию на степень проявления эрозии.

Из малорастворимых форм верхние горизонты смытых почв наиболее активно теряют цинк, фтор, никель. Миграционная способность меди, кадмия, хрома и свинца имеет ограниченный характер.

Особенно интенсивно мигрируют растворимые формы тяжелых металлов. Так, в верхних горизонтах смытых почв по сравнению с несмытыми аналогами запасы растворимых микроэлементов в среднем снизились: фтора – в 1,9 раза, меди – на 15,4%, цинка – в 3,5 раза, свинца – на 12,7%, кадмия – на 11,8%. Запасы никеля и хрома в почве оставались практически неизменными.

Установлена тесная связь между содержанием тяжелых металлов в материнской породе и пахотном горизонте обрабатываемых почв, с одной стороны, и содержанием их в растениях – с другой. Коэффициенты корреляции между содержанием тяжелых металлов в растениях и материнской породе и, соответственно, растениях и пахотном горизонте находились в пределах $r=0,89 \dots 0,93$.

Результаты проведенных исследований выявили тесную связь содержания в растениях тяжелых металлов с их местообитанием. Так в растениях на обыкновенных, более разрушенных эрозией, черноземах Приволжской возвышенности по сравнению с тем же подтипом Окско-Донской равнины средневзвешенное содержание тяжелых металлов снизилось на 13,6%, а по сравнению с южным черноземом Приволжской возвышенности – на 37,5%, что отражено в таблице 2.

Дифференциация содержания тяжелых металлов в растениях обусловлена прежде всего закономерностью снижения содержания гумуса в черноземных почвах в направлении с запада на восток, повышением активности эрозионных процессов, а также усилением роли техногенеза в формировании почвенного депо тяжелых металлов.

Важную роль в формировании уровня выноса тяжелых металлов растениями играют их биологические особенности. Сравнительный анализ различных групп сельскохозяйственных культур показал, что максимальная концентрация меди, цинка, кадмия и фтора в целом растении (зерно + солома) отмечается в растениях пропашной группы (подсолнечник, кукуруза).

Бобовые культуры (горох, люцерна, чечевица) активнее ассимилируют свинец, никель и хром. Зерновые культуры (озимая рожь, озимая и яровая пшеница, ячмень, овес) обладают наименьшей металлоаккумулирующей способностью.

Средневзвешенное содержание тяжелых металлов в растениях пропашной группы было на 39,5% выше, чем зерновой, и на 6,9% выше, чем в бобовых культурах. Эти различия, в ос-

новном определяются биологическими особенностями сельскохозяйственных культур.

Максимальная концентрация тяжелых металлов отмечена в растениях всех биологических групп, полученных на черноземах южных Приволжской возвышенности.

Концентрация тяжелых металлов в растениях, выращенных на черноземах обыкновенных Приволжской возвышенности, ниже на 28,8%, а на черноземах обыкновенных Окско-Донской равнины ниже на 43,1%, чем на южных черноземах.

Коэффициент биологического поглощения тяжелых металлов и фтора, определяемый запасами растворимых форм тяжелых металлов в почве и уровнем поглощения их растениями, в среднем составил: на черноземах обыкновенных Окско-Донской равнины – 0,63, на черноземах обыкновенных Приволжской возвышенности – 1,32, а на черноземах южных Приволжской возвышенности – 2,95.

Наиболее толерантными культурами к уровню почвенного загрязнения оказались про-

пашные культуры. Колебание уровня загрязнения растительной продукции по «азональным» ландшафтам в сравнении со средневзвешенной концентрацией по черноземной зоне составило: у зерновых от 6,4 до 31,6%, у бобовых от –0,7 до +12,4, а у пропашных от –3,7 до +14,2%.

Процессы водной эрозии почвы оказывают значительное влияние на потребление растениями тяжелых металлов. Максимальное содержание тяжелых металлов, независимо от возделываемой культуры, отмечено на несмытых почвах. По мере усиления степени смытости почвы концентрация тяжелых металлов в зерне снижалась. Так на среднесмытых почвах по сравнению с несмытыми почвам она уменьшилась на 10,4%, а на средне- и сильносмытых – соответственно на 22,3 и 45,2%.

Таким образом, почвы Саратовской области в наибольшей степени антропогенно загрязняются в окрестностях крупных урбосистем растворимыми формами тяжелых металлов, которые активно мигрируют в живые организмы, в том числе в растения.

Список использованной литературы:

1. Воскресенский, С. Г. География Саратовской области [Текст] / С. Г. Воскресенский, А. М. Демин, Л. В. Макарецва. – Саратов: РПИ, 1997. – 224 с.
2. Доклад о состоянии окружающей природной среды в Саратовской области в 2008 году [Текст] / Госкомитет по охране окр. ср. Саратовской обл. – Саратов: ВП, 2009. – 188 с.
3. Кабата-Пендиас, А. Микроэлементы в почвах и растениях [Текст] / А. Кабата-Пендиас, Х. Пендиас. – М.: Мир, 1989. – 439 с.
4. Ковальский, В. В. Методы определения микроэлементов в органах и тканях животных, растений и почвах [Текст] / В. В. Ковальский, А. Д. Голобов. – М.: Колос, 1969. – 272 с.
5. Любимов, В.Б. Математические методы в биологии и экологии [Текст] / В.Б. Любимов, К.В. Балина. – Брянск: БГУ, 2005. – 81 с.
6. Матвеев, Н. М. Тяжелые металлы в некоторых сельскохозяйственных растениях Самарской области [Текст] / Н. М. Матвеев, Н. В. Прохорова, В. А. Павловский, С. И. Никитин // Вопросы экологии и охраны природы в лесостепной и степной зонах. – Самара, 1995. – С. 122–127.
7. Смирнова, Н. В. Влияние свинца и кадмия на фитотоксичность почвы [Текст] / Н. В. Смирнова, А. В. Шведова // Экология и промышленность России, 2005. – Апрель. – С. 32–35.
8. Aggett, P. J. Soil and congenital malformations [Text] / P. J. Aggett, S. Rose // *Experientia*. – 1987. – Vol.43. – № 1. – P. 104–108.
9. Donald, C. M. Competition among crop and pasture plants *Advan* [Text] / C. M. Donald. – *Agron*, 1963. – V. 15. – P. 1–118.

Сведения об авторах:

Ларионов Максим Викторович, кандидат биологических наук, старший преподаватель кафедры естественнонаучных и гуманитарных дисциплин Балашовского филиала Саратовского государственного аграрного университета им. Н.И. Вавилова

Ларионов Николай Викторович – аспирант кафедры биологии и экологии факультета экологии и биологии Балашовского филиала (института) Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского. 412300, Саратовская область, г. Балашов, ул. Карла Маркса, 29, тел.: (84545) 44053, e-mail: Inv001@rambler.ru

**Larionov M.V., Larionov N.V.
CHARACTERISTICS OF ACCUMULATION OF HEAVY METALS IN SOIL ECOSYSTEMS OF SARATOV
VOLGA RIVER REGION**

The paper provides the results of research into accumulation patterns of anthropogenic heavy metals in the black soils and plants on urbanized areas of Saratov Region. The maximum concentration of heavy metals was found in the southern chernozems and in the above plant biomass within the Volga Uplands.

Key words: heavy metals, soil environment, biogenic element migration, factor of biological uptake.