

УДК 504.4.054 (470.319)

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ПОЧВЕННОЙ БИОТЫ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ РАЗЛИЧНЫХ УРОВНЕЙ ПОЛЛЮТАНТОВ

Степанова Л.П.¹, Писарева А.В.², Яковлева Е.В.¹, Раскатов В.А.³

¹Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина,

г. Орёл, Российская Федерация,

e-mail: step.lp@yandex.ru, elenavalerevna79@ya.ru

²Московский государственный технический университет имени Н.Э.Баумана,

г. Москва, Российская Федерация, e-mail: pavpav.06@mail.ru

³Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная
академия им. К.А. Тимирязева, г. Москва, Российская Федерация,

e-mail: raskatovv@list.ru

В статье проанализирован изотопный состав тяжёлых металлов и их антропогенное происхождение, включая промышленные выбросы завода алюминиевого литья, выхлопные газы, происходящие от регулярного воздействия транспортных средств, а также пылевых бурь. В результате исследований показано, что самое высокое содержание тяжёлых металлов в почве в придорожных зелёных поясах и самым низким на удалении от источников загрязнений. Показана возможность использования беспозвоночных животных в качестве биоиндикаторов состояния почвы, поскольку микроартроподы остро реагируют на изменение окружающей среды. Загрязнение почвы, в том числе и в результате техногенной нагрузки, оказывает существенное влияние на качество воды и воздуха и, в конечном итоге, на здоровье человека (Ksenofontov, 2015). Во всех почвенных образцах содержание тяжёлых металлов показывает положительную корреляцию, а воздействие движущихся транспортных средств города, плотность населения и возрастание урбанизации в совокупности с влиянием промышленных отходов способствуют загрязнению почв. Исследовано токсикологическое состояние почвенных горизонтов, представлена эколого-микробиологическая характеристика гумусового горизонта в зонах техногенного воздействия поллютантов и оценено изменение численности микроорганизмов почвы в результате токсичного загрязнения городских почв, которые находятся на разной удалённости от источников загрязнения, таких как: Московская кольцевая автодорога города Москва, а также отвальный шлак отходов промышленного производства алюминиевого литья в Орловской области. Выполнена оценка видов почвенных беспозвоночных при воздействии различного уровня почвенного загрязнения. Установлено изменение ферментативной и микробиологической активности почвы в зависимости от величины коэффициента суммарного накопления тяжёлых металлов.

Ключевые слова: урбанозёмы; тяжёлые металлы; экосистемы; микроорганизмы; беспозвоночные; почвенно-биотические сообщества.

Введение

Металлургические предприятия, расположенные на территориях как крупных, так и малых поселений характеризуются наличием зоны максимальных концентраций тяжёлых металлов в радиусе до пяти километров от источника загрязнения и расширения зон повышенных содержаний концентрации тяжёлых металлов до 20–50 км от источников загрязнения (Ksenofontov, 2016). Как показывают литературные источники, уровень загрязнения токсичными металлами (Pb, Zn, Cu и As) установлен в результате систематического отбора проб в верхнем слое городских почв в крупном индустриальном центре городе Ахваз, который является одним из самых быстроразвивающихся мегаполисов в Иране (Ahmadipour, 2014). При экологических исследованиях в почвах города Ахваз были применены методы отслеживания изотопов свинца (Pb) для выявления источника загрязнения тяжёлыми металлами в поверхностных слоях городских почв (Ksenofontov, 2016). Учёными доказано, что в

большинстве промышленных азиатских странах, странах США, Канады, выбросы в атмосферу достигают высоких уровней (Ksenofontov, 2016).

Загрязнение почв и растений тяжелыми металлами оказывает пагубное влияние на биологическую активность растений, очистные свойства воды и на безопасность пищевых продуктов, это становится глобальной проблемой по всему миру (Singh, 2010), (Ksenofontov, 2016). Также очевидна и корреляция между содержанием тяжёлых металлов с расстоянием от источника загрязнения почв, расположенных на обочинах автотрасс и почв, расположенных вокруг шлаковых отвалов (Писарева, 2017).

Металлы проявляют высокую химическую активность в почве, что приводит к лёгкой степени поглощению растениями и в конечном счете угрожает здоровью человека через посредством пищевой цепи (Stepanova, 2019). Городские экосистемы играют решающую роль, как в очистке воздуха, так и в фиторемедиации при загрязнении тяжелыми металлами (Bednova, 2015). В условиях экстремального загрязнения, механизм адаптации таких видов растений, как Хвощёвник ветвистый (*Equisetum ramosistum*) и Леерсия шеститычинковая (*Leersia hexandra*), могут балансировать поглощение и перенос Pb, Zn и Cu (Singh, 2010). Большинство крупных городов Китая, например, город Хэфэй переживает значительные изменения в результате урбанизации в последние десятилетия (Bin, 2013).

Сброс загрязнённых сточных вод, а также поступление дренажных стоков сельскохозяйственных угодий приводит к загрязнению окружающей среды (Ksenofontov, 2016). Учёными доказано, что целесообразно компостировать с грунтом осадки сточных вод, а также их использовать в питомниках для дальнейшего выращивания кустарниковых, древесных и цветочно-декоративных растений (Bednova, 2018).

Неблагоприятные экологические последствия в результате размещения на различных территориях ландшафтов шлаковых отвалов в последствии загрязняют окружающую среду тяжелыми металлами (Bednova, 2018; Ksenofontov, 2017). Интерес представляет оценка влияния наличия тяжёлых металлов на физико-химические свойства почвенного покрова (Шеин, 2009). Доказано, что на исследуемых примыкающих территориях урбанозёмы в основном загрязнены цинком, свинцом, медью, кобальтом и кадмием (Nabulo, 2006). Отмечено, что работы по детоксикации почв должны быть хорошо проработаны с учётом специальных технологий, для хозяйственного, почвенно-географического, геоботанического и земледельческого планирования, а также применения краудсорсинга о земном покрове (Bayas, 2016).

Увеличение концентрации тяжёлых металлов способствует ингибирующему эффекту, который коррелируется продолжительностью воздействия тяжёлых металлов на процессы метаболизма почв, микроорганизмов, растений и других живых организмов (Epelde, 2009). Также литературные исследования подтверждают, то, что токсические тяжёлые металлы и газы, которые поступают в почву могут оказывать влияние на физико-химические свойства почвы. Фактором деградации большинства почв являются автозаправочные станции и выбросы выхлопных газов от автотранспорта (Arkharov, 2016).

Для оценки загрязнения городских почв города Москвы в 2015 году исследователями отбирались образцы почв с поверхности на глубину 0–20 см (Ksenofontov, 2015; Шеин, 2009). Также определяли содержание тяжёлых металлов, бенз(а)пирена, нефтепродуктов, величину pH водно-солевой вытяжки, содержание органических веществ, количество сухого остатка, макроэлементов питания (P_2O_5 , K_2O , NO_3 , NH_4). Полученные данные в текущем периоде в целом схожи с результатами экологического мониторинга в 2013 году, когда отмечалось заметное подщелачивание урбанозёмов, что характеризуют допустимый уровень загрязнения почв для Москвы.

Материалы и методы исследования

Территория объекта исследования №1 расположена в деревне Большое Думчино, на территории Мценского района Орловской области в России, что расположена на расстоянии от Москвы 294 километра, GPS координаты местности – 53.250798, 36.453338. Почвенный покров территории Мценского района составляют серые лесные почвы и тёмно-серые лесные.

Деградация почв и растений на изучаемой территории происходит в результате воздействия шлаковых отсеков Мценского завода (МЗАЛ), размещённых на территории д. Большое Думчино (Яковлева, 2006). В качестве объекта нами были выбраны ППН на удалённости в 50 м, 150 м, 300 м и 450 м от источника загрязнения. Характеристика почвенного покрова: почва-среднесуглинистая на лессовидных суглинках, среднегумусная грунтово-глеевая, среднemocная серая лесная.

Исследуемый объект №2 располагается в городе Москва, который является столицей России. Территория города Москва составляет 2561,5 км², а численность населения города составляет более 12,5 млн. человек, GPS координаты местности 55.753215, 37.622504.

В настоящее время преобладающий почвенный покров города Москва – урбанозёмы. Живые организмы, населяющие почву, обеспечивают её плодородие и выполняют экологические функции (Степанова, 2015). Микробиота (микроорганизмы и мезофауна) является важной частью почвы, состояние которой оценивают разными методами, нацеленными на характеристику ее таксономического и функционального биоразнообразия (Иващенко, 2014; Шеин, 2009).

Нами исследовались почвы (2013–2015 гг.), которые регулярно подвергаются техногенной нагрузке (автодорожный комплекс и выбросы промышленных предприятий; отвальный шлак алюминиевого литья соответственно), на различных территориях города Москвы (вдоль автотрассы Московской кольцевой автодороги (МКАД), парковая зона Лосинный остров) и малом поселении (д. Большое Думчино, Мценский район, Орловская область). В Москве выбрано шесть точек исследования, три из которых на расстоянии 5 м, 50 м и 300 м от МКАД. Каждый образец почвы нами был получен из композита из пяти суб-образцов (0–20 см) с помощью пластикового шпателя и смешения образцов путём просеивания через 2 мм нейлоновую сетку, почва высушивалась воздушным путём и хранилась в полиэтиленовых пакетах с целью дальнейшего исследования. Фоном (контролем) служила дерново-подзолистая почва (*Umbric Albeluvisols*) парковой зоны «Лосинный остров» г. Москва (особо охраняемая природная территория). В малом поселении (д. Б. Думчино, светло-серая лесная почва) выбраны точки на расстоянии 20 и 300 м от основного загрязнения (отвальный шлак). Образцы почвы в исследованных локализациях мегаполиса и малого поселения отбирали из верхнего 0–20 см гумусово-элювиального горизонта. В каждой локализации выбирали площадку (1х1 м), на которой методом «конверта» отбирали пять образцов почвы, для получения смешанного образца. Такой отбор образцов почвы позволяет избежать влияния её микромозаичности. Почвенные образцы доставляли в лабораторию и хранили образцы при температуре 4–5°C до использования в последующих анализах. Определение токсичных металлов производили с помощью атомно-абсорбционного спектрометра (модель PG990). Для учёта микроартропод (представители микрофауны) в серой лесной почве (удаление на 20 и 300 м) отбирали двенадцать образцов почвы (объём каждого 5 см³) из слоев 0–5 и 5–10 см на площади от 10 до 100 см² (Бызова, 1987). Полученные таким образом образцы подвергали эклетируванию в воронках Тульгрена. Численность и биомассу дождевых червей в серой лесной почве (удаление на 20 и 300 м) определяли методом почвенных раскопок (слой 0–20 см) на площади 1 м² (Асеева, 1991).

Пределы обнаружения для выбранных тяжёлых металлов методом спектрального анализа рассчитывали с использованием $3 \times SD$ (стандартное отклонение) концентрации десяти пустых образцов. Точность, указанная при двойных измерениях, составила $\pm 5\%$ для всех выбранных металлов. Для оценки потенциальной опасности загрязнения почв тяжёлыми металлами по образцам почв, нами была рассчитана сумма коэффициента концентрации (Z_c) для изучаемых токсичных металлов (Аринушкина, 1970). Для подсчета разных групп микроорганизмов выполняли посеы почвенной суспензии на твердые питательные среды: мясопептонный агар (МПА, аммонификаторы), крахмало-аммиачный агар (КАА, бактерии и актиномицеты, использование минерального азота), Чапека (микроскопические грибы), Гетчинсона (целлюлозоразлагающие микроорганизмы) (Балабина, 1990). Для десорбции микроорганизмов с почвенных частиц навеску почвы с водой растирали, водно-почвенную суспензию встряхивали (качалка, 15 мин) и готовили серию разведений. Высев на питательные среды выполняли в пятикратной повторности. После инкубации посевов на поверхности среды подсчитывали численность колониеобразующих единиц (КОЕ) микроорганизмов. Коэффициент минерализации органического вещества почвы рассчитывали, как отношение численности бактерий, выросших на КАА, к численности бактерий на МПА. Численность микроорганизмов (КОЕ/г) рассчитана на грамм сухой почвы. Чтобы уменьшить размеры и предположительные ошибки выборки и показать корреляцию между содержанием тяжёлых металлов в почве и микроорганизмами, нами был использован линейный регрессионный анализ. Также был проведен анализ с использованием статистического программного обеспечения Statistica.

Результаты и обсуждение

Исследуемые гумусовые горизонты, как урбанозёмов, так и светло-серой лесной почвы с удалённостью 20 м от шлака характеризуются как повышенногумусированные в отличии от малогумусированной фоновой дерново-подзолистой почвы с содержанием гумуса 1,27% и светло-серой лесной почвы с удалением от шлакового отвала на 300 м. Все исследуемые урбанозёмы отличаются нейтральной реакцией среды в сравнении с дерново-подзолистой (фон) и светло-серой лесной почвой вблизи отвала (табл. 1).

Таблица 1.
Химические свойства исследуемых почв (0–20 см) мегаполиса и малого поселения в условиях техногенной нагрузки (ЕКО, ёмкость катионного обмена; СНО, степень насыщенности основаниями)

Точка, №	Удаление от / источника загрязнения, м	Гумус, %	pH _{KCL}	ЕКО, ммоль/(экв)/100 г	СНО, %
Москва МКАД (урбанозём, дерново-подзолистая почва)					
1	5	2,84	6,9	10,04	96,5
2	50	3,37	6,37	14,61	91,2
3	300	3,39	7,1	9,4	95,4
4	Фон	1,27	4,75	12,0	26,3
д. Б. Думчино (антропогенно нарушенная светло-серая лесная почва)					
5	20	2,8	4,5	6,6	45,5
6	300	1,8	5,4	10,1	88,7

Для исследуемых урбанозёмов характерна высокая степень насыщенности основаниями 91,2–96,5% в сравнении с очень низкой величиной насыщенности основаниями гумусового горизонта дерново-подзолистой почвы. Следует отметить, что воздействие шлакового отвала на антропогенно-нарушенную светло-серую лесную почву обуславливает значительное снижение степени насыщенности основаниями и

сильнокислую среду, с увеличением удалённости от шлака возрастает насыщенность основаниями до 88,7% и снижается кислотность почвы до pH_{KCL} 5,4.

Микроорганизмы в исследуемых почвах. Общая численность микроорганизмов в опытных точках в разной удалённости от МКАД колебалась в пределах $3,6 \times 10^7$ КОЕ/г до $5,7 \times 10^7$ КОЕ/г. Как видно из данных, численность аммонифицирующих бактерий изменялась в пределах $1,5\text{--}2,8 \times 10^7$ КОЕ/г. При этом численность бактерий в урбанозёмах по мере удалённости от автотрассы увеличивалась в два раза, по сравнению с показателями вблизи к МКАД (5 м). В образцах почв, расположенных на расстоянии 50 м от МКАД численность аммонификаторов возрастает почти в 1,5 раза и составляет $2,3 \times 10^7$ КОЕ/г. Аналогичная ситуация установлена для аминоавтотрофной группировки бактерий. Вблизи к МКАД общая численность аминоавтотрофов достигает $2,1 \times 10^7$ КОЕ/г.

С увеличением расстояния от шоссе до 50 м численность аминоавтотрофов в почвах увеличивается до $2,6 \times 10^7$ КОЕ/г. Но, самая высокая численность аминоавтотрофов была установлена на удалении в 300 м от автотрассы и составила $2,9 \times 10^7$ КОЕ/г. Но, максимальная численность аминоавтотрофных бактерий выявлена на удалении на 50 м от шоссе и составила $2,3 \times 10^7$ КОЕ/г, а минимальная численность бактерий показана вблизи к шоссе $1,1 \times 10^7$ КОЕ/г.

Результаты исследований изменения численности актиномицетов показывают, что была наибольшая численность актиномицетов установлена в пределах 300 м, количество актиномицетов достигало 1×10^7 КОЕ/г, а численность актиномицетов вблизи от автодороги составила $0,9 \times 10^7$ КОЕ/г. Следует отметить, что все исследованные группы микроорганизмов показывают сходное распределение численности по опытным точкам на территории МКАД (табл. 2).

Таблица 2.

Показатели микробиологической активности в техногенно-изменённых урбанозёмах МКАД и светло-серых лесных почвах д. Б.Думчино

Расстояние, м		10 ⁷ КОЕ/г				10 ⁵ КОЕ/г			10 ⁷ КОЕ/г	К _{мин}
		МПА	КАА			Целлюлозоразлагающие на среде Гетчинсона		Грибы на среде Чапека	Общее кол-во	
			Общее	в том числе		Общее	в т.ч. актиномицеты			
		Бактерии		Актиномицеты						
МКАД	5	1,5 +0,02	2,1 +0,01	1,1 +0,02	0,9 +0,06	1,3 +0,07	1,3 +0,04	1,1 +0,02	3,6	1,4
	50	2,3 +0,07	2,6 +0,09	2,3 +0,03	0,3 +0,20	0,9 +0,05	0,9 +0,04	0,6 +0,06	4,9	1,2
	300	2,8 +0,19	2,9 +0,11	1,9 +0,34	1,0 +0,03	2,4 +0,06	2,4 +0,10	4,9 +0,43	5,7	1,02
(фон)		0,9 +0,02	1,1 +0,01	0,8 +0,03	0,3 +0,05	0,1 +0,01	0,1 +0,02	3,1 +0,02	2,1	1,2
Б.Думчино	20	0,2 +0,02	0,5 +0,03	0,4 +0,07	0,1 +0,01	0,3 +0,02	0,3 +0,03	0,05	0,7	2,4
	300	0,4 +0,01	1,3 +0,01	1,0 +0,03	0,3 +0,01	1,6 +0,06	1,6 +0,04	0,1	1,4	2,9

Численность грибной микрофлоры изменялась в зависимости от удаления автомагистрали, самое высокое количество единиц грибной микрофлоры установлено в урбанозёмах при наибольшем удалении от автотрассы и составило $4,9 \times 10^5$ КОЕ/г, а количество аэробных микроорганизмов было почти в 5 раз ниже установленной численности грибной микрофлоры в урбанозёмах с наибольшим удалением от шоссе, этот показатель был наименьшим вблизи к шоссе и достигал $1,1 \times 10^5$ КОЕ/г.

Количество актиномицетов менялось в пределах от $1,3 \times 10^5$ КОЕ/г вблизи к автотрассе до $2,4 \times 10^5$ КОЕ/г в наибольшей удалённости от шоссе. В опытной точке на расстоянии в 50 м от шоссе количество актиномицетов резко снижаось и было в 2,5 раза меньше численности аэробных микроорганизмов в почвах с наибольшей удалённостью от автотрассы. Показано, что в слое 0–20 см фоновой дерново-подзолистой почвы в парковой зоне г. Москвы ООПТ Лосиный остров общая численность микроорганизмов достигает $2,1 \times 10^7$ КОЕ/г, что почти в 2 раза ниже количества микроорганизмов в почвах с разной удалённостью от кольцевой автодороги. Заметно, что в фоновой почве меняется не только общая численность микроорганизмов, но и соотношение других эколого-трофических групп. Так численность аммонификаторов достигает $0,9 \times 10^7$ КОЕ/г и уступает численности аммонификаторов в почвах города более чем в 1,5 раза, а численность аминокислототрофов почти в 2 раза ниже количества аминокислототрофов в городских почвах. Численность актиномицетов в фоновой почве ООПТ парковой зоны была ниже значений, которые были получены для городских почв и это значение составило $0,3 \times 10^7$ КОЕ/г. Коэффициент петрификации фоновой почвы составляет 1,2 ед. Бактерии, использующих минеральные формы азота в фоновой почве составляют $0,8 \times 10^7$ КОЕ/г, что в 1,4–2,8 раза меньше чем в урбанозёмах.

Рассмотрим изменение численности микроорганизмов в серой лесной почве на разном удалении от шлакового отвала. Общая численность микроорганизмов почвы на расстоянии 20 м от отвала составила $0,7 \times 10^7$ КОЕ/г, а на расстоянии 300 м – возрастает почти в два раза и достигает $1,4 \times 10^7$ КОЕ/г. Показано, что общая численность микроорганизмов в серой лесной почве (20 м и 300 м) почти в 5 и 3 раза соответственно меньше таковой в почвах г. Москвы.

Численность аминокислототрофов и аммонификаторов на расстоянии 300 м от шлакового отвала возрастает почти в 2–2,5 раза по сравнению с ним же на расстоянии 20 м. Количество денитрифицирующих микроорганизмов и актиномицетов в почве вблизи отвала была $0,5 \times 10^7$ КОЕ/г. Эти же показатели отмечались и для почв мегаполиса. С удалённостью от отвала (300 м) численность денитрифицирующих бактерий и актиномицетов возрастает до $1,3 \times 10^7$ КОЕ/г, что в 2,5 раза выше по сравнению с соответствующей близкой локализацией шлака. С увеличением антропогенной нагрузки на почвенный слой отмечается тенденция повышения коэффициента минерализации. Так, в почве вблизи шлакового отвала он составил 2,4 ед., а на удалении 2,9 ед.

С изменением численности микроорганизмов отмечаются качественные различия в составе физиолого-трофических групп исследуемых микроорганизмов, так численность аммонифицирующих микроорганизмов возрастала в 2 раза в почве, удалённой от шлакового отвала на 300 м, в сравнении с почвой в непосредственной близости к шлаковому отвалу. Низкий уровень микроорганизмов, использующих органические формы азота в почве в непосредственной близости к отвалу, обусловлен низкой гумусированностью почвы. Численность микроорганизмов, использующих минеральные формы азота, значительно превышает общую численность микроорганизмов, использующих органические формы азота в почве в непосредственной близости к шлаковому отвалу. В составе общей группы аммонификаторов доля бактерий составила 77–80 % в непосредственной близости к шлаковому отвалу, а доля актиномицетов составила всего лишь 20–23 %.

Деградация почв городов и территорий, подвергающихся различному мощному антропогенному воздействию, приводит к значительному изменению их микробиологической, а также ферментативной, активности. Установлено, что содержание свинца (200 мг/кг), цинка (500 мг/кг) и кадмия (5 мг/кг) в почве приводит к снижению активности дегидрогеназы и инвертазы, а их полная инактивация отмечается с увеличением в два раза указанных концентраций.

Доказано снижение активности каталазы, инвертазы, протеазы и уреазы в загрязнённой тяжелыми металлами почве по сравнению с незагрязнённой на 41, 64, 54 и 53% соответственно. С увеличением расстояния от автомагистрали активность ферментов почвы возрастает, однако она оставалась ниже установленных значений для фоновой почвы.

Таким образом, показано, что повышенная концентрация загрязняющих веществ вблизи автодорог, в том числе и изменение температуры воздуха в этих локализациях, приводит к снижению протеолитической, уреазной, каталазной и инвертазной активности почвы. Наиболее «чувствительными» ферментами к воздействию химических токсикантов оказались каталаза (окислительно-восстановительный), уреазы (гидролитические, азотный обмен) и инвертаза.

Отмечено изменение общей численности микроорганизмов и величины коэффициента минерализации в исследуемых урбанозёмах и светло-серых лесных почвах в зависимости от степени загрязнения почв тяжёлыми металлами. Оценку загрязнения почвенной среды тяжёлыми металлами определяют соотношением фактического содержания загрязнителя в почве и величиной фонового содержания (табл. 3).

Таблица 3.

Влияние суммарного накопления тяжёлых металлов (подв./вал. форм на общую численность микроорганизмов)

Удалённость от МКАД / отвал, м	Zc (вал.)	Zc (подв.)	Подвижность, % от ТМ _В						Общая численность, 10 ⁷ КОЕ/г	K _{мин}
	мг/кг		Cd	Pb	Zn	Cu	Cr	Ni		
Москва (МКАД, урбанозём)										
5	7,8	4,5	56,5	9,1	20,6	5,3	5,3	7,5	3,6	1,4
50	4,3	2,8	50,0	14,5	29,7	9,4	9,4	5,1	4,9	1,2
300	7,0	5,1	60,0	10,2	23,9	9,0	9,0	9,4	5,7	1,0
Фон	1,0	1,0	50,0	8,2	21,7	11,2	16,8	13,2	2,1	1,2
Орловская обл., д. Б. Думчино (шлаковый отвал, светло-серая лесная почва)										
20	43,1	9,6	45,3	6,9	2, 8	1,8	1,5	5,5	0,7	2,4
300	5.4	6.1	46.0	7.4	3.2	2.9	1.0	7.6	1.4	2.9

Исследование микробиологической активности и особенностей взаимодействия микроорганизмов и ТМ в урбанозёмах в условиях высокого антропогенного пресса автомобильных дорог на биоценозы является актуальным, так как микроорганизмы находятся у истоков трофической цепи поступления ТМ в высшие организмы.

Проведённые исследования показали, что с изменением величины суммарного коэффициента накопления изучаемых нами ТМ: кадмия, свинца, цинка, меди, хрома, никеля как валовых, так и подвижных форм в урбанозёмах и светло-серых лесных почвах отмечается закономерное изменение общей численности микроорганизмов и величины коэффициента минерализации, отражающего отношение бактерий, выросших на КАА к бактериям, растущим на МПА.

Высокая степень подвижности таких ТМ, как кадмий (45–60% от валового содержания), цинка, подвижность которого колеблется в пределах 2,8–29,7% от валового количества, и свинца, содержание подвижных форм этого элемента составило 6,9–14,5% от исходного валового содержания, оказала значительное влияние на изменение микробиоценоза исследуемых урбанозёмов. В урбанозёмах в непосредственной близости к автодороге количество микроорганизмов снижалось на 37,4%, а в урбанозёмах, расположенных на удалении 50 м от автодороги, снижение численности микроорганизмов достигало 14,1%. Воздействие шлакового отвала на количество микроорганизмов в гумусовом слое светло-серой лесной почвы проявлялось в увеличении общей численности микроорганизмов на большем удалении

исследуемого объекта от источника загрязнения. Так, в условиях высокого значения суммарного коэффициента загрязнения ТМ (валовое содержание) Zс 43,1 (20 м) и 5,4 (300 м) и их подвижных форм Zс 9,6 (20 м) и 6,1 (300 м) в светло-серой лесной антропогенно-изменённой почве на опытном участке вблизи (20 м) шлакового отвала, количество микроорганизмов составило $0,7 \times 10^7$ КОЕ/г и возрастало в 2,4 раза до $1,4 \times 10^7$ КОЕ/г в светло-серой лесной антропогенно-изменённой почве на опытном участке с большим удалением (300 м) от отвала.

Таким образом, в урбанозёмах и почвах, подверженных значительным антропогенным нагрузкам, изменяется характер метаболизма населяющих её живых организмов, и почва становится источником экологической опасности для растений и биоты. Одним из показателей оценки загрязнения почв является видовой состав почвенных беспозвоночных (табл. 4).

Таблица 4.

Видовой состав и численность микроартропод в светло-серой лесной среднесуглинистой почве на разном расстоянии от шлакового отвала

Группа, доминирующий вид	Экземпляр / м ²	
	150 м	450 м
1. КОЛЛЕМБОЛЫ (<i>Collembola</i> Lubbock)	1440	4644
1. <i>H. Manubralis</i>	542+52	1382+140
2. <i>Isotoma habitas</i>	-	1246+122
3. <i>Pseudosinella alba</i>	-	1197+110
2. КЛЕЩИ (<i>Acari</i>)	2131	6496
<i>Орибатиды</i> (<i>Oribatida</i>)	1744+172	3990+378
1. <i>Tectocephus velatus</i>	542+52	-
2. <i>Cosmochthonius lanatus</i>	400+41	-
3. <i>Puethoribates punctum</i>	542+52	3354+331
<i>Гамазовые</i> (<i>Gamasoidea</i>)	99	248
1. <i>Archoseus cetratus</i>	-	154+16
<i>Асигматические</i> (<i>Astigmata</i>)		
1. <i>Tyrophagus perniciosus</i>	155	1746
2. <i>Gyrrorus</i> sp.	61+7	-
		1661+159
Тромбидиформные	33	482
<i>Trombidipormes</i> sp.	-	300+31
Всего микроартропод	3758	13863

Как видно из данных таблицы, в непосредственной близости от шлакового отвала численность коллембол составляла 1440 экз/м², а на удалении на 450 м она возрастала в 3,2 раза. Среди коллембол удаленной локализации преобладали виды *H. Manubralis*, *Isotoma habitas* и *Pseudosinella alba*. При этом, установлено закономерное изменение численности и видового состава клещей в исследуемой почве, среди которых преобладали орибатиды (*Tectocephus velatus*, *Cosmochthonius lanatus*, *Puethoribates punctum*). В почвах территорий, расположенных на расстоянии 450 метров от отвала, численность клещей резко увеличивалась до 6496 экз/м² с большим видовым разнообразием их состава. Из группы орибатид обнаружено два вида клещей (*Tectocephus velatus*, *Puethoribates punctum*), увеличивалось количество гамазовых клещей вида *Archoseus cetratus*, асигматических клещей вида *Gyrrorus* sp. и тромбидиформных вида *Gyrrorus* sp. Общая численность микроартропод достигала 13863 экз/м² при удаленности на 450 метров от отвала и снижалась до 3758 экз/м² в непосредственной близости к отвалу.

Таким образом, численность и видовой состав микроартропод является показателем интенсивности загрязнения почв тяжёлыми металлами. Общая

численность крупных педобионтов, для которых почва является плотной средой, под многолетними травами составила 33,6+4,9 экземпляров на одну пробу. В их сообществе установлены представители трёх групп крупных почвенных животных (табл. 5).

Таблица 5.

Видовой состав и численность макрофауны (экз/м²) в светло-серой лесной среднесуглинистой почве на разном расстоянии от шлакового отвала

Вид	150 м	450 м
Большой красный выползок (<i>Lumbricus terrestris</i> Linnaeus)	0	0,3+0,2
Пашенный червь (<i>Lumbricidae</i>)	22+3	57+8
Малый красный червь (<i>Lumbricus rubellus</i> Hoffmeister)	0	0,6+0,2
Молодые черви	8+2	1,3+0,6
Всего червей (0-30 см)	30+4	59+8
Личинки б/п	4+1	5+1
Многоножки (<i>Myriapoda</i>)	0	0
Всего особей (0-30 см)	34+5	65+8

На расстоянии 150 м от шлакового отвала преобладали люмбрициды (дождевые черви). Среди личинок насекомых, занимавших в их группировке 13,1%, отсутствовали проволочники и многоножки. Ювенильные молодые формы занимали в сообществе 26,6%. В группировке дождевых червей преобладал пашенный червь – 73,9%. Большой красный выползок и малый красный выползок отсутствовали.

На территории, удалённостию 450 м от шлакового отвала, по сравнению с территорией непосредственной близости, общая численность макрофауны была в 2,5 раза больше. Численность всех группировок и видов люмбрицид также была выше. В комплексе беспозвоночных, как и в первом варианте исследования, преобладали дождевые черви. На их долю приходилось 99%. В группировке люмбрицид явно преобладал пашенный червь – 96,7%. На долю большого красного выползка приходилось 0,5%, малого же красного выползка – 1,06%. По профилю почвы представители макрофауны распределены неравномерно. Наиболее заселен верхний 10 см слой почвы. Обилие большинства других видов уменьшалась с глубиной и как у пашенного червя, незначительно колебалось по глубине – около 1 экз./на одну пробу. Население крупных почвенных беспозвоночных на территориях в непосредственной близости и удалённых от источника загрязнения представлено одними и теми же массовыми видами. Различия между этими вариантами исследования проявляются в численности группировок педобионтов и отдельных видов люмбрицид. Общая численность макрофауны вблизи отвала в два с половиной раза ниже, чем на участке с удалённостью 450 метров от отвала. В распределении большинства беспозвоночных по глубине проявляется тенденция к уменьшению их обилия в каждом из нижележащих горизонтов. Как известно, длительное техногенное воздействие приводит к пространственной неоднородности биотопов: по мере приближения к источнику загрязнения она усиливается за счёт появления микроучастков, непригодных для обитания (Stepanova, 2019). Неоднородность почвенного покрова в загрязненной зоне в окрестностях шлакового отвала алюминиевого литья вынуждает беспозвоночных мигрировать в более оптимальные местообитания, что приводит к концентрации их численности и повышению степени агрегирования в этих биотопах.

Уменьшение величины агрегирования общей биомассы мезофауны в окрестностях шлакового отвала связано с достоверным сокращением величины этого показателя у представителей большинства видов беспозвоночных. Такие изменения могут быть вызваны как прямым действием высоких доз загрязняющих веществ на

почвы, так и косвенным – изменением температурного режима и влажности почвы, её кислотно – щелочного режима, сокращения числа жертв.

Результаты проведённых исследований показали, что как в почвах города Москва, так и почвах, подверженных воздействию шлакового отвала, происходит изменение структуры микробоценозов и несмотря на отмеченные локальные различия между опытными точками, можно отметить тенденцию уменьшения коэффициента минерализации с увеличением удалённости опытного объекта от источника загрязнения, так коэффициент минерализации, установленный для почв вблизи шлакового отвала составил 1,9 ед., а при удалении от отвала на триста метров величина коэффициента снижалась до 1,5 ед.

Выводы

В настоящем исследовании была изучена общая концентрация токсичных тяжёлых металлов в поверхностных почвах урбанозёмов (г. Москва) и серых лесных почв (д. Б. Думчино). Были проанализированы соотношения изотопов тяжёлых металлов для выявления основного источника поступления в почвы поверхностного грунта. Средние концентрации исследуемых тяжёлых металлов были выше их соответствующих базовых уровней. Доказано, что с увеличением интенсивности накопления тяжёлых металлов как в урбанозёмах, так и светло-серой лесной антропогенно-изменённой почве отмечается закономерное снижение общей численности микробоценоза и повышение коэффициента минерализации. В почвах, которые регулярно подвергаются значительным антропогенным нагрузкам, изменяется структура микробного сообщества, характер метаболизма населяющих её живых организмов, и почва становится источником экологической опасности для растений и микробиоты.

Коэффициент корреляции и кластерный анализ показали, что отдельные типы токсичных металлов из антропогенных источников могут быть выделены. Показатели изменения видовой структуры микробных сообществ (общее богатство, разнообразие) и изменений популяций для видов, развивающихся в определенных экологических условиях, и видов возможных аккумуляторов токсикантов являются объективной оценкой результатов почвенно-биологического мониторинга в зонах экстремальных техногенных изменений. Положительная динамика содержания тяжёлых металлов в почвах тесно связана с движением транспортных средств, с возрастающей урбанизацией, поступлением шлаковых отходов в почву (Stepanova, 2019). Исследованиями доказано, что источник загрязнения оказывает значительное влияние на видовой состав и численность микроартропод в слое 0–20 см светло-серой лесной среднесуглинистой почвы.

Список литературы

1. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. – М.: МГУ, 1970. – 488 с.
2. Асеева И.В., Бабьева И.П., Бызов В.А., Гусев В.С., Добровольская Т.Г., Звягинцев Д.Г., Зенова Г.М., Кожевин П.А., Кураков А.В., Лысак Л.В., Марфенина О.Е., Мирчинк Т.Г., Полянская Л.М., Паников Л.С., Скворцова И.Н., Степанов А.Л., Умаров М.М. Методы почвенной микробиологии и биохимии. – М.: МГУ, 1991. – 304 с.
3. Балабина И.П. Динамика популяций почвенных коллембол при гербицидном загрязнении среды обитания. Автореф. дисс. канд. биол. наук. – Москва, 1990. – 19 с.

4. Бызова Ю.Б., Гиляров М.С., Дунгер В., Захарова А.А., Козловская Л.С., Корганова Г.А., Мазанцева Г.П., Мелецис В.П., Прассе И., Пузаченко Ю.Г., Рыбалов Л.Б., Стриганова Б.Р. Количественные методы в почвенной зоологии. – М.: Наука, 1987. – 288 с.
5. Иващенко К.В., Ананьева Н.Д., Васенев В.И., Кудеяров В.Н., Валентини Р. Биомасса и дыхательная активность почвенных микроорганизмов в антропогенно-измененных экосистемах (Московская область) // Почвоведение. – 2014. – № 9. – С. 1077.
6. Писарева А.В. Экологическая оценка состояния тяжёлых металлов и микробиоты в почвах техногенно-трансформированных земель: Автореф. дисс. канд. биол. наук. – Орёл, 2017. – 23 с.
7. Степанова Л.П., Яковлева Е.В., Коренькова Е.А., Писарева А.В. Агроэкономическая оценка восстановления плодородия антропогенно нарушенных и рекультивируемых серых лесных почв // Учёные записки Орловского государственного университета. – 2015. – № 3. – С. 256–261.
8. Шеин Е.В., Зинченко С.И., Банников М.В., Мазиров М.А., Поздняков А.И. Методы оценки и прогноза агрофизического состояния почв. – Владимир: ГНУ Владимир. НИИСХ, 2009. – 105 с.
9. Яковлева Е.В. Экологическая оценка факторов деградации серых лесных почв и пути их оптимизации: Автореф. дисс. канд. с-х наук. – Орел, 2006. – 23 с.
10. Ahmadipour F., Bahramifar N., Ghasempouri S.M. Fractionation and mobility of cadmium and lead in soils of Amol area in Iran, using the modified BCR sequential extraction method // Chem Spec Bioavailab. – 2014. – № 26. – p. 31–36.
11. Arkharov I.A., Simakova E.N., Navasardyan E.S. Landfill Gas as Feedstock for Energy and Industrial Processes // Chemical and Petroleum Engineering. – 2016. – Vol.52. – №7–8. – pp. 547–551.
12. Bayas J.C., See L., Fritz S., Sturn T., Perger C., Dürauer M., Karner M., Moorthy I., Schepaschenko D., Domian D., McCallum I. Crowdsourcing in-situ data on land cover and land use using gamification and mobile technology // Remote Sensing. – 2016. – Vol. 8. – №11. – p. 905.
13. Bednova O.V., Kuznetsov V.A., Tarasova N.P. Eutrophication of an Urban Forest Ecosystem: Causes and Effects // Doklady Earth Sciences. – 2018. – Vol. 478. – №1. – pp. 124–128.
14. Bednova O.V., Kuznetsov V.A., Tarasova N.P. Transformation of urban forest ecosystems: Indication and integral assessment // Doklady Earth Sciences. – 2015. – V.463. – №2. – pp. 868–872.
15. Bin H.E., Yun Z.J., Shi J.B., Jiang G.B. Research progress of heavy metal pollution in China: Sources, analytical methods, status, and toxicity // Chinese Science Bulletin. – 2013. – № 58. – p. 134–140.
16. Epelde L., Becerril, J.M., Barrutia, O., Gonzalez-Oreja, J.A., Garbisu, C. Interactions between plant and rhizosphere microbial communities in a metalliferous soil // Environmental Pollution. – 2009. – № 158. – p. 1576–1583.
17. Ksenofontov B.S., Antonova E.S., Ivanov M.V., Kozodaev A.S., Taranov R.A. The influence of oil contaminated soil on the quality of surface waste water // Water Practice and Technology. – 2015. – Vol. 10. – № 4. – pp. 814–822.
18. Ksenofontov B.S., Butorova I.A., Kozodaev A.S., Afonin A.V., Taranov R.A. Problems of toxicity of ash and slag waste // Ecology and Industry of Russia. – 2017. – Vol.21. – №2. – pp. 4–9.
19. Ksenofontov B.S., Goncharenko E.E. Intensification of Purification of Surface Sewage by use a Bioflocculant // Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences. – 2016. – № 3. – pp. 118–127.

20. Ksenofontov B.S., Kozodaev A.S., Taranov R.A. The Problems of Rare Earth Metals Extraction from Coal Ash in the Form of Solvents and its Concentrating // Ecology and Industry of Russia. – 2016. – Vol. 20. – №4. – pp. 12–15.
21. Nabulo G., Oryem-Origa H., Diamond M. Assessment of lead, cadmium, and zinc contamination of roadside soils, surface films, and vegetables in Kampala City, Uganda // Environ Res. – 2006. – № 101. – p. 42–52.
22. Singh R.P., Agrawal M. Variations in heavy metal accumulation, growth and yield of rice plants grown at different sewage sludge amendment rates // Ecotoxicology and Environmental Safety. – 2010. – № 73. – p. 632–641.
23. Stepanova L.P., Yakovleva E.V., Pisareva A.V. Spatio-temporal dynamics of soil geochemical anomalies in the zone of impact of slag residuals // Ecology and Industry of Russia. – 2019. – Vol. 23. – №3. – p. 44–48.

ASSESSMENT OF CHANGE IN SOIL BIOTA UNDER CONDITIONS OF INFLUENCE OF DIFFERENT LEVELS OF POLLUTANTS

Stepanova L.P.¹, Pisareva A.V.², Yakovleva E.V.¹, Raskatov V.A.³

¹Orel State Agrarian University, Orel, Russian Federation

e-mail: step.lp@yandex.ru, elenavalerevna79@ya.ru

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

e-mail: pavpav.06@mail.ru

⁴Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy,

Moscow, Russian Federation

e-mail: raskatovv@list.ru

Ecological and microbiological characteristics of a soil cover in areas of extreme anthropogenic impacts. Analyzed the dynamics of changes in the number of microorganisms in the experimental points of the soil at different distances from the slag heap. Was assessed according to the degree of soil contamination in species composition of soil invertebrates. A comparison of the total number of microorganisms at experimental sites at different distances from the slag heap in D. B. Domino data on the total number of microorganisms in urbanozem. A comparative analysis of the structure of ecological - trophic groups of micro- and mesofauna anthropogenically disturbed soils.

Keywords: microorganisms; urban ecosystem; the abundance and biomass of invertebrates; structure of soil and biotic communities; heavy metals.

Поступила в редакцию 02.02.2018 г.