

УДК 631.879.2:633.16

ВЛИЯНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ВОД ПОЛИГОНА ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ НА БИОМАССУ И ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ РАСТЕНИЙ ЯЧМЕНЯ

© 2020 г. С. Е. Витковская^{1,2,*}, Ю. О. Шилова¹

¹ Российский государственный гидрометеорологический университет
192007 Санкт-Петербург, ул. Воронежская, 79, Россия

² Агрофизический научно-исследовательский институт
195220 Санкт-Петербурге, Гражданский просп., 14, Россия

*E-mail: s.vitkovskaya@mail.ru

Поступила в редакцию 18.03.2020 г.

После доработки 01.05.2020 г.

Принята к публикации 10.08.2020 г.

В модельном эксперименте изучено влияние возрастающих доз фильтрационных вод (ФВ) полигона твердых коммунальных отходов на биомассу растений ячменя и распределение азота и тяжелых металлов (ТМ) (Cr, Cd, Li, Pb, Zn) в системе почва–растение. Зависимость биомассы растений в интервале доз ФВ 0–260 мл/кг почвы представлена кривыми с максимумом. Содержание N в надземной части растений линейно возрастало в интервале тестируемых доз ФВ. Наблюдали тенденцию увеличения содержания ТМ в почве. Переход ТМ из почвы в растения зависел от дозы ФВ, степени окультуренности почвы и свойств химических элементов. Содержание всех тестируемых ТМ в корнях существенно превысило содержание в надземной части растений.

Ключевые слова: фильтрационные воды, полигон твердых коммунальных отходов, биомасса растений, элементный состав растений, ячмень.

DOI: 10.31857/S0002188120110125

ВВЕДЕНИЕ

Основным фактором негативного воздействия объектов размещения твердых коммунальных отходов (ТКО) на окружающую среду является инфильтрация из тела полигона фильтрационных вод (ФВ), образование которых является следствием взаимодействия влаги атмосферных осадков и реакционно-способных (потенциально разлагаемых) компонентов отходов [1, 2]. Тело полигона генерирует ФВ на всех этапах жизненного цикла. Объемы и состав ФВ динамичны во времени, зависят от условий атмосферного увлажнения и стадии трансформации отходов.

Фильтрат представляет собой темноокрашенный раствор, характеризующийся высоким содержанием органического вещества, макро- и микроэлементов. По некоторым оценкам, уровни загрязнений ФВ тяжелыми металлами (ТМ) в 5–20 раз превышают показатели, характерные для бытовых сточных вод. Фильтрат остается токсичным даже после 4-кратного (по некоторым данным – и 100-кратного) разбавления [1–4].

Полиэлементный состав ФВ полигонов ТКО позволяет рассматривать их как источник питания для почвенной микрофлоры и растений на откосах фильтрационных канав, прудов-отстойников и в случае поступления на прилегающие к ним территории. Влияние ФВ на рост и развитие растений зависит от генетически обусловленных особенностей растений, условий их контакта с ФВ, соотношения ФВ : почва, содержания фитотоксичных при определенных уровнях концентраций компонентов. Информации о влиянии ФВ на биомассу и элементный состав растений крайне мало. В то же время, состояние растительного покрова на территории полигона в период эксплуатации является показателем его экологического состояния, а при проведении рекультивации по сельскохозяйственному или санитарно-гигиеническому направлениям характеризует эффективность биологического этапа рекультивации.

Исследование видового состава растений на полигоне ТБО в Пермском крае показало, что в прибрежной зоне и на террасах прудов-отстойников, а также в толще фильтрата наблюдается мас-

Таблица 1. Химический состав фильтрационных вод [2]

Показатель	Содержание, мг/дм ³	ПДК*
Аммоний-ион	>300 (930)	1.5 (по азоту)
Азот аммонийный	720	2.0
Нитрат-ион	21	45
Нитрит-ион	0.075	3.3
Фосфор общий	4.2	0.2
Магний	1100	50
Сурьма	<0.005	0.05
Ртуть	0.0006	0.0005
Мышьяк	0.0071	0.05
Медь	0.052	1
Хром	0.2	0.3
Железо	11	0.3
Кадмий	0.015	0.001
Свинец	0.016	0.03
Литий	0.02	0.03
Барий	0.004	0.1
Сухой остаток	10000	1000 (1500)
Прокаленный остаток	7 500	—
Органическое вещество	2500	—
pH	8.3	8.5

*Для водоемов хозяйственно-питьевого назначения.

совое развитие растительных сообществ (осот желтый, осот розовый, ежа сборная, клевер красный, мятлик луговой, пустырник пятилопастный, ива козья, ива прутовидная, лопух паутинистый, крапива двудомная, ромашка непахучая, пырей бескорневищный, пырей ползучий, сурепка обыкновенная, одуванчик лекарственный, частуха подорожниковая, борщевик Сосновского, кипрей узколистный и др.). Отклонения в развитии отдельных тканей или органов растений, а также карликовость, гигантизм, общее угнетение и иные аномалии по фенотипу не выявлены [5]. Исследования, проведенные нами на территории полигона ТБО в Ленинградской обл., подтвердили, что растительный покров вблизи фильтрационных канав характеризуется значительным видовым разнообразием, а непосредственно в канавах произрастает рогоз узколистный (*Typha angustifolia* L.). Экспериментально установлено [5], что наибольшая степень резистентности в условиях воздействия фильтрационных вод полигона ТБО наблюдается у растений, относящихся к группе гидрофитов: частухи подорожничко-

вой, рогоза узколистного, камыша озерного, элодеи канадской.

Цель работы – в условиях модельного эксперимента изучить влияние возрастающих доз фильтрационных вод на биомассу растений ячменя и распределение ТМ (Cr, Cd, Li, Zn) и азота в системе почва–растение в зависимости от уровня окультуренности дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Фильтрат для закладки модельного эксперимента был отобран в июле 2017 г. из обводной замкнутой траншеи для сбора ФВ на полигоне “Профспецтранс”, расположенного в Волосовском р-не Ленинградской обл. [2]. Химический состав фильтрата представлен в табл. 1.

Эксперимент был заложен в день отбора ФВ в полиэтиленовых сосудах объемом 900 мл на средне-, хорошо- и высокоокультуренной дерново-подзолистых легкосуглинистых почвах, отобранных в Меньковском филиале Агрофизического института (табл. 2). Масса почвы в сосуде – 0.96 кг, повторность трехкратная. Схема опыта включала 18 вариантов (по 6 вариантов для каждой разновидности почвы): 1 – контроль (без фильтрата), 2 – 52 мл ФВ/кг почвы, 3 – 104 мл ФВ/кг почвы, 4 – 156 мл ФВ/кг почвы, 5 – 208 мл ФВ/кг почвы, 6 – 260 мл ФВ/кг почвы. Фильтрат вносили в почву до набивки сосудов, методом полива. В пересчете на 1 га почвы доза внесения ФВ в вариантах 2–6 составляла 156, 312, 468, 624 и 780 тыс. л соответственно.

Растения ячменя сорта Ленинградский (16 шт./сосуд) выращивали в течение 25 сут. Полив проводили дистиллированной водой. Почвенные пробы отбирали из каждого сосуда в день уборки опыта. Определяли сырую биомассу растений. Корневую систему промывали проточной и дистиллированной водой.

В объединенных по повторностям почвенных пробах определяли валовое содержание Cr, Li, Zn, Cd [6], содержание N-NO₃ [7] и N-NH₄ [8], pH – ионоселективным методом. Биомассу растений для анализа также объединяли по всем повторностям. Валовое содержание ТМ в растительных пробах определяли согласно [9]: методика автоклавной пробоподготовки с последующим определением методами атомно-абсорбционной спектrophотометрии (Cd, Pb, Zn, Cr), атомно-эмиссионной спектrophотометрии (Li). Содержание азота в наземной части растений устанавливали согласно [10]. Повторность измерений трехкрат-

Таблица 2. Агрохимическая характеристика почв опыта [15]

Вариант	рН _{KCl}	N, %	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Органическое вещество, %
			мг/кг		1/2 ммоль/100 г		
Среднеокультуренная почва							
3	5.1	0.11	134	75	4.2	2.3	3.1
Хорошоокультуренная почва							
3	5.8	0.16	215	132	5.2	3.4	3.8
Высокоокультуренная почва							
3	6.1	0.26	242	155	7.4	3.4	5.4

ная. Математическую обработку данных проводили в программе ORIGIN 7,5.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние возрастающих доз ФВ на величину рН, содержание N-NO₃, N-NH₄ и ТМ в почве наблюдали через 28 сут после внесения ФВ в почву (табл. 3). Установлено, что внесение раствора ФВ с величиной рН 8.3 не привело к существенному изменению реакции почвы и превышению ПДК содержания нитратов (130 мг/кг почвы). В средне- и хорошоокультуренной почвах при внесении ФВ в дозе 52 мл/кг содержание N-NO₃ возросло по отношению к контролю в 2.9 и 3.1 раза соответственно, дальнейшее увеличение дозы ФВ не оказало существенного влияния на данный показатель. Линейную зависимость N-NO₃ = f (доза ФВ) наблюдали только в хорошоокультуренной почве ($r = 0.852$). В интервале доз ФВ 50–250 мл/кг коэффициенты вариации (v , %), характеризующие неоднородность содержания N-NO₃ в средне-, хорошо- и высокоокультуренной почвах, составили 2, 14 и 7% соответственно. Согласно общепринятому положению [11], участок считается однородным по агрохимическому показателю, если величина коэффициента вариации не превышает 25%.

Содержание N-NH₄ в средне-, хорошо- и высокоокультуренной почвах через 28 сут взаимодействия ФВ с почвой варьировалось в пределах 74 ± 20 , 84 ± 12 и 84 ± 10 мг/кг соответственно и не зависело от содержания N-NO₃. Коэффициент вариации не превысил 12–27%.

Внесение ФВ привело к некоторому увеличению содержания ТМ в почве, но даже максимальная доза (780 тыс. л/га) не создала предпосылок для достижения и/или превышения гигиенических нормативов для почв по тестируемым показателям. Ранее расчетным методом было установ-

лено [2], что загрязнение почвенного покрова ТМ (превышение ПДК) возможно только при длительном контакте фильтрационных вод с почвой, например, в пределах фильтрационной канавы, а также в отсутствии сооружений для сбора и отведения ФВ (несанкционированные свалки).

Наблюдала тенденцию к увеличению содержания Li в почве опыта: при внесении ФВ в дозе 52 мл/кг почвы содержание элемента возросло на 17, 8 и 8% в средне-, хорошо- и высокоокультуренной почвах соответственно. В хорошо- и высокоокультуренной почве зависимость Li (почва) = f (доза ФВ) характеризовалась коэффициентами корреляции $r = 0.680$ и 0.732 соответственно, при критической величине $r = 0.811$ на 5%-ном уровне значимости. Максимальное увеличение содержания Li в почве по отношению к контролю составило 37% (вариант 4, среднеокультуренная почва). Содержание Li в почве не нормируется. Согласно [12], среднее содержание Li меняется от 1.2 мг/кг в легких органических почвах до 98 мг/кг – в аллювиальных.

В тестируемом интервале доз ФВ (0–260 мл/кг) содержание Cd в почве варьировалось в пределах 0.023 ± 0.004 , 0.02 ± 0.005 и 0.029 ± 0.012 в средне-, хорошо- и высокоокультуренной почвах соответственно, что существенно меньше ОДК. Неоднородность содержания Cd в почве в вариантах 1–6 можно оценить по коэффициентам вариации, величины которых составили 17, 25 и 41% соответственно в средне-, хорошо- и высокоокультуренной почвах. Исходя из этого критерия, можно предположить, что при контакте ФВ с почвой происходило увеличение содержания Cd.

Наблюдала тенденцию к увеличению содержания Cr в почве: в интервале доз 0–260 мл ФВ/кг зависимость Cr (почва) = f (доза ФВ) по линейной модели характеризовалась коэффициентами корреляции 0.493, 0.860 и 0.686 в средне-, хорошо- и высокоокультуренной почвах соответственно. Коэффициенты вариации, характеризующие не-

Таблица 3. Влияние возрастающих доз фильтрационных вод на величину рН_{KCl}, содержание азота и тяжелых металлов в почве, мг/кг

Вариант	рН _{KCl}	рН _{H₂O}	N-NH ₄	N-NO ₃	Cr	Cd	Li	Zn
Среднеокультуренная почва								
1. Контроль	5.7	6.8	100	18	4.0	0.02	1.8	13.6
2. 52 мл ФВ/кг	5.5	6.6	60	52	4.3	0.02	2.1	15.5
3. 104 мл ФВ/кг	5.5	6.5	54	51	5.0	0.03	2.1	15.3
4. 156 мл ФВ/кг	5.5	6.5	100	53	6.2	0.025	2.4	18.3
5. 208 мл ФВ/кг	5.6	6.7	67	53	4.9	0.025	2.1	15.3
6. 260 мл ФВ/кг	5.4	6.6	64	53	4.8	0.02	1.9	15.2
Хорошоокультуренная почва								
1. Контроль	5.3	6.6	94	11	4.0	0.02	1.2	18.6
2. 52 мл ФВ/кг	5.7	6.6	100	34	3.9	0.025	1.3	19.8
3. 104 мл ФВ/кг	5.8	6.6	67	45	4.1	0.025	1.4	20.7
4. 156 мл ФВ/кг	5.5	6.5	80	45	4.8	0.01	1.6	21.5
5. 208 мл ФВ/кг	5.2	6.3	87	46	4.9	0.015	1.5	20.4
6. 260 мл ФВ/кг	5.6	6.7	77	50	4.7	0.015	1.4	20.4
Высокоокультуренная почва								
1. Контроль	5.8	6.9	80	42	4.1	0.03	1.3	18.1
2. 52 мл ФВ/кг	5.1	6.1	94	44	4.8	0.025	1.4	19.7
3. 104 мл ФВ/кг	5.5	6.8	80	41	4.5	0.04	1.5	18.5
4. 156 мл ФВ/кг	5.5	6.8	74	45	5.7	0.045	1.8	21.9
5. 208 мл ФВ/кг	5.6	6.8	74	48	5.1	0.02	1.6	20.0
6. 260 мл ФВ/кг	5.4	6.8	97	46	5.1	0.015	1.6	21.4
ОДК*	—	—	—	—	—	0.5	—	55
Фоновое содержание валовых форм** [16]	—	—	—	—	—	0.05	—	28

*ОДК для песчаных и супесчаных почв, **для дерново-подзолистых песчаных и супесчаных почв.

однородность содержания Cr в почве в средне-хорошо- и высокоокультуренной почвах составили соответственно 16, 9 и 12%.

Содержание Zn в большей степени зависело от уровня окультуренности почвы, чем от внесения ФВ (табл. 3): в средне-, хорошо- и высокоокультуренной почвах оно варьировалось в пределах 16 ± 2 , 18 ± 4 и 20 ± 2 мг/кг соответственно; зависимости Zn (почва) = f (доза ФВ) по линейной модели характеризовались коэффициентами корреляции 0.365, 0.505 и 0.733.

Зависимость величины биомассы растений ячменя от дозы ФВ представлена кривыми с максимумом (рис. 1). На среднеокультуренной почве биомасса растений возрастала в интервале доз 0–156 мл ФВ/кг почвы, на хорошо- и высокоокультуренной почвах – в интервале доз 0–104 мл ФВ/кг. Дальнейшее увеличение дозы ФВ повлекло за собой снижение биомассы растений, что, вероятно, было обусловлено проявлением фито-

токсического эффекта. Наибольшая прибавка сырой биомассы растений ячменя составила 34 и 42% соответственно на среднеокультуренной почве в вариантах 3 и 4.

Установлено, что содержание азота в надземной части растений ячменя линейно возрастало в интервале доз 0–260 мл ФВ/кг почвы: на средне-, хорошо- и высокоокультуренной почвах коэффициенты корреляции составили соответственно 0.774, 0.969 и 0.938 (критическая величина $r = 0.811$ на 5%-ном уровне значимости) (рис. 2). При внесении максимальной дозы ФВ (вариант 6), содержание азота в надземной части растений на средне-, хорошо- и высокоокультуренной почвах возросло по отношению к контролю на 19, 18 и 11% соответственно.

Влияние возрастающих доз ФВ на содержание ТМ в надземной части и корнях растений ячменя представлено в табл. 4, 5. Переход ТМ из почвы в растения зависел от дозы ФВ, степени окульту-

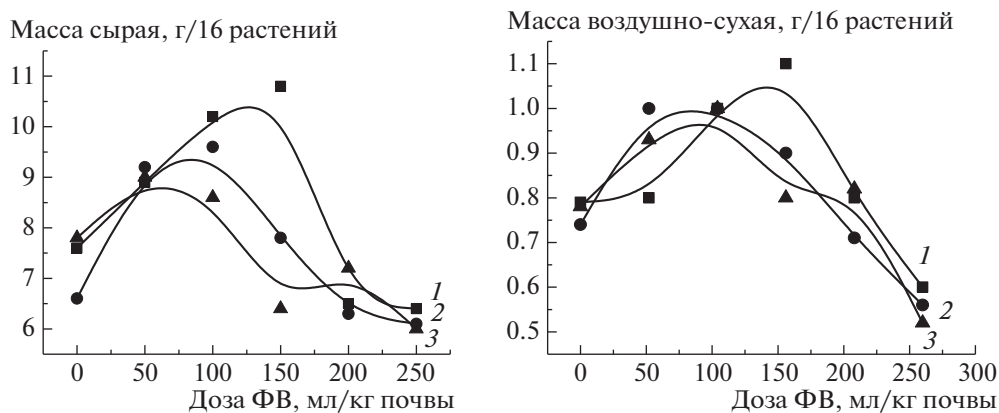


Рис. 1. Зависимость биомассы растений ячменя от дозы ФВ: 1, 2, 3 – средне-, хорошо- и высококультуренная почва.

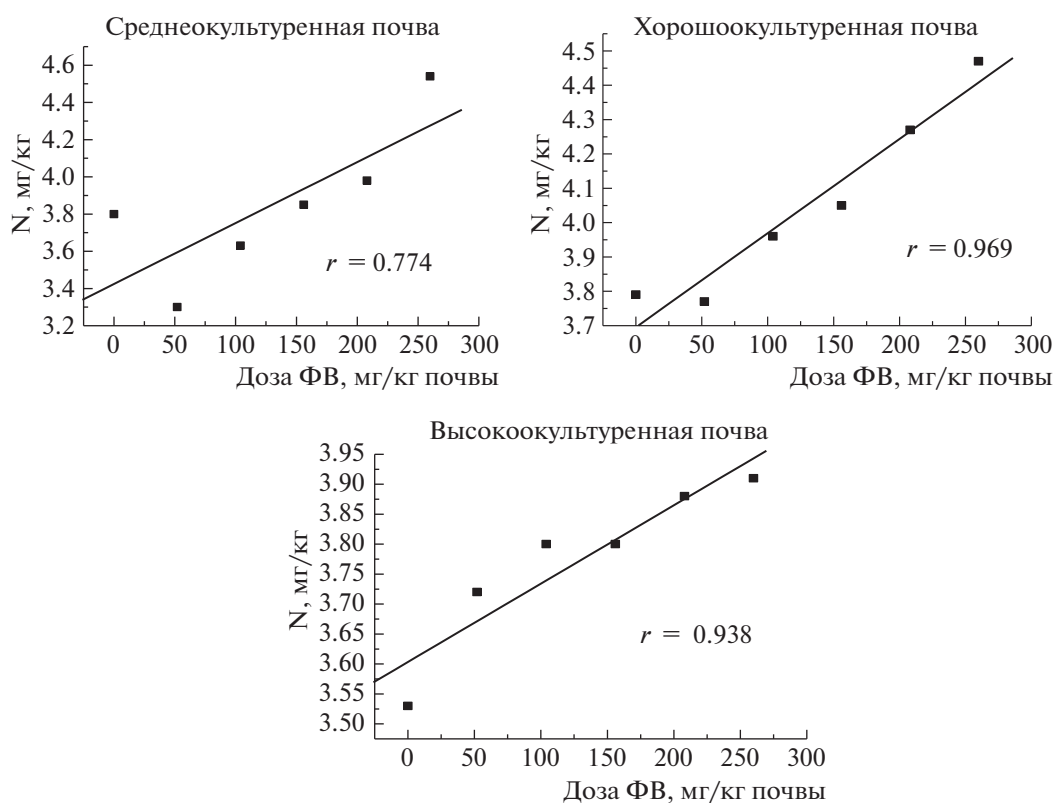


Рис. 2. Зависимость содержания азота в надземной части растений ячменя от дозы ФВ.

ренности почвы и свойств химических элементов. Содержание тестированных ТМ (за исключением Pb) в корнях существенно превысило их содержание в надземной части растений.

В интервале доз 52–260 мл ФВ/кг на средне-, хорошо- и высококультуренной почвах зависимость содержания Li в надземной части растений от дозы характеризовалась коэффициентами корреляции $r = 0.978$, 0.510 и 0.868 соответственно. По данным [12], распределение Li в системе кор-

ни—надземная часть существенно зависит от видовых особенностей растений. Среднее в вариантах содержание Li в корнях ячменя (6 ± 2) превысило данный показатель для надземной части растений (0.4 ± 0.2) в 15 раз. На высококультуренной почве содержание Li в корнях линейно снижалось ($r = -0.973$) в указанном выше интервале доз. Известно [13, 14], что одним из основных источников Li в ФВ полигонов ТКО являются отработанные литиевые батареи: химические источ-

Таблица 4. Влияние возрастающих доз фильтрационных вод на содержание тяжелых металлов в надземной части растений ячменя, мг/кг а.с.в.

Вариант	Cr	Cd	Li	Pb	Zn
Среднеокультуренная почва					
1. Контроль	9.6	0.114	0.55	11.2	43
2. 52 мл ФВ/кг	5.2	0.056	0.28	3.0	28
3. 104 мл ФВ/кг	6.1	0.166	0.29	2.3	29
4. 156 мл ФВ/кг	6.4	0.177	0.34	4.5	27
5. 208 мл ФВ/кг	5.7	0.083	0.41	2.5	27
6. 260 мл ФВ/кг	4.2	0.049	0.45	2.4	27
Хорошоокультуренная почва					
1. Контроль	6.2	0.014	0.35	6.9	28
2. 52 мл ФВ/кг	6.0	0.047	0.31	4.2	31
3. 104 мл ФВ/кг	6.1	0.107	0.32	4.2	33
4. 156 мл ФВ/кг	6.7	0.116	0.36	4.8	32
5. 208 мл ФВ/кг	24.9	0.781	1.35	31.6	49
6. 260 мл ФВ/кг	2.6	0.321	0.51	2.6	36
Высокоокультуренная почва					
1. Контроль	2.3	0.052	0.39	6.8	29
2. 52 мл ФВ/кг	0.7	0.028	0.32	5.0	30
3. 104 мл ФВ/кг	2.7	0.076	0.34	4.8	29
4. 156 мл ФВ/кг	2.0	0.114	0.43	4.6	31
5. 208 мл ФВ/кг	1.4	0.108	0.38	5.5	30
6. 260 мл ФВ/кг	2.7	0.183	0.52	7.6	40
МДУ для грубых и сочных кормов, мг/кг [17]	0.5	0.3	—	5.0	50

ники тока, в которых в качестве анода используется металлический литий — один из самых химически активных элементов.

Влияние возрастающих доз ФВ на содержание Cd в растениях ячменя существенно зависело от уровня окультуренности почвы. Максимальное увеличение содержания Cd в надземной части растений по отношению к контролю на хорошоокультуренной почве составило 56 раз (вариант 5), на высокоокультуренной почве — 3.5 раза. Отношение средних содержаний элемента в вариантах в корнях и надземной части растений варьировалось в пределах 5–10. На среднеокультуренной почве содержание Cd в надземной части и корнях растений не зависело от дозы ФВ (табл. 4). Зависимость $Cd = f(\text{доза ФВ})$ на средне- и высокоокультуренной почвах характеризовалась для надземной части коэффициентами корреляции $r = 0.690$ и 0.911 соответственно, для корней — 0.625 и 0.923 соответственно (при критической величине $r = 0.811$ на 5%-ном уровне значимости).

Таблица 5. Влияние возрастающих доз фильтрационных вод на содержание тяжелых металлов в корнях растений ячменя, мг/кг а.с.в.

Вариант	Cr	Cd	Li	Pb	Zn
Среднеокультуренная почва					
1. Контроль	7.3	0.93	6.5	10.5	46.9
2. 52 мл ФВ/кг	9.6	1.29	10.7	10.2	49.3
3. 104 мл ФВ/кг	16.9	1.97	6.2	9.9	37.7
4. 156 мл ФВ/кг	10.9	1.58	5.8	10.8	43.1
5. 208 мл ФВ/кг	12.5	1.24	9.7	7.7	54.5
6. 260 мл ФВ/кг	15.7	1.20	10.7	11.0	50.2
Хорошоокультуренная почва					
1. Контроль	12.3	0.78	7.2	8.0	44.8
2. 52 мл ФВ/кг	8.2	1.05	5.4	1.4	50.8
3. 104 мл ФВ/кг	8.3	1.14	5.1	2.0	51.5
4. 156 мл ФВ/кг	9.6	1.6	3.7	6.9	56.3
5. 208 мл ФВ/кг	16.2	1.24	4.4	5.0	345
6. 260 мл ФВ/кг	18.8	1.2	7.3	12.2	200
Высокоокультуренная почва					
1. Контроль	11.4	0.64	5.7	5.9	46.2
2. 52 мл ФВ/кг	9.6	0.83	6.4	0.87	39.2
3. 104 мл ФВ/кг	8.6	0.99	5.8	0.41	65.9
4. 156 мл ФВ/кг	28.5	0.86	4.6	0.24	45.1
5. 208 мл ФВ/кг	12.2	1.1	4.0	1.8	42.5
6. 260 мл ФВ/кг	10.1	1.22	3.8	9.6	52.3

Содержание Cr в надземной части растений ячменя существенно превысило МДУ для грубых и сочных кормов, снижалось с увеличением уровня окультуренности почвы и не зависело от дозы ФВ (табл. 4). На средне- и хорошоокультуренной почвах в интервале доз 0–260 мл ФВ/кг наблюдали тенденцию к линейному увеличению содержания Cr в корнях растений ($r = 0.653$ и 0.699 соответственно).

По отношению к содержанию Zn в надземной части растений в интервале доз 0–260 мл ФВ/кг почвы наблюдали следующие тенденции: на среднеокультуренной почве содержание элемента снижалось ($r = -0.716$), на хорошо- и высокоокультуренной почвах — возрастало и характеризовалось коэффициентами корреляции $r = 0.671$ и 0.720 соответственно. При внесении 52 мл ФВ/кг в среднеокультуренную почву содержание Zn в надземной части растений ячменя снизилось в 1.5 раза по отношению к контролю (табл. 4). В корнях растений содержание Zn на средне- и высокоокультуренной почвах не зависело от дозы ФВ, на хорошоокультуренной почве зависимость $C_{Zn(\text{корни})} = f(\text{доза ФВ})$ характеризовалась коэффициентом корреляции $r = 0.720$ (табл. 5).

В интервале доз 0–260 мл ФВ/кг почвы наблюдали тенденцию к снижению содержания Pb в надземной части растений ячменя на средне- и хорошоокультуренной почвах ($r = -0.653$ и -0.832 соответственно). Превышение МДУ Pb выявлено в 33% проб. Содержание Pb в корнях растений снижалось с возрастанием уровня окультуренности почвы и не зависело от дозы ФВ (табл. 5).

Следует отметить, что ТМ в ФВ присутствуют в основном в составе органо-минеральных комплексов, неоднородность распределения которых в субстрате определяет неоднородность поступления химических элементов в почву с одинаковым количеством фильтрата, что частично объясняет различия в зависимостях доза–ответ, которые наблюдали для почв разного уровня окультуренности.

ВЫВОДЫ

1. Полиэлементный состав фильтрационных вод (ФВ) полигонов твердых коммунальных отходов позволил рассматривать их как источник питания для почвенной микрофлоры и растений на откосах фильтрационных канав, прудов-отстойников и в случае поступления на прилегающие к ним территории.

2. Влияние ФВ на рост и развитие растений зависело от генетически обусловленных особенностей растений, условий их контакта с ФВ, соотношения ФВ : почва.

3. Установлено, что внесение ФВ в интервале доз 52–260 мл/кг почвы не привело к существенному изменению реакции дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы и превышению ПДК содержания N-NO₃ (130 мг/кг почвы).

4. Внесение ФВ привело к некоторому увеличению содержания ТМ в почве, но даже их максимальная доза (780 тыс. л/га) не создала предпосылок для достижения и/или превышения гигиенических нормативов для почв по тестируемым показателям. Увеличение содержания ТМ в почве при внесении тестируемых доз ФВ следует рассматривать как тенденцию, поскольку количество химических элементов (мг/кг), поступившее в почву с ФВ было мало по сравнению с их фоновым содержанием в почве.

5. Биомасса растений ячменя на среднеокультуренной почве возрастала в интервале доз 0–156 мл ФВ/кг почвы, на хорошо- и высокоокультуренной почвах – в интервале доз 0–104 мл ФВ/кг. Дальнейшее увеличение доз ФВ повлекло за собой снижение биомассы растений, что, вероятно, было обусловлено проявлением фитотоксического эффекта.

6. Содержание азота в надземной части растений ячменя линейно возрастало в интервале доз 0–260 мл ФВ/кг почвы: на средне-, хорошо- и высокоокультуренной почвах коэффициенты корреляции составили соответственно 0.774, 0.969 и 0.938 (критическая величина $r = 0.811$ на 5%-ном уровне значимости).

7. Переход ТМ (Cr, Cd, Li, Pb, Zn) из почвы в растения зависел от дозы ФВ, степени окультуренности почвы и свойств химических элементов. Содержание всех тестируемых ТМ в корнях существенно превысило содержание в надземной части растений. Содержание Cr в надземной части растений ячменя существенно превысило МДУ для грубых и сочных кормов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Витковская С.Е.* Твердые бытовые отходы: антропогенное звено биологического круговорота. СПб.: АФИ, 2012. 132 с.
2. *Витковская С.Е., Шилова Ю.О., Малюхин Д.М.* Оценка потенциальной опасности фильтрационных вод полигонов твердых коммунальных отходов Ленинградской области // *Агрофизика*. 2019. № 1. С. 1–7.
3. *Степаненко Е.Е., Поспелова О.А., Зеленская Т.Г.* Исследование химического состава фильтрационных вод полигона твердых бытовых отходов // *Известия*. Самар. НЦ РАН. 2009. Т. 11. № 1 (3). С. 525–527.
4. *Скворцов Л.С., Варшавский В.Я., Камруков А.С., Селиверстов А.Ф.* Очистка фильтрата полигонов твердых бытовых отходов // *Чистый город*. 1998. № 2. С. 2–7.
5. *Комбарова М.М., Грачева Е.В.* Определение резистентности растений к фильтрационным водам полигона твердых бытовых отходов // *Вестн. Перм. нац. исслед. политех. ун-та. Охрана окружающей среды. Транспорт. Безопасность жизнедеятельности*. 2013. № 2. С. 48–60.
6. М-МВИ-80-2008 Методика выполнения измерений массовой доли элементов в пробах почв, грунтов и донных отложений методами атомно-эмиссионной и атомно-абсорбционной спектроскопии. СПб., 2008. 23 с.
7. ПНД Ф 16.1:2.2.2:3.67-10 Количественный химический анализ почв. Методика измерений массовой доли азота нитратов в пробах почв, грунтов, донных отложений, илов, отходов производства и потребления фотометрическим методом с салициловой кислотой. М., 2010. 22 с.
8. ПНД Ф 16.2:2.3:3.30-02 Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений. Содержание азота аммонийного в твердых и жидких отходах производства и потребления, осадках, шламах, активном иле, донных отложениях фотометрическим методом. М., 2002. 17 с.
9. Определение содержания токсичных элементов в пищевых продуктах и продовольственном сырье.

- Методика автоклавной пробоподготовки: Метод. указ-я. МУК 4.1.985-00. М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2000. 19 с.
10. ГОСТ 13496.4-93 Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Методы определения содержания азота и сырого протеина. М.: Стандартинформ, 2011. 15 с.
 11. *Витковская С.Е.* Методы оценки неоднородности почвенного покрова при планировании и проведении полевых опытов. СПб.: АФИ, 2011. 52 с.
 12. *Кабата-Пендиас А., Пендиас Х.* Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.
 13. *Шилова Ю.О., Витковская С.Е.* Токсичные компоненты твердых бытовых отходов как источник загрязнения почв // Роль молодых ученых в решении актуальных задач АПК: сб. научн. тр. Междуна-род. научн.-практ. конф. молод. ученых. СПб.: СПбГАУ, 2017. С. 88–89.
 14. *Соболев В., Соколов М., Родин М.* Литий-тионил-хлоридные источники питания // Компоненты и технологии. 2010. № 7. С. 124–126.
 15. *Витковская С.Е., Шаврина К.Ф.* Влияние различных доз органических и минеральных удобрений на распределение цинка в системе “дерново-подзолистая почва–растения озимой ржи // Агрофизика. 2017. № 3. С. 4–13.
 16. СП 11-102-97 Инженерно-экологические изыскания для строительства. М., 1997. 42 с.
 17. Временный максимально допустимый уровень (МДУ) содержания некоторых химических элементов и госсипола в кормах для сельскохозяйственных животных и кормовых добавках. Утв. Гл. управл. ветеринарии Госагропрома СССР 07.08.1987 г. М., 1987.

Influence of Filtration Waters of the Solid Municipal Waste Landfill on Biomass and the Elemental Composition of Barley Plants

S. E. Vitkovskaya^{a,b,#} and Yu. O. Shilova^a

^a *Russian State Hydrometeorological University Voronezhskaya ul., 79, Saint-Petersburg 192007, Russia*

^b *Agrophysics Research Institute Gragdanskiy prospect, 14, Saint-Petersburg 195220, Russia*

[#] *E-mail: s.vitkovskaya@mail.ru*

Under the conditions of a model experiment, the effect of increasing doses of the solid municipal waste landfill filtrate on the biomass of barley plants and the distribution of nitrogen and heavy metals (HM) (Cr, Cd, Li, Pb, Zn) in the soil-plant system were studied. The dependence of plant biomass in the range of filtrate doses of 0–260 ml/kg of soil is represented by curves with a maximum. The N content in the aerial parts of plants linearly increased in the range of tested doses of the filtrate. A tendency to increase the content of HM in the soil was observed. The transition of HM from soil to plants depended on the dose of the filtrate, the degree of cultivation of the soil, and the properties of chemical elements. The content of all tested HM in the roots significantly exceeded the content in the aerial parts of plants.

Key words: filtration waters, solid municipal waste landfill, biomass of plants, elemental composition, barley.