

УДК 574.4; 631.45; 632.8

**Александр Петрович Колбас¹, Наталья Юрьевна Колбас²,
Марина Александровна Пастухова³**

¹канд. биол. наук, доц., нач. Центра экологии

Брестского государственного университета имени А. С. Пушкина

²канд. биол. наук, доц., зав. каф. химии

Брестского государственного университета имени А. С. Пушкина

³магистр биол. наук, зав. лабораторией «Отраслевая научно-исследовательская лаборатория
качества кормов» Полесского аграрно-экологического института

Национальной академии наук Беларуси

Aleksandr Kolbas¹, Natalia Kolbas², Marina Pastukhova³

¹Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Head of the Ecology Center
at the Brest State A. S. Pushkin University

²Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Chemistry
at the Brest State A. S. Pushkin University

³Master of Biological Sciences, Head of the Laboratory «Branch Research Laboratory
of Feed Quality» of the Polesky Agrarian and Ecological Institute
at the National Academy of Sciences of Belarus

e-mail: kolbas77@mail.ru

СТРУКТУРНЫЕ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ОТВЕТЫ РАСТЕНИЙ НА ПОЛИЭЛЕМЕНТНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ В ПОЧВЕННЫХ СЕРИЯХ*

Представлены данные о влиянии полиэлементного загрязнения почв на морфологические и физиолого-биохимические признаки растений фестулолиума, выращенных в почвенных сериях с различной концентрацией тяжелых металлов. Выявлено, что индикативными параметрами для составления шкал фитотоксичности почв могут выступать как структурные (длина корня), так и функциональные (активность каталазы) параметры. Даны рекомендации по составлению фитотоксических шкал по эффективным концентрациям субстратов с полиэлементным загрязнением.

Ключевые слова: активность каталазы, антиоксидантная активность, тяжелые металлы, фестулолиум, фитотоксичность, фотосинтетические пигменты, фэдинг.

Structural and Functional Responses of Plants to Polyelement Contamination in Soil Series

The article presents data on the effect of polyelemental soil pollution on the morphological, physiological and biochemical characteristics of festulolium plants grown in soil series with different concentrations of heavy metals. It was revealed that both structural (root length) and functional (catalase activity) parameters can act as indicative parameters for compiling phytotoxicity scales for soils. Recommendations are given for the preparation of phytotoxic scales for the effective concentrations of substrates with polyelement contamination.

Key words: catalase activity, antioxidant activity, heavy metals, festulolium, phytotoxicity, photosynthetic pigments, fading.

Введение

Увеличение промышленной, сельскохозяйственной и городской активностей приводит к широкому вовлечению металлов и металлоидов в избыточных количествах в окружающую среду, что способствует загрязнению почв. Многие тяжелые металлы (ТМ), представленные в антропогенных выбросах, могут длительно сохраняться и накапливаться в окружающей среде. В общем составе загрязнений почв ТМ занимают первое место и составляют около 40 % от всех контаминантов в Европе [1]. Причем в большинстве случаев это комплексное загрязнение представляет смеси веществ, содержащих такие элементы, как Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn, Sb, As, Co, Ni. Это значительно

Работа выполнена в рамках проекта БРФФИ-БРЕСТ Х19Б-003 «Фиторемедиация почв в условиях полиэлементного загрязнения территории тяжелыми металлами» № 20200202.

усложняет применение традиционных инженерных подходов для очистки. Для решения таких задач в последние десятилетия в мире активно внедряют технологии фиторемедиации – восстановления почв при помощи растений. Этот подход позволяет устранять экологические, экономические и социальные ограничения, связанные с традиционными инженерными методами, сочетать приемлемые сроки ремедиации и относительную дешевизну [2].

Основываясь на результатах предыдущих исследований, нами предложен план управления в виде полного цикла фиторемедиации участков, загрязненных ТМ, с использованием фитоэкстракции и фитостабилизации совместно с получением растительной биомассы, который включает следующие этапы:

- 1) оценка первоначального уровня загрязнения и экологических рисков физико-химическими и биоиндикационными методами;
- 2) выбор растений, регуляторов роста, почвенных добавок, улучшающих агрономических технологий;
- 3) реализация выбранной ремедиационной стратегии в полевых условиях на пробных площадках;
- 4) валоризация полученной биомассы и применение стратегий в широких масштабах.

На первом и втором этапах эффективно использование метода «Фэдинг» (англ. fading – разбавление, затухание) – создание почвенных серий путем разбавления загрязненных субстратов условно чистой почвой в широком диапазоне концентраций [3]. Этот подход позволяет получать почвенные серии с хорошим распределением значений концентраций ТМ и избегать эффекта кластера при моделировании ответов растений.

Проблема мониторинга и очистки почв от ТМ в Брестском регионе весьма актуальна. Среди промышленных предприятий аккумуляторные заводы по интенсивности загрязнения окружающей среды находятся на одном из первых мест. Отходы их производства (пыль, зола) содержат значительные количества ТМ: Pb, Cd, Zn, Cu, оказывая токсический эффект на биоту и человека. В Брестской области потенциальными площадками для фиторемедиации полиэлементного загрязнения являются территории, прилегающие к ООО «Белинвестторг-сплав» (г. Белоозерск, Березовский район), и бывший несанкционированный полигон хранения отходов данного предприятия (пос. Зеленый бор, Ивацевичский район).

Цель статьи – оценить потенциальные экологические риски полиэлементного загрязнения отходами предприятий по производству аккумуляторов в Брестском регионе через оценку структурных и функциональных параметров растений в почвенных сериях.

Задачи исследования: 1) оценить степень загрязнения почв и субстратов физико-химическими методами; 2) произвести анализ фитотоксичности по структурным и функциональным ответам растений; 3) дать практические рекомендации.

Материалы и методы исследования

Для данного эксперимента были предварительно отобраны и проанализированы почвы и зола свинцовая с нескольких потенциально опасных территорий, связанных с аккумуляторной промышленностью, а также условно чистый контроль (таблица 1).

Учитывая, что большинство техногенных выбросов накапливается на поверхности почвенного покрова [4], образцы отбирали до глубины 20 см в пяти местах (методом конверта) и составляли смешанный образец. В субстратах было определено валовое содержание элементов Zn, Cd, Cu, Ni, Pb, Mn, методом атомно-абсорбционной спектроскопии на приборе SOLAAR MkII M6 DoubleBeam AAS.

Для более полной и точной картины загрязнения территорий эколого-геохимическую оценку следует проводить не только по санитарно-гигиеническим нормативам, но и с учетом региональных и субрегиональных особенностей. С этой целью

применяют такие показатели, как коэффициент концентрации химического элемента (K_c) и суммарный показатель загрязнения почв (Z_c). При расчетах коэффициента концентрации (K_c), или аномальности, представляющего собой отношение содержания элемента в исследуемом образце к его фоновому содержанию, использовали следующие значения концентрации приоритетных ТМ в почвах юго-запада Беларуси (субрегиональный фон, мг/кг): Pb – 5,39; Cd – 0,09; Cu – 1,29; Zn – 7,43; Mn – 109,6; Ni – 0,66; Co – 0,45; Cr – 1,85 [4]. Рассчитываемый суммарный индекс загрязнения учитывал содержание Zn, Cd, Cu, Ni, Pb, Mn. Значение Z_c от 1 до 5 соответствует низкой степени загрязнения, Z_c от 5,1 до 20 – средней, Z_c от 20,1 до 50 – высокой, Z_c более 50 – очень высокой [5].

Таблица 1. – Экспериментальные участки и субстраты

№	Участок	Субстрат	Код
1	Бывший полигон отходов промышленных предприятий (опытный участок) (пос. Зеленый бор, Ивацевичский р-н)	Почва	ПП-1
2	Лесные насаждения в ареале действия полигона отходов Промпредприятий (пос. Зеленый бор, Ивацевичский р-н)	Почва	ПП-2
3	Бывший полигон отходов промышленных предприятий (опытный участок) (пос. Зеленый бор, Ивацевичский р-н)	Зола свинцовая	ПП-3
4	Территория, прилегающая к ООО «Белинвестторг-сплав» (г. Белоозерск)	Почва	ПП-4
5	Территория, прилегающая к ООО «Белинвестторг-сплав» (г. Белоозерск)	Почва	ПП-5
6	ООО «Белинвестторг-сплав» (г. Белоозерск)	Зола свинцовая	ПП-6
7	Приусадебный (контрольный) участок (г. Брест)	Почва	ПУ-4

Предварительный анализ показал, что в почвах, отобранных с территории, прилегающих к ООО «Белинвестторг-сплав» в г. Белоозерске (ПП-4 и ПП-5) и обладающих высокой степенью загрязнения, суммарное содержание металлов составляет около 1 % от содержания их в отходах производства – свинцовой золе (ПП-6) (таблица 2). В почвах с территорий, прилегающих к месту несанкционированного хранения свинцовой золы в поселке Зеленый бор (ПП-1), суммарное содержание составляет около 0,5 % от содержания их в окисленной свинцовой золе (ПП-3) и соответствует среднему уровню загрязнения (таблица 2). Исходя из этого была предложена следующая схема двух экспериментов «Фэдинг» с постепенным увеличением концентрации каждой золы в субстратах (таблица 3). Контрольная почва и почва ПП-2 характеризовались низким уровнем загрязнения.

Таблица 2. – Коэффициенты аномальности (K_c) относительно фонового содержания ТМ и суммарный индекс загрязнения (Z_c) экспериментальных площадок и субстратов

Код	Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	Mn	Zc
ПП-1	44,82	16,56	12,71	8,55	10,30	2,92	19,17
ПП-2	2,15	0,00	1,86	2,30	1,97	0,64	1,79
ПП-3	10688,76	7091,22	1140,47	242,99	181,21	20,30	3872,99
ПП-4	93,56	11,56	8,91	2,85	65,00	0,91	36,56
ПП-5	28,27	7,11	20,23	2,22	55,76	1,00	22,92
ПП-6	14638,31	2635,33	1555,97	381,35	491,21	9,79	3942,39
ПУ-4	0,89	0,00	2,25	2,25	1,97	0,84	1,64
фон, мг/кг [4]	5,39	0,09	1,29	7,43	0,66	109,6	

Почвенные серии формировались после тщательного перемешивания незагрязненных почв со свинцовой золой в соотношении от 0 : 100 % до 50 : 50 % (таблица 3), т. к. большие концентрации золы приводили к гибели всех растений в предварительных опытах. Почвенные образцы (0,42 кг) были помещены в пластиковые горшки (0,5 л) в 10 вариантах концентраций (в трех повторностях).

Таблица 3. – Состав почвенных смесей в экспериментах «Фэдинг» и ответы тестовых растений фестулолиума

Вариант опыта	Масса почвы, г	Масса золы, г	Z _c	Лабораторная всхожесть*, %	Выживаемость*, %
ПП-6 (Фэдинг-1)					
Контроль	420	0	1,63	70,0 ± 2,67	95,2 ± 4,89
0,1 %	419,58	0,42	5,58	68,67 ± 2,44	99,0 ± 1,44
0,5 %	417,9	2,1	21,34	56,0 ± 2,0	100
1,0 %	415,8	4,2	41,05	64 ± 2,67	98,9 ± 3,1
5,0 %	399	21	198,68	54,0 ± 9,1	96,3 ± 9,7
10,0 %	378	42	395,71	0	0
20,0 %	336	84	789,79	0	0
30,0 %	294	126	1400,01	0	0
40,0 %	252	168	1577,94	0	0
50,0 %	210	210	1972,02	0	0
ПП-3 (Фэдинг-2)					
Контроль	420	0	1,64	72 ± 1,42	100
0,1 %	419,58	0,42	5,51	54 ± 4,22	96,3 ± 3,1
0,5 %	417,9	2,1	20,99	60 ± 1,95	100
1,0 %	415,8	4,2	40,35	58 ± 1,7	86,2 ± 1,9
5,0 %	399	21	195,21	60 ± 1,1	90 ± 6,6
10,0 %	378	42	388,77	66 ± 7,1	100
20,0 %	336	84	775,91	52 ± 3,7	100
30,0 %	294	126	1163,00	50 ± 8	100
40,0 %	252	168	1550,20	40 ± 1,6	100
50,0 %	210	210	1937,31	46 ± 2,7	100

В качестве тест-объекта был выбран фестулолиум (*Festulolium*). Выбор объекта обусловлен высокой скоростью роста и индикативностью к полиэлементному загрязнению.

Для проведения анализа по 25 семян фестулолиума высевали в каждый горшок. Затем горшки помещали в климатизированное помещение Зимнего сада Центра экологии Брестского государственного университета имени А. С. Пушкина со следующими условиями: световой режим – 14 ч; освещение – $150 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$; температура – 25 °C (день), 22 °C (ночь); относительная влажность – 65 % [6]. Горшки были расставлены в случайном порядке и поливались водопроводной водой (50 % полевой влажности почвы). Растения фестулолиума были собраны через три недели на стадии двух-трех настоящих листьев. Побеги и корни каждого растения были промыты в дистиллированной воде, взвешены и измерены. Определены следующие ростовые параметры: лабораторная всхожесть и выживаемость растений (процент от взошедших растений), а также длины и массы надземной и подземной части. Затем были проанализированы биохимические показатели растений: содержание фотосинтетических пигментов, активность каталазы и антирадикальная активность (АРА).

Определение хлорофиллов (*a* и *b*) и каротиноидов проводили согласно общепринятой методике [7]. Содержание пигментов в вытяжках определяли спектрофотометрически (спектрофотометр Proscan MC 122, «Проскан специальные инструменты»,

Республика Беларусь) в кварцевой кювете при длине пути светового монохромного луча в 1 см и длинах волн 663, 646 и 470 нм [3].

Антирадикальную активность (АРА) оценивали методом ABTS. Для извлечения антиоксидантов из растительного сырья и поддержания их стабильности использовали 75 мМ фосфатный буферный раствор (pH = 7,4). Раствор ABTS^{•+} готовили согласно рекомендациям [8]. Активность каталазы тестовых растений определяли согласно общепринятой методике [9]. Статистическую обработку результатов проводили с использованием программы R версия 3.5.3 (Foundation for Statistical Computing, Вена, Австрия). Уровень достоверности – $p < 0,05$.

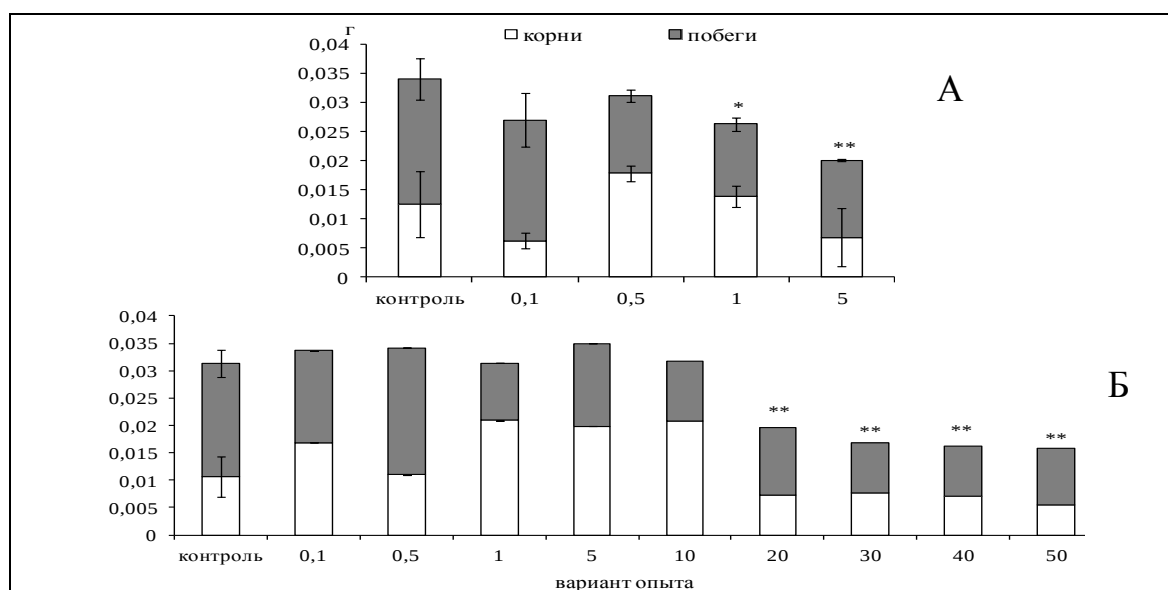
Результаты и их обсуждение

Ростовые параметры тестовых растений

При использовании золы ПП-6 гибель («Фэдинг-1») растений наблюдалась уже при содержании 10 % золы, в то время как при использовании золы ПП-3 («Фэдинг-2») растения выживали при содержании в 50 %, хотя и при значительном снижении виталитета (таблица 3). Это может быть объяснено длительным нахождением данного образца золы под открытым небом, что, вероятно, вызвало окисление соединений тяжелых металлов и снижение содержания их подвижных форм.

Лабораторная всхожесть растений фестулолиума в опыте «Фэдинг-1» составила 54–70 %, достоверные отличия от контроля были в вариантах с добавлением 0,5, 1,0 и 5,0 % золы (таблица 3). Выживаемость растений составила 95,2–100 %, и в опытных вариантах была тенденциозно выше контроля.

Масса растений варьировала от 0,021 до 0,034 г и была достоверно ниже для образцов с 1 и 5 % золы ПП-6 (рисунок 1, А). Масса побегов варьировала от 0,012 до 0,021 г и для образцов снижалась в последовательности: 0,1 % > 0,5 % > 5 % > 1 %. В целом процент массы побегов от общей массы для контроля составил 63,1, а для образцов варьировал от 42,8 до 76,8. Масса корней варьировала от 0,007 до 0,018 г и снижалась в последовательности: 0,5 % > 1 % > контроль > 5 % > 0,1 %. Масса корней для контроля составила 36,9 % от общей массы растения, а для образцов – от 23,2 до 57,2 %.



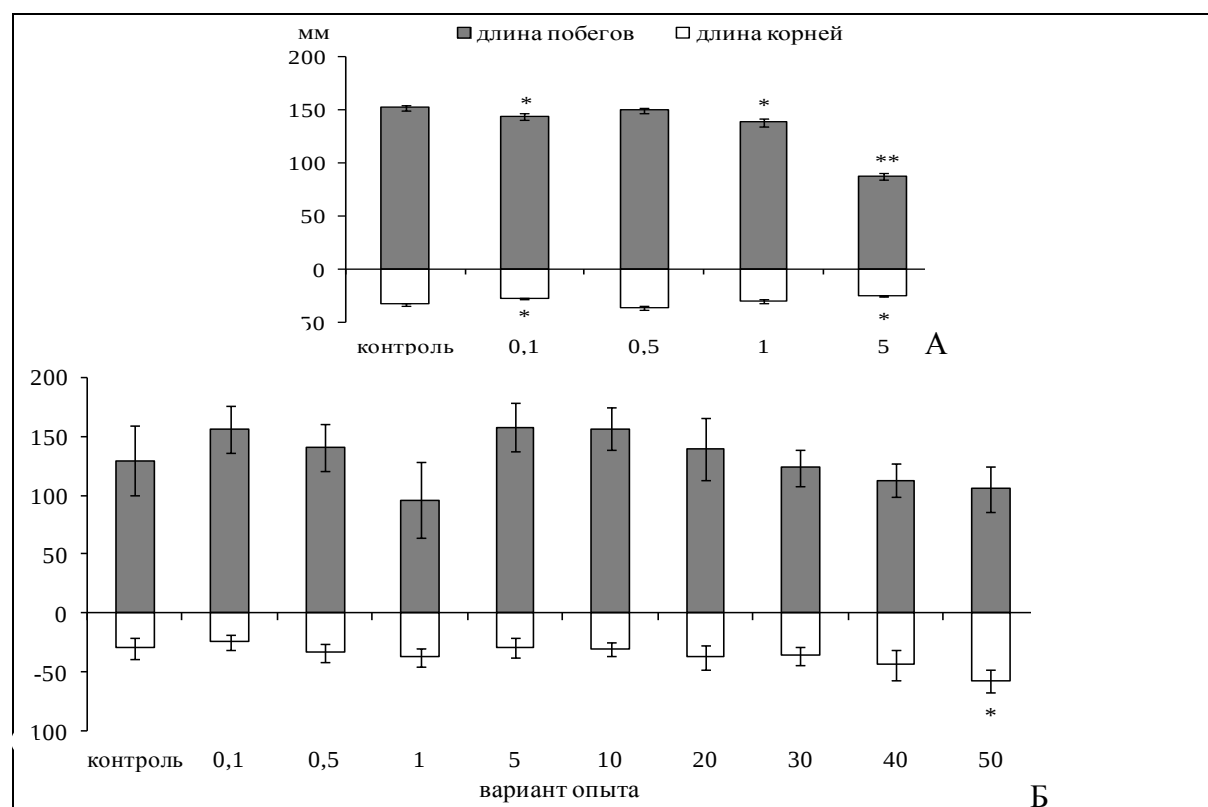
А – с золой с ООО «Белинвестторг-сплав» (ПП-6),
Б – с золой с территории несанкционированного хранения в поселке Зеленый бор (ПП-3);
** – достоверно при уровне значимости (P) $0,001 \leq P < 0,01$, * – при $0,01 \leq P < 0,05$

Рисунок 1. – Масса растений фестулолиума в эксперименте «Фэдинг»

В эксперименте «Фэдинг-1» масса растений варьировала от 0,016 до 0,035 г и была достоверно ниже контроля для образцов, начиная с содержанием золы 10,0 % и выше (рисунок 1, Б). Масса побегов варьировала от 0,009 до 0,021 г. Доля массы побегов от общей массы растения для контроля составил 65,9, а для образцов варьировал от 33,0 до 67,9. Масса корней варьировала от 0,006 до 0,021 г. Для контроля доля массы корней составила 34,1 % от общей массы растения, а для образцов – от 35 до 67 %.

Длина побегов растений в эксперименте «Фэдинг-1» была 151,84 – 86,63 мм и для образцов с содержанием золы 0,1, 1,0 и 5,0 % была достоверно ниже по сравнению с контролем. Длина корней составила 25,4 – 36,9 мм и для образцов с содержанием золы 0,1 и 5,0 % была достоверно ниже по сравнению с контролем (рисунок 2, А).

Длина побегов растений в эксперименте «Фэдинг-1» была 96,24 – 157,85 мм, корней – 24,15 – 57,17 мм (рисунок 2, Б).



А – с золой с ООО «Белинвестторг-сплав» (ПП-6),

Б – с золой с территории несанкционированного хранения в поселке Зеленый бор (ПП-3);

** – достоверно при уровне значимости (P) $0,001 \leq P < 0,01$, * – при $0,01 \leq P < 0,05$

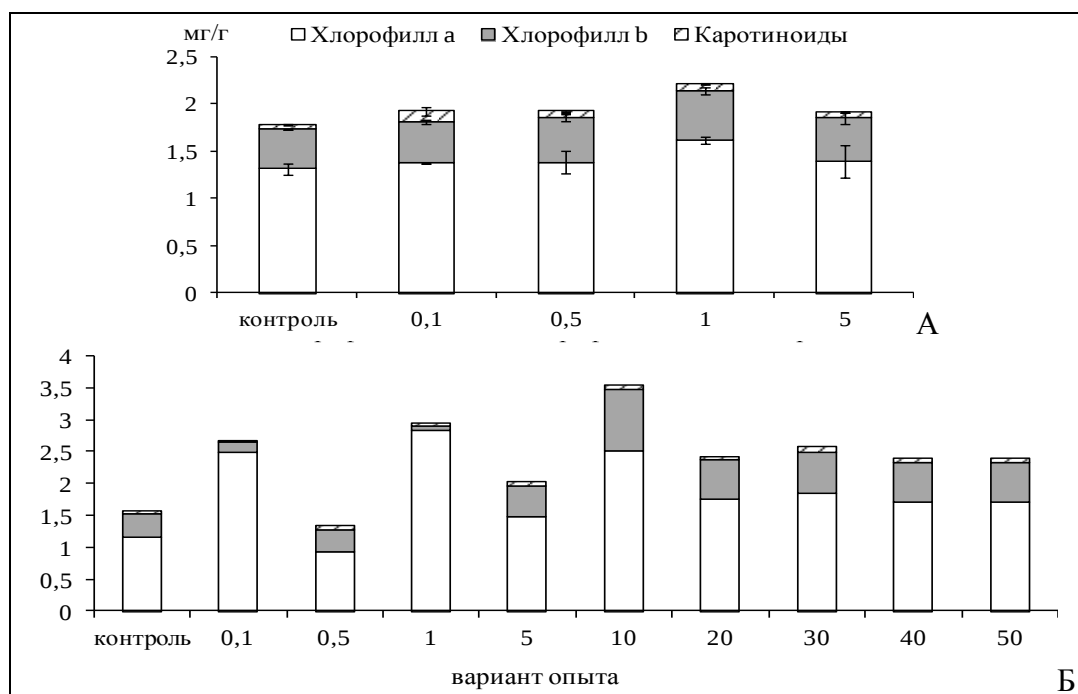
Рисунок 2. – Длина растений фестулолиума в эксперименте «Фэдинг»

Снижение морфометрических параметров относительно контроля более чем на 10 % (т. н. эффективная концентрация [10]) фиксируется для фестулолиума при 5 % золы ПП-6 и 20 % золы ПП-3. Также был выявлен гормезис (увеличение жизненности при небольших превышениях фитотоксических порогов [11]) при использовании золы ПП-6 в пропорциях 0,1 : 0,5 : 1 % и 0,1 – 10 % для золы ПП-3. Установлено, что наиболее благоприятной для роста и развития тестовых растений является почва с добавлением 0,5 % золы ПП-6 и до 1,0 % золы ПП-3, более высокие концентрации вызывают значительное снижение ростовых параметров.

Содержание фотосинтетических пигментов

В эксперименте «Фэдинг-1» в исследуемом растительном материале содержание хлорофилла *a* варьировало от 1,307 до 1,613 мг/г сырой навески, хлорофилла *b* – от 0,421 до 0,522 мг/г (рисунок 3, А). Суммарное содержание хлорофилла (*a* и *b*) варьировало от 1,728 до 2,134 и в образцах с добавлением золы ПП-6 было достоверно выше, чем в контроле. Содержание каротиноидов среди других пигментов было наименьшим и составило 0,052–0,12 мг/г. Отметим, что растения фестулолиума в почвосмеси с 1 %-ной золой в данном опыте характеризуются повышенным содержанием всех фотосинтетических пигментов (на 23,4, 23,9 и 41,1 % превышают параметры контрольных растений), растения образца с 0,5 %-ным содержанием золы по сравнению с контрольными содержат достоверно больше хлорофилла *b* (на 12 %), а растения образца с 0,1 %-ным содержанием золы – больше каротиноидов (в 2,2 раза). Это можно объяснить явлением гормезиса и включением антистрессовой компенсации.

Растения фестулолиума в эксперименте «Фэдинг-2» (рисунок 3, Б) содержат 0,905–2,81 мг/г хлорофилла *a*, 0,072–0,959 мг/г хлорофилла *b* и 0,035–0,079 мг/г каротиноидов. Растения большинства образцов с добавлением золы ПП-3 содержат достоверно больше пигментов по сравнению с контрольными растениями. При этом в опытах с 0,5 %-ным содержанием золы наблюдается снижение суммарного содержания фотосинтетических пигментов, но только за счет хлорофилла *a* (меньше на 21 % по сравнению с контролем). Растения образца с 0,1 %-ным добавлением золы характеризуются повышенным содержанием хлорофилла *a* (в 2,1 раза выше, чем в контроле), но пониженным содержанием хлорофилла *b* (на 58,9 %) и каротиноидов (на 19,56 %). Пониженное содержание хлорофилла *b* (на 80,0 %) также отмечено в растениях образца с 1 %-ным добавлением золы. Максимальное содержание пигментов отмечено в варианте с 10 %-ным содержанием золы.



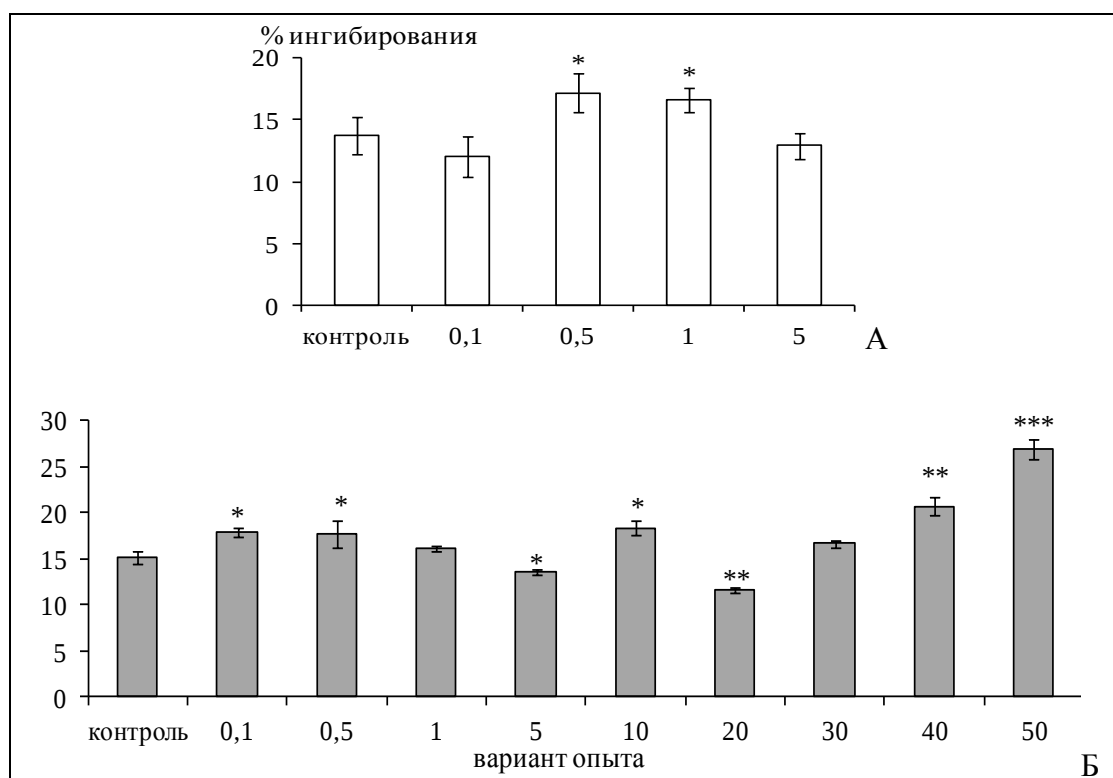
А – с золой с ООО «Белинвестторг-сплав» (ПП-6),

Б – с золой с территории несанкционированного хранения в пос. Зеленый бор (ПП-3)

Рисунок 3. – Содержание пигментов в растениях фестулолиума в эксперименте «Фэдинг»

АРА супернатантов (в % ингибирования катион-радикала ABTS) в эксперименте «Фэдинг-1» варьировала от 12 до 17,15 %, и достоверное отличие от контроля выявлено в опыте с добавлением золы 0,5 и 1 % (рисунок 4, А). При этом повышение АРА по отношению к контролю составило соответственно 24,9 и 21,2 %. Полученные результаты АРА демонстрируют гормезис при использовании образца (золы) ПП-6 в пропорциях 0,1–0,5–1–5 %.

АРА супернатантов в эксперименте «Фэдинг-2» варьировала от 11,6 до 26,9 % (рисунок 4, Б). Достоверное отличие от контроля выявлено для большинства вариантов опыта, при этом наблюдалось как повышение параметра (от 16,8 до 76,8 % в образцах с добавлением 0,1, 0,5, 10 и более 40 %), так и снижение (от 10,7 до 23,5 % в образцах с содержанием золы 5 и 20 %). Повышение антиоксидантного статуса свидетельствует об уровне стресса и способности растений противостоять ему.



А – с золой с ООО «Белинвестторг-сплав» (ПП-6),

Б – с золой с территории несанкционированного хранения в поселке Зеленый бор (ПП-3);

*** – отличие достоверно при уровне значимости (P) менее 0,001,

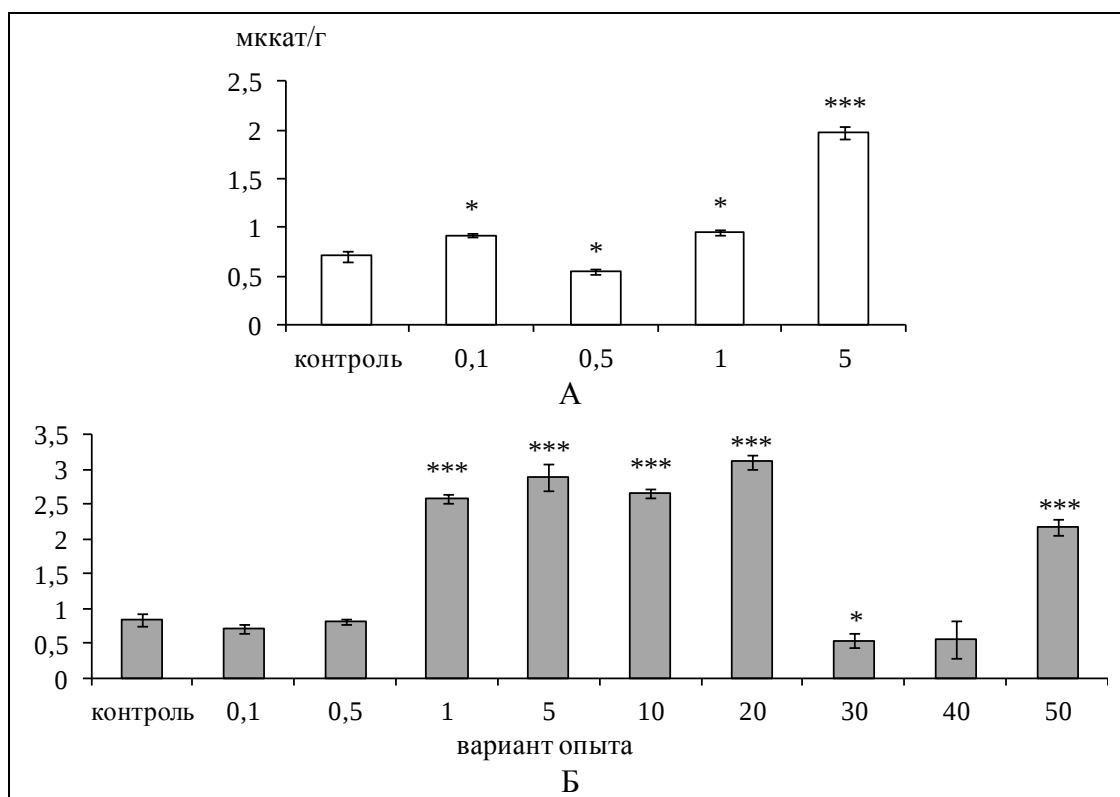
** – при $0,001 \leq P < 0,01$; * – при $0,01 \leq P < 0,05$

Рисунок 4. – Антирадикальная активность (тест ABTS) растений фестулолиума в эксперименте «Фэдинг»

Полученные результаты активности каталазы фестулолиума в обоих экспериментах представлены на рисунке 5. В целом активность каталазы варьировала от 0,54 до 3,11 мккат/г.

В эксперименте «Фэдинг-1» отмечено повышение активности каталазы на 30 % при добавлении 0,1 и 1 % золы и в 2,8 раза при увеличении дозы золы выше 5 %. Снижение активности каталазы (на 23,1 %) отмечено в варианте опыта с 0,5 %-ным содержанием золы ПП-6. В эксперименте «Фэдинг-2» отмечено достоверное снижение активности каталазы опытных растений по сравнению с контролем (на 64,7 %) при содержании золы 30 %, а также повышение активности каталазы (в 2,6–3,7 раза) при со-

держании золы от 1 до 20 %, а также при 50 %. Последнее может свидетельствовать о выключении барьерных функций и нарушении целостности мембран клеток, вследствие чего при больших концентрациях растения не выживают.



*А – с золой с ООО «Белинвестторг-сплав» (ПП-6),
Б – с золой с территории несанкционированного хранения в поселке Зеленый бор (ПП-3);
*** – отличие достоверно при уровне значимости (P) менее 0,001;
** – при $0,001 \leq P < 0,01$; * – при $0,01 \leq P < 0,05$*

Рисунок 5. – Активность каталазы растений растений фестулолиума в эксперименте «Фэдинг»

Таким образом, благодаря действию вышеописанных факторов признаки растений показывают различные стратегии в отношении «доза – ответ». Морфологические параметры чаще показывают схожие тенденции, тогда как биохимические и физиологические ответы обычно при фэдинге более сложные. В целом отмечается большая амплитуда, а следовательно, и чувствительность функциональных параметров по сравнению с морфометрическими. Биохимические параметры (такие как АРА листьев и содержание фотосинтетических пигментов) связаны с антиоксидантным статусом растений. Этот результат был подтвержден новым оригинальным методом, а именно тестом ABTS, определяющим общую антиоксидантную емкость органов. Основываясь на этих данных, антиоксидантный статус листьев можно объяснить двумя фактами: увеличение активности антиоксидантных ферментов и содержания антиокислительных метаболитов (например, каротиноиды, полифенолы). Повторное увеличение некоторых биохимических параметров при высоких концентрациях меди можно объяснить увеличением числа клеток на единицу площади листа, причем клетки уменьшаются в размерах, что приводит к снижению биомассы побегов, а незначительные изменения в митозе свидетельствуют о большем влиянии ТМ на функциональные, а не на структурные основы устойчивости благодаря экспрессии генов [12].

Заклучение

Проведенные анализы показали значительное загрязнение и его полиэлементный характер для отходов аккумуляторных производств. Эксперименты подтвердили эффективность метода «Фэдинг» на начальных этапах фиторемедиации для определения токсичности субстратов и пределов эффективного использования растений-кандидатов.

Выявлено, что индикативными параметрами для составления шкал фитотоксичности почв могут выступать как морфометрические (длина корня), так и физиолого-биохимические параметры (активность каталазы), причем последние обладают большей чувствительностью.

Метод «Фэдинг» в эксперименте с добавлением золы выявил гормезис при использовании небольших концентраций полиэлементного субстрата – золы. Были выявлены эффективные концентрации для каждой золы, что может быть использовано при фиторемедиации умеренно загрязненных почв.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Assessing heavy metal sources in agricultural soils of an European Mediterranean area by multivariate analysis / C. Mico [et al.] // *J. Chemosphere*. – 2006. – Vol. 65. – P. 863–872.
2. Прасад, М. Н. Практическое использование растений для восстановления экосистем, загрязненных металлами / М. Н. Прасад // *Физиология растений*. – 2003. – Т. 50, № 5. – С. 764–780.
3. Morphological and functional responses of a sunflower metal-tolerant mutant line to a copper-contaminated soil series / A. Kolbas [et al.] // *Environmental Sci. and Pollution Res.* – 2018. – Vol. 5, is. 17. – P. 16686–16701.
4. Геохимическая оценка загрязнения тяжелыми металлами почв и огородных культур в урболандшафтах г. Бреста и разработка рекомендаций по снижению соответствующих рисков : отчет о НИР (промежуточный) / Полес. аграр.-экол. ин-т НАН Беларуси ; рук. Н. В. Михальчук. – Брест, 2017. – 15 с. – № X17Б-002.
5. Охрана окружающей среды и природопользование. Земли. Правила и порядок определения загрязнения земель (включая почвы) химическими веществами : ТКП 17.03-02-2013. – Введ. 29.11.2013. – Минск : М-во природ. ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь, 2013. – 12 с.
6. ISO 11269-2:2012. Soil quality – Determination of the effects of pollutants on soil flora – Part 2: Effects of contaminated soil on the emergence and early growth of higher plants. – 2012. – P. 19.
7. Гавриленко, В. Ф. Большой практикум по фотосинтезу / В. Ф. Гавриленко, Т. В. Жигалова. – М. : Академия, 2006. – 256 с.
8. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay / R. Re [et al.] // *Free Radical Biology and Medicine*. – 1999. – Vol. 26, Nr 9/10. – P. 1231–1237.
9. Современные проблемы биохимии. Методы исследований : учеб. пособие / Е. В. Барковский [и др.] ; под ред. проф. А. А. Чиркина. – Минск : Выш. шк., 2013. – 491 с.
10. Phenotypic seedling responses of a metal-tolerant mutant line of sunflower growing on a Cu-contaminated soil series: potential uses for biomonitoring of Cu exposure and phytoremediation / A. Kolbas [et al.] // *Plant and Soil*. – 2014. – Vol. 376. – P. 377–397.
11. Calabrese, E. J. Hormesis and plant biology / E. J. Calabrese, R. B. Blain // *Environmental Pollution*. – 2009. – Vol. 157. – P. 42–48.
12. Functional characterisation of metal (loid) processes in planta through the integration of synchrotron techniques and plant molecular biology / E. Donner [et al.] // *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. – 2012. – Vol. 402. – P. 3287–3298.

REFERENCES

1. Assessing heavy metal sources in agricultural soils of an European Mediterranean area by multivariate analysis / C. Mico [et al.] // J. Chemosphere. – 2006. – Vol. 65. – P. 863–872.
2. Prasad, M. N. Praktichieskoje ispol'zovanie rastienij dlia vosstanovljenija ekosistiem, zagriaznionnyh mietallami / M. N. Prasad // Fiziologija rastienij. – 2003. – T. 50, № 5. – S. 764–780.
3. Morphological and functional responses of a sunflower metal-tolerant mutant line to a copper-contaminated soil series / A. Kolbas [et al.] // Environmental Sci. and Pollution Res. – 2018. – Vol. 5, is. 17. – P. 16686–16701.
4. Geohimicheskaja ocenka zagriaznienija tiazholymi mietallami pochv i ogorodnyh kul'tur v urbolandshaftah g. Briesta i razrabotka riekomiendacij po snizheniju sootvetstvujushchih riskov : otchiot o NIR (promezhutochnyj) / Polies. agrar.-ekol. in-t NAN Bielarusi ; ruk. N. V. Mihal'chuk. – Brest, 2017. – 15 s. – № KH17B-002.
5. Ohrana okruzhajushchej sriedy i prirodopol'zovanie. Ziemli. Pravila i poriadok opriedielienija zagriaznienija ziemel' (vkluchaja pochvy) himichieskimi veshchestvami : TKP 17.03-02-2013. – Vvied. 29.11.2013. – Minsk : M-vo prirod. riesursov i ohrany okruzhajushchej sriedy Riespubliki Bielarus', 2013. – 12 s.
6. ISO 11269-2:2012. Soil quality – Determination of the effects of pollutants on soil flora – Part 2: Effects of contaminated soil on the emergence and early growth of higher plants. – 2012. – P. 19.
7. Gavrilienko, V. F. Bol'shoj praktikum po fotosintezu / V. F. Gavrilienko, T. V. Zhihalova. – M. : Akadiemija, 2006. – 256 s.
8. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay / R. Re [et al.] // Free Radical Biology and Medicine. – 1999. – Vol. 26, Nr 9/10. – P. 1231–1237.
9. Sovriemiennye problemy biohimii. Metody issledovanij : uchieb. posobie / Ye. V. Barkovskij [i dr.] ; pod ried. prof. A. A. Chirkina. – Minsk : Vysh.shk., 2013. – 491 s.
10. Phenotypic seedling responses of a metal-tolerant mutant line of sunflower growing on a Cu-contaminated soil series: potential uses for biomonitoring of Cu exposure and phytoremediation / A. Kolbas [et al.] // Plant and Soil. – 2014. – Vol. 376. – P. 377–397.
11. Calabrese, E. J. Hormesis and plant biology / E. J. Calabrese, R. B. Blain // Environmental Pollution. – 2009. – Vol. 157. – P. 42–48.
12. Functional characterisation of metal (loid) processes in planta through the integration of synchrotron techniques and plant molecular biology / E. Donner [et al.] // Analytical and Bioanalytical Chemistry. – 2012. – Vol. 402. – P. 3287–3298.

Рукапіс наступіў у рэдакцыю 21.01.2021