

ФИТОТОКСИЧНОСТЬ УРБАНОЗЕМОВ, ЗАГРЯЗНЕННЫХ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ**Т. Н. МЫСЛЫВА, О. Н. ЛЕВШУК**

УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия»,
г. Горки, Республика Беларусь, 213407, e-mail: byrty41@yahoo.com, levshuk-2011@mail.ru

(Поступила в редакцию 18.10.2021)

Оценка фитотоксического воздействия тяжелых металлов на растительный организм является исключительно важной для поиска способов защиты растений от негативного воздействия поллютантов и снижения уровня их накопления в сельскохозяйственной продукции. Произведена оценка фитотоксического влияния Cu, Zn, Pb и Cd как приоритетных загрязнителей урбаноземов г. Горки на показатели всхожести и начального роста семян озимой пшеницы, ярового ячменя, гороха и кресс-салата. Общее фитотоксическое воздействие загрязнения тяжелыми металлами на показатели развития тестовых культур оценивали с использованием индексов скорости прорастания семян (GRI) и всхожести семян (GI). Полиэлементное загрязнение почвы Zn, Pb и Cd оказывает максимальный фитотоксический эффект на показатели энергии прорастания, всхожести, роста корней и побегов проростков озимой пшеницы, ярового ячменя и гороха, сила и характер направленности которого зависят как от вида и дозы поллютанта, так и от биологических особенностей культуры. Монозагрязнение почвы Pb оказывает достоверный токсический эффект в отношении зерновых культур и гороха. Наличие в почве повышенного количества Cd усиливает фитотоксическое воздействие Zn на зерновые культуры, тогда как монозагрязнение цинком не проявляет токсического эффекта. Горох является токсикотолерантным к загрязнению почвы Cu, а максимальное токсическое воздействие на данную культуру оказывает Cd; при этом более сильно токсический эффект проявляется в отношении корней, причиной чего является ограничение тяжёлыми металлами мобилизации питательных веществ из семядолей. Установлено, что кресс-салат устойчив к высоким концентрациям тяжелых металлов, проявляющих стимулирующее воздействие на рост данной культуры.

Ключевые слова: тяжелые металлы, фитотоксичность, всхожесть, загрязнение, оценка.

Assessment of phytotoxic effect of heavy metals on the plant organism is extremely important for finding ways to protect plants from the negative effects of pollutants and to reduce the level of their accumulation in agricultural products. An assessment of phytotoxic effect of Cu, Zn, Pb and Cd as priority pollutants of urban soils in the city of Gorki on the indicators of germination and initial growth of seeds of winter wheat, spring barley, peas and watercress was made. The total phytotoxic effect of heavy metal contamination on the development indices of test crops was assessed using the seed germination rate indices (GRI) and germination indices (GI). Polyelement soil contamination with Zn, Pb and Cd has a maximum phytotoxic effect on the indicators of germination energy, germination capacity, root and shoot growth of seedlings of winter wheat, spring barley and peas, the strength and nature of which depend both on the type and dose of the pollutant and on biological characteristics of the crop. Mono-contamination of soil with Pb has a significant toxic effect on grain crops and peas. The presence of an increased amount of Cd in the soil enhances the phytotoxic effect of Zn on grain crops, while mono-contamination with zinc does not exhibit a toxic effect. Peas are toxic-tolerant to soil contamination with Cu, and Cd has the maximum toxic effect on this crop; moreover, the toxic effect is more strongly manifested in relation to the roots, the reason for which is the restriction of mobilization of nutrients from the cotyledons by heavy metals. It was found that watercress is resistant to high concentrations of heavy metals, which exhibit a stimulating effect on the growth of this crop.

Key words: heavy metals, phytotoxicity, germination, pollution, assessment.

Введение

Тяжелые металлы занимают одно из ведущих мест среди антропогенных загрязнителей окружающей среды, повышенное содержание которых оказывает ингибирующее и токсическое воздействие на биоту [1]. Поллютанты негативно воздействуют и на экологические функции почвы, ухудшая ее плодородие, снижая продуктивность фитоценозов и качество растениеводческой продукции [2]. Мигрируя в растительные организмы в избыточных количествах, тяжелые металлы вызывают нарушения метаболических процессов, что непосредственно сказывается на показателях роста и развития растений, особенно на начальных этапах онтогенеза [3, 4]. Именно эту особенность используют при биотестировании загрязненной почвы для установления ее фитотоксичности, под которой понимают снижение тест-функций, снимающихся с растительного тест-объекта на исследуемом субстрате, по сравнению с контролем [5]. Изучение механизмов поступления поллютантов в растительный организм из почвы и оценка их фитотоксического воздействия являются исключительно важными для поиска способов защиты растений от негативного воздействия тяжелых металлов и снижения уровня их накопления в сельскохозяйственной продукции в условиях усиления техногенно-антропогенного прессинга на окружающую среду [6]. Необходимость выполнения исследований по установлению фитотоксичности тяжелых металлов определяется также специфичностью влияния ряда химических элементов-загрязнителей на фитопродукционную способность растений, а также возможностью прогнозировать пригодность почвы для возделывания конкретной сельскохозяйственной культуры в условиях импактного загрязнения [7, 8]. Несмотря на то, что вопрос влияния различных химических элементов на рост и развитие растений изучается очень давно и достаточно широко [3, 5, 9 и др.], относительно небольшое количество исследований посвящено определению фитотоксического воздействия нескольких элементов-загрязнителей, находящихся в почве одновременно, когда можно оце-

нить их синергетическое и аддитивное действие, а также недостаточно изучен вопрос токсичности тяжелых металлов для отдельных сельскохозяйственных культур. Исходя из изложенного, целью данного исследования определена оценка фитотоксического влияния Cu, Zn, Pb и Cd как приоритетных загрязнителей урбаноземов г. Горки на показатели всхожести и начального роста семян озимой пшеницы, ярового ячменя, гороха и кресс-салата. Для достижения поставленной цели предусматривалось решение следующих задач: 1) оценить влияние моно- и полиметаллического загрязнения Cu, Zn, Pb и Cd на фитотоксичность урбаноземов; 2) определить уровень общего фитотоксического воздействия загрязнения тяжелыми металлами на показатели развития семян тестовых культур.

Основная часть

Исследования выполнялись в 2017–2021 гг. на территории г. Горки Могилевской области в пределах участков индивидуальной жилой застройки микрорайонов «Заречье», «Слобода» и «Академия», а также садовых товариществ «Труд», «Иваново», «Яблонька», «Верхнее озеро» и «Садовод», находящихся в пределах административной границы города. Определение содержания тяжелых металлов выполнялось методом атомно-абсорбционной спектрометрии на приборе SOLAAR S Series AA фирмы Thermo Scientific (США) в химико-экологической лаборатории УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия». Для оценки фитотоксичности урбаноземов использовали образцы почвы, в которых на протяжении 3-летнего периода исследований стабильно фиксировались высокие уровни содержания тяжелых металлов (табл. 1).

Таблица 1. Содержание тяжелых металлов в почве, используемой для оценки фитотоксичности

Вариант опыта	Место отбора образцов почвы	Содержание элемента в величинах, кратных его фоновому содержанию			
		Cu	Zn	Pb	Cd
1	Ленинский бульвар, 4	3,1	11,2	21,3	9,4
2	ул. Парковая (ботанический сад)	8,0	19,8	6,4	2,5
3	ул. Максима Горького, 43	4,4	166,6	5,6	1,7
4	ул. Машерова, 2	2,3	6,2	17,2	0,7
5	ул. Гагарина, 28	8,7	22,5	2,9	1,5
6	пер. Лермонтова, 12	3,9	176,1	3,1	3,1
7	ул. Студенческая, 7	5,0	108,7	6,6	5,0
Фоновое содержание элемента, мг/кг [10, 11]		2,26	3,22	3,0	0,1

Определение фитотоксичности почвы выполнялось согласно требованиям ДСТУ ISO 11269-1: 2004 [12] и основывалось на способности проростков растений реагировать на наличие тяжелых металлов в среде. Предварительно пророщенные семена тестовых сельскохозяйственных культур – озимой пшеницы, ярового ячменя, гороха и кресс-салата выращивались в контролируемых условиях в течение 14 дней. Контрольной средой являлась незагрязненная почва. Опыт повторяли 6 раз. У растений в контрольной среде и на исследуемой загрязненной почве на третьи сутки определялась энергия прорастания семян, на 5-е сутки – всхожесть семян, а после окончания периода выращивания измерялись длина корней и длина побегов. Статистически достоверная разница между всхожестью и энергией прорастания семян, а также длиной корней и проростков, выросших в исследуемой среде, и длиной корней и проростков, выросших на контрольной среде, являлась показателем влияния токсичности почвы. Для оценки достоверности различий между вариантами опыта использовали критерий Даннетта [13].

Общее фитотоксическое воздействие загрязнения тяжелыми металлами на показатели развития тестовых культур оценивали с использованием индексов скорости прорастания семян (GRI) и всхожести семян (GI), которые рассчитывали по формулам (1) и (2):

$$GRI = [(G1/1) + (G2/2) + (Gn/n)], \quad (1)$$

где G – количество проросших семян в соответствующий день наблюдения; 1, 2, n – сутки, на которые выполняется наблюдение.

$$GI = 100 * (G/GC) * (L/LC), \quad (2)$$

где G и GC – всхожесть семян на варианте и на контроле (%), L и LC – длина корней проростков на варианте и на контроле, мм.

Согласно [14], значение GI <50 % свидетельствует о высокой фитотоксичности, значения 50 % ≥ 80 % обозначает умеренную фитотоксичность, а значение >80 % указывает на отсутствие фитотоксичности субстрата.

Различные виды растений проявляют неодинаковую толерантность к повышенному содержанию тяжелых металлов в почве. Устойчивость растений к тяжелым металлам индивидуальна и является генетически закрепленным признаком, что чрезвычайно важно при выведении новых сортов для получения экологически безопасных урожаев на загрязненных почвах, а также обусловлена качественным и количественным составом поллютантов. В ходе выполненных исследований установлено, что

наличие в почве повышенного количества тяжелых металлов оказывало негативное воздействие на показатели начального роста и развития сельскохозяйственных культур (табл. 2).

Максимальное снижение энергии прорастания семян озимой пшеницы фиксировалось при совместном загрязнении почвы Zn, Pb и Cd. Монозагрязнение почвы Pb в количестве, кратном 17 фоновым значениям, вызывало токсический эффект, следствием которого стало снижение энергии прорастания семян озимой пшеницы. Этот факт свидетельствует о том, что данная культура не является токсикотолерантной по отношению к свинцу. Примечательно, что наличие в почве повышенного количества Cd усиливало фитотоксическое воздействие цинка в отношении пшеницы, тогда как монозагрязнение цинком не проявляло токсического эффекта. Совместное ингибирующее воздействие Zn и Cd на прорастание семян и рост зеленых проростков пшеницы установлено и в исследованиях [15]. Описанные тенденции сохранились и в отношении всхожести семян, для которой максимальные токсические эффекты фиксировались при полиэлементном загрязнении почвы Zn, Pb, Cd и монозагрязнении Pb.

Таблица 2. Фитотоксичность тяжелых металлов для сельскохозяйственных культур

Вариант опыта	Тест-функция							
	Энергия прорастания семян, %		всхожесть семян, %		длина зеленых проростков, см		длина корней у проростков, см	
	1	2	1	2	1	2	1	2
Озимая пшеница (<i>Triticum aestivum</i> L.)								
1	32,0	-36,0	65,2	-22,8	24,80	-0,28	22,07	-1,26
2	35,8	-32,2	68,0	-20,0	24,96	-0,12	22,05	-1,28
3	68,0	0,0	80,3	-7,7	24,22	-0,86	20,61	-2,72
4	40,0	-28,0	55,8	-32,2	23,04	-2,04	17,93	-5,40
5	56,0	-12,0	72,3	-15,7	24,01	-1,07	25,78	2,45
6	48,2	-19,8	75,8	-12,2	23,72	-1,40	19,88	-3,45
7	32,0	-36,0	32,2	-55,8	23,68	-1,36	19,78	-3,55
Контроль	68,0	–	88,0	–	25,08	–	23,33	–
Стандартная ошибка	1,88		1,62		1,20		1,44	
Значимая разность	4,46		3,84		1,85		3,41	
Яровой ячмень (<i>Hordeum vulgare</i> L.)								
1	23,3	-15,4	30,7	-49,6	19,25	-1,08	20,02	-3,16
2	17,3	-21,4	22,0	-58,3	17,03	-3,30	16,78	-6,40
3	24,7	-14,0	30,0	-50,3	18,72	-1,61	18,46	-4,72
4	22,0	-16,7	29,3	-51,0	17,99	-2,34	18,67	-4,51
5	28,0	-10,7	34,0	-46,3	18,41	-1,92	19,85	-3,33
6	44,7	6,0	54,0	-26,3	18,45	-1,88	21,03	-2,15
7	18,0	-20,7	26,7	-53,6	16,89	-3,44	18,21	-4,97
Контроль	38,7	–	80,3	–	20,33	–	23,18	–
Стандартная ошибка	2,91		2,79		1,19		1,23	
Значимая разность	6,90		6,62		2,83		2,91	
Горох (<i>Pisum sativum</i> L.)								
1	14,4	-18,3	24,0	-16,0	6,29	-1,33	3,07	-3,12
2	35,3	2,6	33,3	-6,7	8,69	1,07	8,11	1,92
3	24,7	-8,0	32,0	-8,0	8,56	0,94	6,59	0,40
4	17,3	-15,4	30,7	-9,3	8,37	0,75	7,53	1,34
5	24,0	-8,7	31,3	-8,7	8,35	0,73	6,74	0,55
6	38,7	6,0	38,0	-2,0	8,60	0,98	6,88	0,69
7	15,3	-17,4	28,0	-12,0	6,62	-1,00	3,37	-2,82
Контроль	32,7	–	40,0	–	7,62	–	6,19	–
Стандартная ошибка	2,86		2,79		0,28		0,33	
Значимая разность	6,78		6,57		0,66		0,78	
Кресс-салат (<i>Lepidium sativum</i> L.)								
1	78,5	-6,5	86,8	-7,6	4,49	-1,03	5,21	0,81
2	83,9	-1,1	88,7	-5,7	6,73	1,22	7,21	2,81
3	89,0	4,0	92,0	-2,4	7,22	1,71	5,44	1,04
4	83,0	-2,0	92,0	-2,4	7,32	1,81	6,75	2,35
5	83,2	-1,8	95,0	0,6	7,45	1,94	6,36	1,96
6	83,1	-1,9	92,0	-2,4	7,51	2,00	7,45	3,05
7	70,7	-14,3	78,5	-15,9	3,71	-1,80	6,00	1,60
Контроль	85,0	–	94,4	–	5,51	–	4,40	–
Стандартная ошибка	2,48		2,38		0,29		0,23	
Значимая разность	5,87		5,64		0,69		0,55	

Примечание. 1 – фактическое значение показателя; 2 – +/- к контролю.

Полиэлементное загрязнение почвы Zn, Pb и Cd оказывало токсический эффект и в отношении начальных показателей роста, проявляющийся в снижении длины корней проростков озимой пшеницы на 15 % (в относительных величинах) по сравнению с контролем. Наиболее сильное токсическое воз-

действие на корни озимой пшеницы в начальные фазы ее роста оказывало монозагрязнение почвы свинцом, при котором фиксировалось достоверное снижение длины корней проростков на 23 % (в относительных величинах). Токсическое воздействие Pb на корневую систему озимой пшеницы проявляется в подавлении интенсивности роста корней из-за ингибирования процесса деления клеток в кончике корня, [16, 17], а в условиях Pb-стресса из-за активации определенных ферментов происходит механическое растяжение и повреждение клеточной стенки корней пшеницы [18].

Ячмень яровой не является токсикотолерантной культурой, а особенности фитотоксического воздействия на него тяжелых металлов сходны с таковыми для озимой пшеницы, однако проявляются в большей степени. Достоверное снижение показателей прорастания семян ячменя фиксировалось для всех вариантов за исключением монозагрязнения почвы цинком, а максимальный токсический эффект на энергию прорастания и всхожесть семян данной культуры оказывало полиэлементное загрязнение почвы медью, цинком, свинцом и кадмием. Важно отметить, что проявление токсического эффекта в отношении семян зависело от срока воздействия поллютантов и достигало максимума на 5-й день экспозиции. В отличие от озимой пшеницы ячмень яровой не проявлял толерантности в отношении загрязнения почвы Cu. Причиной этого, на наш взгляд, является то, что при избытке меди в ризосфере уменьшается количество корневых волосков и снижается длина корней, что приводит к неспособности растений поглощать в необходимом количестве воду и элементы питания из почвы, следствием чего является остановка развития, что и проявляется в снижении длины побегов и корней. Данное положение подтверждено и в исследованиях [19, 20]. Как и у озимой пшеницы, фитотоксический эффект в отношении корней проростков ячменя ярового проявлялся более сильно, чем в отношении зеленых проростков. Максимальное снижение длины корней, составляющее 27,6 %, было зафиксировано при полиэлементном загрязнении почвы Cu, Zn и Pb на уровне, превышающем фоновые значения в 6–10 и более раз. Кадмий также оказывал токсическое воздействие на семена и растения ячменя в начальные фазы их роста и развития, вызывая снижение всхожести на 62 % и длины корней у проростков на 13,6 % (в относительных величинах). Монозагрязнение почвы свинцом на уровне, кратном 10 и более фоновым, вызывало достоверный токсический эффект как в отношении семян, так и в отношении проростков ячменя.

В случае полиэлементного загрязнения почвы цинком, свинцом и кадмием ее фитотоксический эффект в отношении гороха проявлялся довольно значительно, достигая максимального уровня там, где в почве фиксировались количества Cd, превышающие фоновое значение в 9 и более раз. Кроме того, наличие в почве повышенного количества Cd усиливало фитотоксическое воздействие Zn, что соотносится с исследованиями [15, 21]. При дальнейшем развитии растений гороха фитотоксический эффект сохранялся только в вариантах, где в почве совместно присутствовали Zn, Pb и Cd: снижение длины корней и зеленых проростков достигало 45,6–50,4 % и 13,1–17,5 % (в относительных величинах). При этом более сильно токсический эффект проявлялся в отношении корней растений гороха, причиной чего является ограничение тяжелыми металлами мобилизации питательных веществ из семядолей, на что указывают и результаты других исследований [22, 23]. Исходя из этого, проростки гороха, появившиеся в почвах, подвергшихся полизагрязнению тяжелыми металлами (Zn, Pb, Cd), вероятно, будут иметь плохо развитую корневую систему, что ограничит их способность поглощать питательные вещества и влагу из почвы и будет препятствовать их дальнейшему росту. Примечательно, что монозагрязнение почвы медью в количествах, эквивалентных 2–8 фоновым, не оказывало токсического воздействия на прорастание семян гороха и рост его проростков. Устойчивость данной культуры к загрязнению почвы Cu, очевидно, связана с ее биологическими особенностями, поскольку в состав гороха входит значительное количество белка, на синтез которого непосредственно и влияет медь, необходимая бобовым культурам в повышенных количествах [19].

Установлено, что кресс-салат устойчив к высоким концентрациям тяжелых металлов, их низкие концентрации в почве не оказывают заметного ингибирующего воздействия на его растения, а ионы металлов в этом случае ведут себя как микроэлементы [24]. Об этом свидетельствует, в частности, наличие достоверного стимулирования роста корней и зеленых проростков данной культуры и отсутствие каких-либо отрицательных физиологических эффектов, в частности хлороза семядолей, на всех вариантах не зависимо от концентрации тяжелых металлов в почве. Тем не менее тяжелые металлы, особенно Cd, снижают устойчивость растений *L. sativum* L. к водному стрессу. Поскольку водопоглощение является основным условием, необходимым для прорастания его семян, негативное воздействие данного металла на содержание в них воды довольно значительно [25, 26]. Именно этот факт объясняет наличие достоверного снижения энергии прорастания и всхожести семян кресс-

салата на 7,6–8,0 % (в относительных величинах) соответственно на вариантах, где в почве содержался кадмий в количествах, кратных 5–10 фоновым.

Результаты определения индекса скорости прорастания семян свидетельствуют о том, что максимальный фитотоксический эффект у озимой пшеницы вызывало полиэлементное загрязнение почвы, кратное 5 фоновым содержаниям меди и кадмия, 6,6 фоновым содержаниям свинца и 109 фоновым содержаниям цинка (рис. 1а).

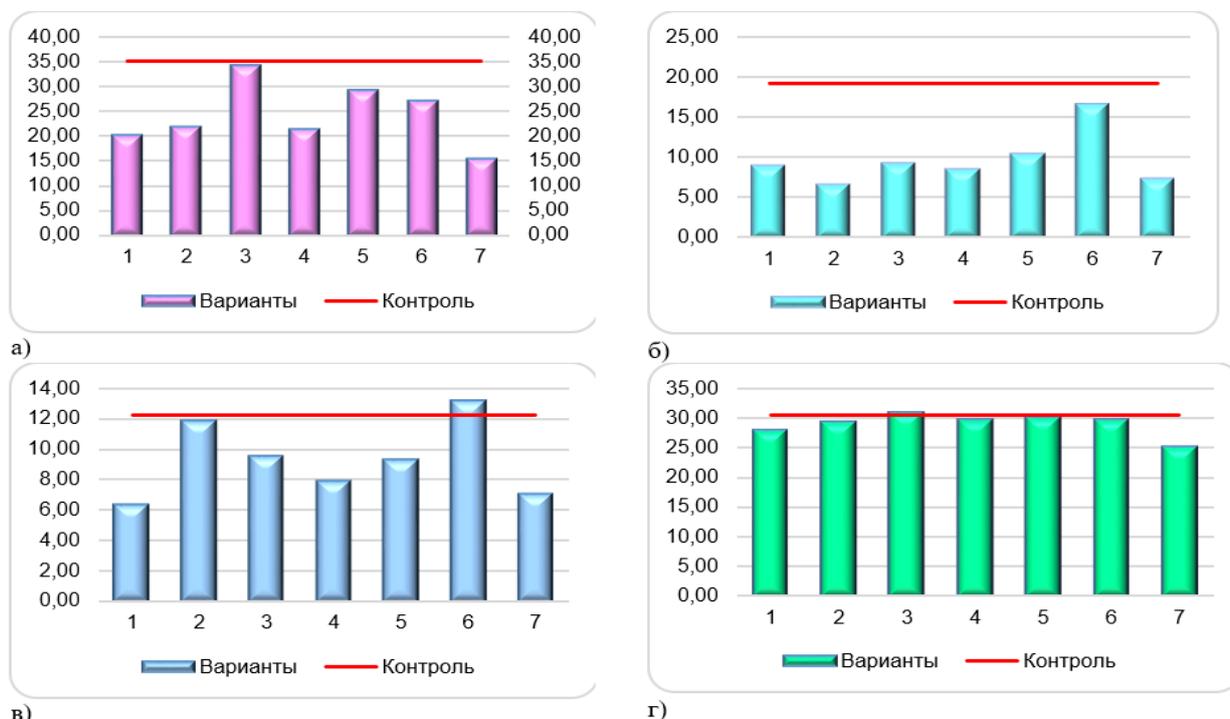


Рис. 1. Индекс скорости прорастания семян (GRI) (а – озимая пшеница; б – яровой ячмень; в – горох; г – кресс-салат) (характеристики вариантов опыта указаны в табл. 1)

Для ячменя ярового фитотоксичность проявлялась на всех вариантах, достигая максимальных показателей при полиэлементном загрязнении почвы Cu, Zn, Pb, Cd на уровне 5 фоновых значений и выше (рис. 1б). Аналогичная тенденция прослеживалась и в отношении индекса скорости прорастания семян гороха (рис. 1в), однако, на варианте с содержанием меди на уровне выше 8 фоновых значений данный показатель превышал значение на контроле, что свидетельствует о стимулирующем воздействии меди, которую при содержании в урбаноэме в указанных пределах можно трактовать не как загрязнитель, а как эссенциальный микроэлемент. Кресс-салат оказался наиболее устойчивым к полиэлементному загрязнению, а индекс скорости прорастания его семян был ниже контрольных значений только в двух вариантах (рис. 1г).

Однозначно можно утверждать, что при использовании в качестве субстрата естественной почвы, а не штучно смоделированного субстрата, кресс-салат нецелесообразно использовать в качестве тест-объекта при оценке фитотоксичности, поскольку индекс всхожести его семян на всех вариантах превышал 100 %, что свидетельствует о стимулирующем воздействии тяжелых металлов в исследуемых количествах на прорастание семян и начальный рост и развитие данной культуры. Максимальный стимулирующий эффект был отмечен на варианте с содержанием в почве цинка, кратным 176 фоновым (рис. 2). Данный факт объясняется тем, что представители ботанического семейства *Brassicaceae*, к каковым относится и *L. sativum*, принадлежат к гипераккумуляторам цинка и являются токсикотолерантными к данному тяжелому металлу.

Культурные растения – представители семейства *Fabaceae*, к каковым принадлежит и горох, относятся к устойчивым к загрязнению тяжелыми металлами [2, 27]. Данное положение полностью подтверждается полученными результатами, поскольку только на двух вариантах опыта было зафиксировано значение GI, соответствующее высокой фитотоксичности, тогда как на остальных вариантах она отсутствовала, а в случае наличия в почве высоких концентраций меди и цинка наблюдалось стимулирующее воздействие субстрата на прорастание и начальный рост семян гороха.

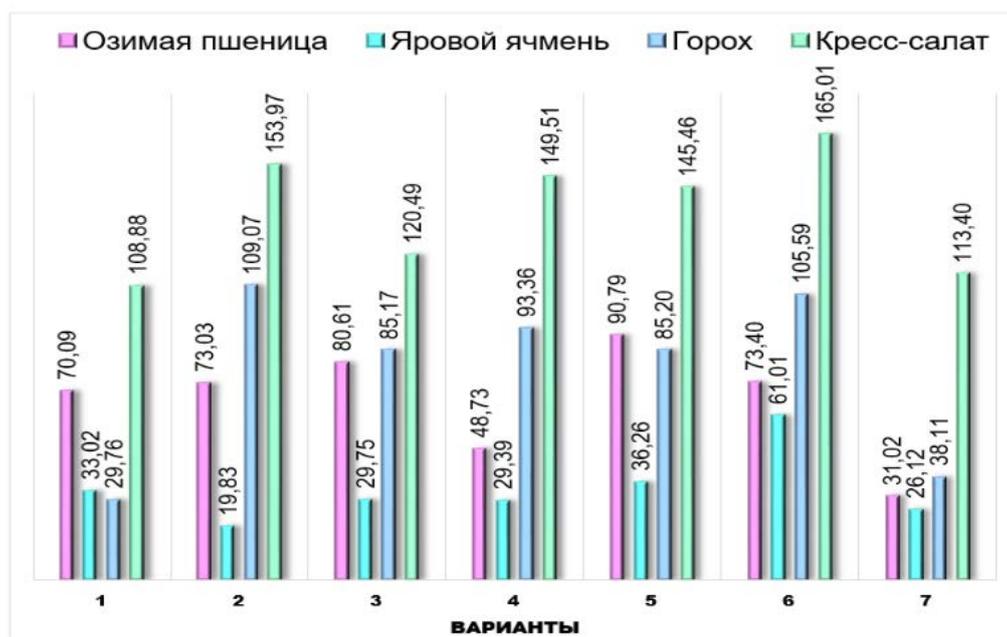


Рис. 2. Индекс всхожести семян (GI) (характеристики вариантов опыта указаны в табл. 1)

Достаточно токсикотолерантной оказалась и озимая пшеница, негативное воздействие на начальный рост и развитие которой оказывало только совместное наличие в почве высоких концентраций цинка и свинца. Ячмень яровой оказался наиболее восприимчивым к фитотоксическому воздействию тяжелых металлов во всех исследуемых концентрациях. Только на варианте, где почва подверглась монозагрязнению свинцом, было установлено среднее фитотоксическое воздействие ($GI=61\%$), тогда как для остальных вариантов оно было оценено как высокое, а индекс всхожести семян варьировал от $19,8\%$ до $36,3\%$.

Заключение

Результаты выполненных исследований дают основания для следующих выводов: 1) как моно- так и полиэлементное загрязнение почвы тяжелыми металлами способно оказывать фитотоксическое воздействие на сельскохозяйственные культуры, сила и характер направленности которого зависят как от вида и дозы поллютанта, так и от биологических особенностей самого растения; 2) для озимой пшеницы и ярового ячменя максимальный токсический эффект в отношении энергии прорастания и всхожести семян фиксируется при полиэлементном загрязнении почвы Zn, Pb, Cd и ее монозагрязнении Pb, кратном 10-ти и более фонам, которое оказывало и наиболее сильное фитотоксическое воздействие на корни озимой пшеницы в начальные фазы ее роста; 3) горох является токсикотолерантным к загрязнению почвы медью, а максимальное токсическое воздействие на данную культуру оказывает кадмий; при этом более сильно токсический эффект проявляется в отношении корней, причиной чего является ограничение тяжелыми металлами мобилизации питательных веществ из семядолей; 4) кресс-салат устойчив к высоким концентрациям тяжелых металлов, а их низкие концентрации в почве не оказывают заметного ингибирующего воздействия на его растения, о чем свидетельствует наличие достоверного стимулирования роста корней и зеленых проростков данной культуры и отсутствие каких-либо отрицательных физиологических эффектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мислива, Т. М. Вплив комплексного забруднення важкими металами на фітотоксичність та біологічну активність дерново-підзолистого ґрунту / Т. М. Мислива, Р. А. Валерко, І. В. Ющенко // Наука. Молодь. Екологія – 2007: зб. матеріалів III міжвуз. наук.-практ. конф. студ., аспірантів та молодих вчених, 24–25 травня 2007 р. – Житомир, 2007. – С. 85–88.
2. Араратян, Л. А. Особенности распределения тяжелых металлов в растениях и некоторые экологические аспекты их изучения / Л. А. Араратян, Б. Х. Межунц // Тяжелые металлы, радионуклиды и элементы-биофилы в окружающей среде: тезисы докладов II междунар. науч.-практ. конф., 16–18 окт. 2002 г.: [В 2 т. / Под науч. ред. М. С. Панина]. – Семипалатинск: СГУ, 2002. – Т. 2. – С. 60–64.
3. Кабата-Пендиас, А. Микроэлементы в почвах и растениях / А. Кабата-Пендиас, Х. Пендиас; пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 439 с.
4. Heavy metal concentration (Pb, Cu, Fe, Zn, Ni) in plant parts of *Zea mays* L. cultivated in agricultural area Near Alor Gajah, Melaka, Malaysia / K.N. Ibrahim, Z.R. Yet, A.M. Som // American Journal of Environmental Engineering. – 2015. – Vol. 5(3A). – P. 8–12.

5. Мислива, Т. М. Вплив комплексного забруднення важкими металами на фітотоксичність дерново-підзолистого ґрунту / Т. М. Мислива, Р. А. Валерко // Вісник ДАУ. – 2006. – № 2. – С. 28–36.
6. Мысльва Т. Н. Влияние моно- и полиметаллического загрязнения на фитотоксичность серой оподзоленной почвы для представителей семейства Fabaceae / Т. Н. Мысльва // Вестник ФГОУ ВПО Брянская ГСХА. – 2016. – №6 (58). – С. 3–9.
7. Гуральчук, Ж. З. Фітотоксичність важких металів та стійкість рослин до їх дії / Ж. З. Гуральчук. – К.: Логос, 2006. – 208с.
8. Мысльва, Т. Н. Трансформация экологических функций дерново-подзолистой почвы, загрязненной тяжелыми металлами / Т. Н. Мысльва, Р. А. Валерко, Ю. А. Белявский // Актуальные вопросы сельского хозяйства: межвузовский сб. науч. тр. Калининград: Изд-во ФГОУ ВПО «КГТУ», 2007. – С. 46–54.
9. Убугунов, В. Л. Оценка фитотоксичности кадмия в каштановой почве / В. Л. Убугунов, В. О. Доржонова // Вестник Крас. ГАУ. – 2010. – №5. – С. 13–17.
10. Агрохимическая характеристика почв сельскохозяйственных земель Республики Беларусь (2013–2016 гг.) / И. М. Богдевич [и др.]; под общ. ред. И. М. Богдевича. – Минск: Ин-т почвоведения и агрохимии, 2017. – 275 с.
11. Васильева, Л. И. Техногенная составляющая тяжелых металлов в почвах Беларуси / Л. И. Васильева, Н. И. Тановицкая // Литосфера. – 2001. – №2(15). – С. 137–143.
12. Якість ґрунту. Визначання дії забрудників на флору ґрунту. Ч. 1: Метод визначення гальмівної дії на ріст коренів: ДСТУ ISO 11269-1:2004. – Введ. 01.07.2005. – К.: Держстандарт України, 2005. – 23 с.
13. Dunnett, C. W. A multiple comparison procedure for comparing several treatments with control / C. W. Dunnett // Journal of the American Statistical Association. – 1985. Vol. 50, № 272. – P. 1096–1121.
14. Phytotoxins during the stabilization of organic matter / Zucconi F., Monaco A., Forte M., De Bertoldi M. / In: Composting of agricultural and other wastes. – London: Elsevier, 1985. – P. 73–85.
15. Impact of zinc uptake on morphology, physiology and yield attributes of wheat in Pakistan / H. F. Kirmani, M. Hussain, F. Ahmad [et al] // Cercetari Agronomice în Moldova. – 2018. – Vol. 51. P. 29–36.
16. Samardakiewicz, S. Cell division in Lemna minor roots treated with lead / S. Samardakiewicz, A. Wozny // Aquatic Botany. – 2005. – Vol. 83. – P. 289–295.
17. Eun, S. O. Lead disturbs microtubule organization in the root meristem of Zea mays / O. Eun, H. S. Youn, Y. Lee // Physiologia Plantarum. – 2000. – Vol. 103. – P. 665–702.
18. Lead (Pb)-induced biochemical and ultrastructural changes in wheat (Triticum aestivum) roots / G. Kaur, H. P. Singh, D. R. Batish, R. K. Kohli // Protoplasma. – 2013. – Vol. 250. – P. 53–62.
19. Герасимчук, Л. О. Вплив моно- та поліметалічного забруднення на фітотоксичність дерново-підзолистого ґрунту / Л. О. Герасимчук // Вісник Харківського національного аграрного університету імені В. В. Докучаєва. Сер. Ґрунтознавство, агрохімія, землеробство, лісове господарство, екологія ґрунтів. – 2010. – №1. – С. 188–194.
20. Tariq, M. Toxic effects of heavy metals on early growth and tolerance of cereal crops / M. Tariq, I. Rafiq, M. And // Pakistan Journal of Botany. – 2007. – Vol. 39. – 451–462.
21. Studies on selected heavy metals on seed germination and plant growth in pea plant (Pisum sativum) grown in solid medium / M. Kunjam, H. Govada, N. Mididoddi, R. Kota // Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry. – 2015. – Vol. 3(5). – P. 85–87.
22. Deswal, M. Effect of heavy metals cadmium, nickel and lead on the seed germination and early seedling growth of Pisum sativum / M. Deswal, J. S. Laura // Life Science Informatics Publication. – 2018. – Vol. 4(2). – P. 368.
23. Hirve, M. Effect of Cadmium exposures on growth and biochemical parameters of Vigna radiata seedlings / M. Hirve, A. Bafna // International Journal of Environmental Sciences. – 2013. – Vol. 4. – P. 312–322.
24. Effects of heavy metals on Lepidium sativum germination and growth / L. Pavel, D. Sobariu, M. Diaconu [et al] // Environmental Engineering and Management Journal. – 2013. – Vol. 12. – P. 727–733.
25. Heavy metal-induced oxidative stress on seed germination and seedling development: a critical review / M. Seneviratne, N. Rajakaruna, M. Rizwan // Environmental Geochemistry and Health. – 2017. – Vol. 41(4). – P. 1813–1831.
26. An ecotoxicological evaluation of soil fertilized with biogas residues or mining waste / K. Różyło, P. Oleszczuk, I. Joško [et al] // Environmental Science and Pollution Research. – 2015. – Vol. 22. – P. 7833–7842.
27. Школьник, М. Я. Микроэлементы в жизни растений / М. Я. Школьник. – Л., 1974. – 342 с.