

**ФИТОТОКСИЧНОСТЬ ПОЧВОСУБСТРАТОВ НА ОСНОВЕ ШЛАКОВ
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В РЕКУЛЬТИВАЦИИ**© 2018 г. И.П. Беланов, О.А. Савенков, Н.Б. Наумова *Адрес: ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН,
проспект Академика Лаврентьева, 8/2, г. Новосибирск, 630090, Россия. E-mail: bel_ivan@rambler.ru*

Цель исследования. Оценка влияния различного рода шлаков, образуемых в ходе металлургического производства, на начальные этапы роста и развития растений.

Место и время проведения. Опыт проводили в лабораторных условиях. В течение 2-х недель для выращивания тест-культур поддерживали благоприятный режим температуры, влажности и световой период с интенсивностью света до 1500 люкс.

Методология. Для проведения тестирования шлаков металлургического производства на фитотоксичность опирались на ГОСТ Р ИСО 22030-2009. Для исследований использовали один вид однодольных растений (овес *Avena sativa* L. сорта Ровесник) и один вид двудольных растений (редис *Raphanus sativus* var. *Sativus* сорта Сакса РС). Для исследования использовали четыре основных вида шлака, получаемых ЕВРАЗ ЗСМК при различных технологиях плавки металла: шлак белый обезжелезненный, шлак доменный (мартеновский), шлак электросталеплавильный и шлак конверторный. Концентрация шлаков в почвенно-шлаковых смесях, использованных в качестве ростовых субстратов составляла 0% (почва); 12,5; 25; 50 и 100% (чистый шлак). Для статистического анализа полученных данных использовали методы описательной статистики и корреляционного анализа.

Основные результаты. При выращивании растений редиса и овса фитотоксичность не была выявлена у щебня шлакового электросталеплавильного при любых концентрациях этого шлака в тестируемой почвенно-шлаковой смеси и в чистом виде. Шлак белый обезжелезненный при тестировании и с овсом, и с редисом проявил фитотоксичность в чистом виде и в 50%-ной концентрации. Щебень шлаковый конверторный и щебень шлаковый доменный проявили фитотоксичность в концентрациях 50 и 100% при тестировании с овсом, и только в чистом виде – при тестировании с редисом.

Заключение. На ранних стадиях развития растений три из четырех изученных шлаков металлургического производства проявили фитотоксичность только при очень высоких концентрациях в ростовых субстратах. Для отработки перспективных технологий вовлечения шлаков при рекультивации рекомендуем проведение более длительных вегетационных и полевых опытов при значительно меньших концентрациях шлаков в субстратах и с использованием растений, которые могут быть реально использованы для целей конкретной рекультивации, например, бобово-злаковых, бобово-злаково-разнотравных смесей, а также древесно-кустарниковых культур.

Ключевые слова: шлаки металлургического производства; фитотоксичность; смеси почвы и шлаков; редис; овес

Цитирование: Беланов И.П., Савенков О.А., Наумова Н.Б. Фитотоксичность почвосубстратов на основе шлаков металлургического производства, используемых в рекультивации // Почвы и окружающая среда. 2018. № 1(2). С.67–79.

ВВЕДЕНИЕ

Утилизация, консервация и рециклинг различного рода отходов с каждым годом становятся все более актуальными. Одним из основных источников накопления крупнотоннажных объемов отходов является металлургическое производство. В настоящее время данная проблема наиболее ярко выражена для Кемеровской области – одного из крупных центров металлургического производства, расположенного в Западной Сибири. Существующие технологии позволяют вовлекать шлаки металлургического производства в различные отрасли народного хозяйства. Например, эти отходы используют в качестве материала при строительстве дамб, дорожной одежды и тротуаров (Gökalp et al., 2018), отсыпки оснований зданий и сооружений (Левкович и соавт., 2017; Boltakova et al., 2015; Степанова, Акулова, 2017), заполнения отработанных карьерных и шахтных выработок, как добавки в строительные смеси (Markandeya et al., 2018), как удобрения, содержащие Са и Mg, как мелиоранты,

особенно для повышения pH и снижения подвижности алюминия (Li et al., 2010), и т.п. (Боброва и др., 2015). Шлаки можно использовать для рекультивации токсичных техногенных объектов: хвостохранилищ обогатительных фабрик, полигонов захоронения ТБО и других, поскольку при проведении горно-технического этапа рекультивации этих объектов требуется использование различного рода инертных материалов (Gawog, Jonczy, 2015). Кроме собственно защиты окружающей среды и ресурсов благодаря разнообразному использованию шлаков черной металлургии, такое использование имеет и большое экономическое значение (Шамари, 2015).

Вовлечение различного рода отходов, в том числе шлаков металлургического производства, требует изучения воздействия этих отходов на объекты окружающей среды. Оценка фитотоксичности, т.е. способности отходов подавлять рост и развитие растений, является одним из основных методов оценки воздействия отходов на живые организмы и определяющее перспективы использования данного материала в рекультивации.

Целью данной работы было изучить влияние различного рода шлаков, образуемых в ходе металлургического производства, на начальные этапы роста и развития растений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Тест-растения. Для проведения тестирования шлаков металлургического производства на фитотоксичность в работе руководствовались ГОСТ Р ИСО 22030-2009. Для исследований использовали один вид однодольных растений (овес *Avena sativa* L. сорта Ровесник) и один вид двудольных растений (редис *Raphanus sativus* var. *Sativus* сорта Сакса РС). Благоприятной средой обитания для тест-растений являются песчаные и суглинистые почвы с pH в диапазоне от 5,0 до 7,5 и с различной влажностью.

Всхожесть семян *in vitro*, т.е. в лабораторных условиях в чашках Петри, составляла 100% для редиса и 80% для овса, в дальнейшем это учитывалось при посеве и анализе.

Количество семян и прорезживание. С учетом возможности непрорастания некоторых семян в каждый инкубационный сосуд объемом 250 мл высевали 30 семян редиса. Семена растений брали кончиками пинцета и закладывали их в субстрат непосредственно на требуемую глубину, т.е. 2-3 мм для редиса и 10-15 мм для овса.

Условия выращивания. Растения росли при комнатной температуре 22-23°C и умеренной влажности. Для обеспечения условий нормального роста и развития растений поддерживали 16-часовой световой день при интенсивности света 1500 люкс и 8 часов темноты. Для предотвращения влияния неравномерного освещения, температуры, влажности или вентиляции на рост тест-растений испытательные сосуды регулярно (два-три раза в неделю) переставляли случайным образом.

После появления всходов и по истечении 1 недели роста и развития подсчитывали число растений в каждом сосуде с почвенно-шлаковыми смесями и с контрольной почвой и выражали это число в процентах от среднего количества растений в сосудах с контрольной почвой. По истечении 2 недель роста и развития наряду с числом растений определяли сырую надземную фитомассу путем срезания растений над поверхностью субстрата и взвешиванием.

Шлаки. Тестирование на фитотоксичность проводили со шлаками, получаемыми при производстве металла на Западносибирском металлургическом комбинате ЕВРАЗ. Щебень шлаковый электросталеплавильный (далее обозначаемый Э), щебень шлаковый белый обезжелезненный (печь-ковш, далее – Б), щебень шлаковый конвертерный (К) и щебень шлаковый доменный (Д). Каждый из шлаков прошел предварительную обработку на предприятии ООО «Технологии рециклинга», включающую разрушение спекшейся массы при помощи щековых дробилок, сортировку от включений металла и калибровку на трехъярусных грохотах. В опыте был использован щебень шлаковый фракции 0,5-1,5 см, который по заключению компании-переработчика относится к IV классу опасности.

Некоторые химические свойства шлаков представлены в табл.1.

Почва. В качестве контрольного субстрата использовали незагрязненный плодородный слой агротемно-серой почвы среднесуглинистый, некоторые химические свойства которой представлены в табл.1.

Почвенно-шлаковые смеси. В соответствии с рекомендациями ГОСТ Р ИСО 22030-2009 готовили почвенно-шлаковые смеси с контрольной почвой. В опыте были использованы следующие доли внесения шлака от массовой доли почвы: 0%, 12,5%, 25%, 50% и 100% шлака. Для получения смесей контрольную почву и шлак перемешивали вручную до достижения гомогенности под визуальным контролем.

Таблица 1. Некоторые химические свойства тестируемых шлаков и почвы, используемой в качестве контроля и для приготовления смесей со шлаками

Вид субстрата	C _{орг} , %	P ₂ O ₅ , мг/кг почвы	K ₂ O, мг/кг почвы	ЕКО, мг-экв/100г почвы	pH _{водн}	N _{общ} , %	CaO, %	MgO, %
щебень шлаковый электростале-плавильный	0,58	66	16	5,80	11,52	0,06	30,80	12,62
шлак белый обезжелезненный (печь-ковш)	0,46	1	18	4,20	11,59	0,08	57,20	7,09
щебень шлаковый конвертерный	0,83	2	35	8,10	11,69	0,06	32,70	8,74
щебень шлаковый доменный	1,51	33	98	12,30	10,67	0,14	30,90	12,0
почва	6,80	240	510	н.о.	5,84	0,37	0,40	0,10

Примечание: н.о. – не определено

Смеси почвы и шлаков выдерживали при комнатной температуре не менее двух дней для установления кислотного равновесия. Для определения pH смесей за 1-2 дня до начала тестирования их увлажняли добавлением воды до достижения примерно половины требуемой конечной влажности в 40-60% полной влагоемкости, т.е. приблизительно 50% влажности в расчете на сухое вещество. Перед высевом семян конечную влажность почвы соответствующим количеством воды.

Статистическая обработка. Полученные данные анализировали методами описательной статистики, дисперсионного анализа и анализа главных компонент с помощью пакета статистических программ *Statistica v.6.1*.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Тестирование с редисом. Число проросших семян и дальнейшее развитие растений варьировали в зависимости от шлака и его количества в смеси.

Шлак электросталеплавильный. На шлаке Э доля проросших семян в смесях с концентрацией шлака 50 и 100% достоверно превышала таковую в контрольной почве и в смесях с более низкой концентрацией (табл. 2, рис. 1). По прошествии 1 и 2 недель роста и развития растений редиса эти различия исчезали (рис. 2), т.е. шлак Э не проявлял никакой фитотоксичности по отношению к этому виду тест-растений как по числу растений, так и по фитомассе через 2 недели (табл. 3).

Таблица 2. Число растений редиса на субстратах с различными шлаками

Шлак, % в смеси	Всходы, шт.	Всходы, % *	1 неделя, % *	2 недели, % *
1	2	3	4	5
Шлак электросталеплавильный				
100	28 ± 1 б**	147 ± 5 б	123 ± 8 а	120 ± 6 а
50	25 ± 2 б	133 ± 8 б	107 ± 8 а	105 ± 10 а
25	19 ± 2 а	100 ± 10 а	95 ± 11 а	96 ± 11 а
12,5	14 ± 1 а	77 ± 7 а	100 ± 18 а	107 ± 21 а
0***	19 ± 1 а	100 а	100 а	100 а
Шлак белый обезжелезненный				
100	10 ± 2 с**	52 ± 9 с	93 ± 14 б	113 ± 12 б
50	4 ± 1 а	21 ± 3 а	52 ± 2 а	52 ± 6 а
25	8 ± 1 bc	44 ± 8 bc	77 ± 7 а	71 ± 7 а
12,5	26 ± 1 е	138 ± 8 е	139 ± 12 с	132 ± 9 с
0***	19 ± 1 d	100 d	100 б	100 б
Шлак конверторный				
100	24 ± 2 с**	202 ± 15 с	88 ± 9 а	98 ± 1 а
50	3 ± 1 а	26 ± 9 а	121 ± 12 б	144 ± 15 б
25	12 ± 2 б	102 ± 13 б	96 ± 5 а	104 ± 2 а
12,5	10 ± 4 ba	83 ± 33 б	95 ± 4 а	104 ± 10 а
0***	12 ± 2 б	100 б	100 а	100 а

1	2	3	4	5
Шлак доменный				
100	23 ± 1 с	200 ± 3 с	72 ± 5 а	76 ± 5 а
50	9 ± 3 б	74 ± 33 б	130 ± 11 bc	138 ± 12 bc
25	2 ± 0 а	14 ± 7 а	140 ± 19 с	142 ± 16 с
12,5	2 ± 0 а	14 ± 3 а	119 ± 20 bc	126 ± 18 bc
0***	12 ± 2 б	100 б	100 ab	100 ab

Примечание:

* доля (в процентах) от контроля, т.е. почвы без добавления шлака;

** разные буквы в столбцах обозначают, что значения различны на уровне значимости $P \leq 0,05$;

*** контрольная почва без добавления шлака.

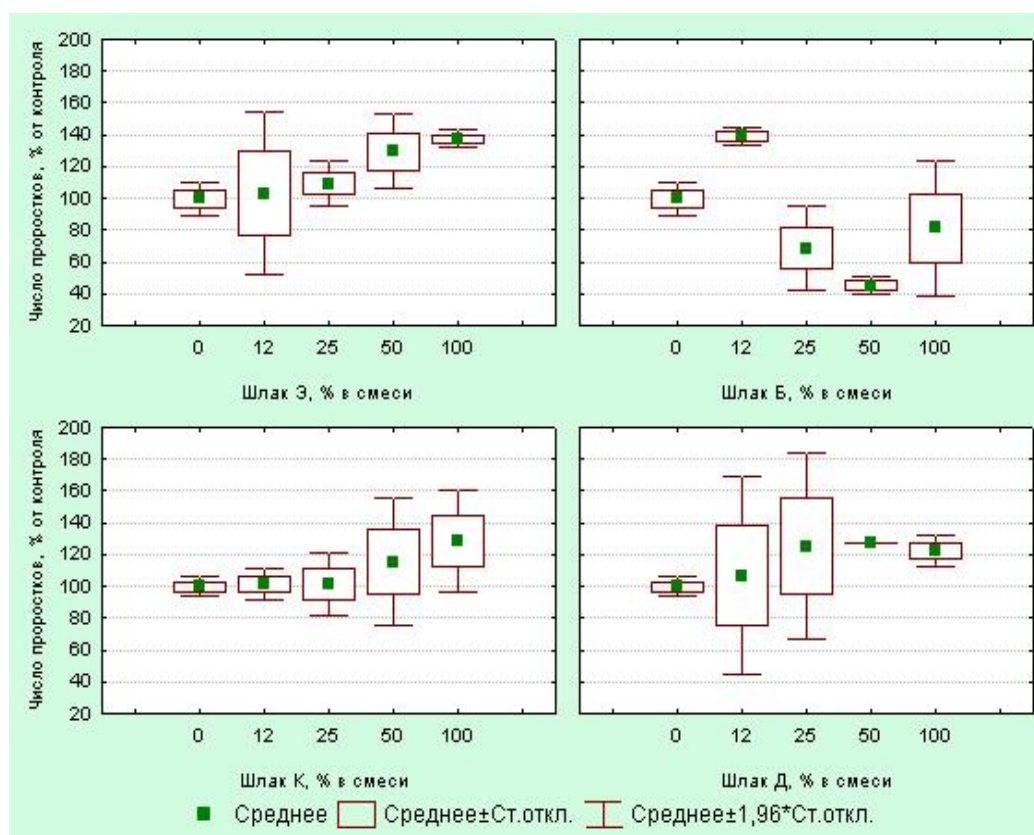


Рисунок 1. Число проросших семян редиса, выраженное в процентах от числа семян, проросших на контроле (почвы без примеси шлака)

Таблица 3. Надземная фитомасса редиса на разных почвенно-шлаковых смесях и контрольной почве, г/сосуд

Шлак, % в смеси	Шлак Э	Шлак Б	Шлак К	Шлак Д
100	0,60 (72*) a**	0,56 (67) а	0,44 (53) а	0,34 (46) а
50	0,99 (119) а	0,49 (59) а	1,19 (144) с	1,16 (156) с
25	0,85 (103) а	0,65 (79) ab	0,84 (101) b	1,17 (158) с
12,5	0,87 (105) а	1,03 (124) с	0,72 (87) b	0,88 (120) bc
0***	0,83 (100) а	0,83 (100) б	0,74 (100) b	0,74 (100) b

Примечание:

* в скобках доля (в процентах) от контроля, т.е. на почве без добавления шлака;

** разные буквы в столбцах обозначают, что значения различны на уровне значимости $P \leq 0,05$;

*** контрольная почва без добавления шлака.

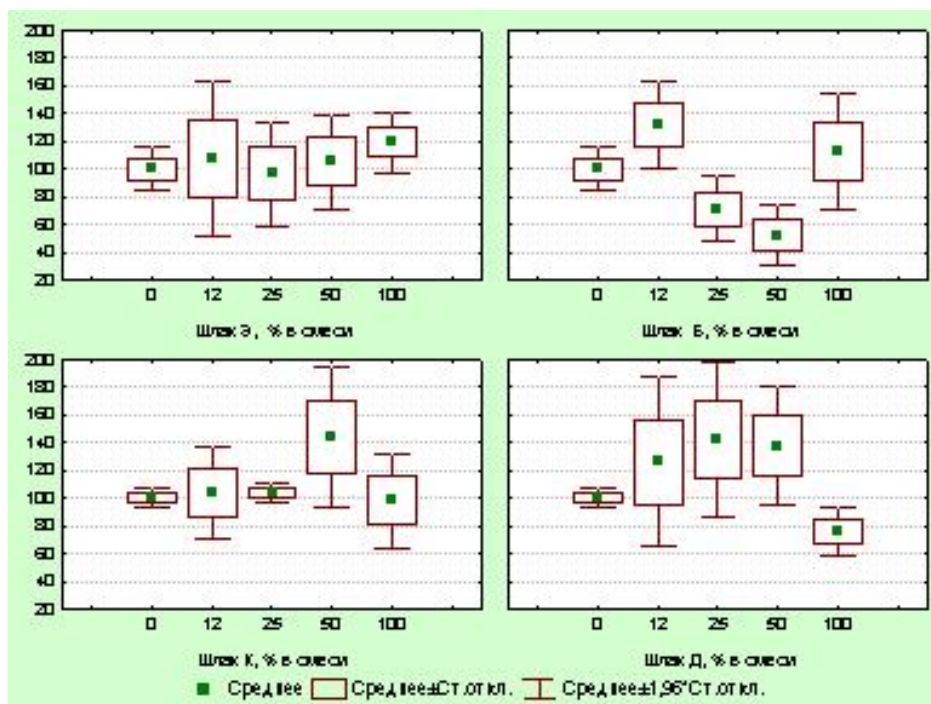


Рисунок 2. Число растений редиса, растущих на почвенно-шлаковых смесях через 2 недели после посева, в процентах от контроля (почвы без добавления шлака)

Шлак белый обезжелезненный. На шлаке **Б** доля проросших семян статистически значимо ($P \leq 0,05$) различалась между всеми субстратами, будучи минимальной в смесях с концентрациями 25-100% (табл. 2). По прошествии 1 и 2 недель роста и развития растений редиса фитотоксичность проявлялась на смесях с концентрациями шлака 25 и 50% (рис. 2), в то время как на смеси с концентрацией 12,5% наблюдалось даже стимулирующее влияние ($P \leq 0,05$). На чистом шлаке прорастание семян было замедлено, и поэтому к 2 неделям число растений оказалось выше значений для контрольной почвы. Однако по фитомассе наблюдали резкое снижение (табл. 3), т.е. шлак **Б** в больших концентрациях проявлял токсичность по отношению к растениям редиса (рис. 2).

Шлак конверторный. На шлаке **К** доля проросших семян в смесях с концентрацией шлака 50% была ниже таковых во всех других субстратах ($P \leq 0,05$), а в чистом шлаке была существенно выше по сравнению с контрольной почвой и в смесях с 12,5 и 25%-ной концентрацией (табл. 2, рис. 1). По прошествии 1 и 2 недель роста и развития растений редиса фитотоксичность по числу растений в смесях 12,5, 25 и 100%-ным содержанием шлака не была выявлена (рис. 2), в то время как 50% почвенно-шлаковая смесь проявляла даже некоторое стимулирующее воздействие ($P \leq 0,05$). Однако по фитомассе растений через 2 недели (табл. 3) на чистом шлаке наблюдалось четкое подавление развития растений.

Шлак доменный. На шлаке **Д** относительное количество проросших семян в смесях с концентрацией шлака 12,5 и 25% было статистически значимо ниже таковых как по сравнению с контрольной почвой, так и по сравнению с более высокими концентрациями, а в чистом шлаке была существенно выше по сравнению с контрольной почвой и в смесях с 12,5 и 25%-ной концентрацией (табл. 2, рис. 1). По прошествии 1 и 2 недель роста и развития растений редиса фитотоксичность по числу растений не была выявлена ни на каких смесях (рис. 2), в то время как смесь с 25%-ным проявила стимулирующее воздействие. Однако по фитомассе растений через 2 недели наблюдали токсическое действие чистого шлака (табл. 3).

Корреляционный анализ выявил наличие положительной связи между прорастанием семян редиса и содержанием подвижного фосфора (табл. 4). Также была выявлена положительная связь между концентрацией оксида магния в субстрате и количеством проросших семян, выраженных как процент от количества семян, проросших на контрольной почве.

По фитомассе фитотоксичное воздействие шлаков на рост и развитие растений редиса к возрасту 2 недели было выявлено у шлака **Б** (в концентрации 50 и 100%), у шлаков **К** и **Д** (в концентрации 100%). При этом шлаки **К** и **Д** в концентрациях 50% и 25-50%, соответственно, демонстрировали стимулирующее влияние на развитие растений редиса на этом этапе.

Таблица 4. Коэффициенты корреляции числа и фитомассы растений редиса с химическими свойствами почвенно-шлаковых смесей

Показатель	Проростки, шт.	Проростки, % *	Проростки, % **	Растения, 1 неделя, %	Растения, 2 недели, %	
					число	фитомасса
C	-0,15	-0,15	-0,30	0,12	-0,02	0,45
P ₂ O ₅	0,57***	0,57	0,34	0,22	0,04	0,03
K ₂ O	-0,35	-0,35	-0,39	0,21	0,10	0,49
pH	0,30	0,30	0,38	-0,19	-0,07	-0,49
N	-0,12	-0,12	-0,28	0,07	-0,08	0,40
CaO	0,12	0,12	0,16	-0,30	-0,15	-0,52
MgO	0,40	0,40	0,49	-0,08	-0,01	-0,41

Примечание:

* доля проросших семян от внесенного числа семян;

** относительно контрольной почвы;

*** жирным шрифтом выделены статистически значимые коэффициенты корреляции.

Тестирование с овсом

Семена овса прорастали быстро (1-2 дня) на всех субстратах, однако число проросших семян и дальнейшее развитие растений овса варьировали в зависимости от шлака и его количества в смеси.

Шлак электросталеплавильный. На шлаке Э число проросших семян овса в смесях с концентрацией шлака 25, 50 и 100% достоверно превышало таковое в контрольной почве и в 12,5%-ной смеси (табл. 5, рис. 3). После 1 недели роста и развития растений овса относительное число растений овса на 50%-ной почвенно-шлаковой смеси было в 1,4 раза выше по сравнению с контролем (рис. 4), при этом на других смесях достоверных отличий по этому показателю не выявлено. Однако по надземной фитомассе, развившейся за 2 недели, фототоксичное действие шлака было четко выявлено в концентрациях 50 и 100% (табл. 6).

Таблица 5. Число растений овса на субстратах с разными шлаками

Шлак, % в смеси	Проростки, шт.	Проростки, % *	Растения, 1 неделя, % **	Растения, 2 недели, % **
Шлак электросталеплавильный				
100	13 ± 1 bc***	89 ± 4 b	140 ± 7 bc	111 ± 5 b
50	14 ± 0 c	91 ± 2 bc	144 ± 4 c	116 ± 0 b
25	12 ± 2 bc	82 ± 11 b	130 ± 17 bc	108 ± 8 ab
12,5	8 ± 2 a	53 ± 13 a	84 ± 21 a	86 ± 14 a
0****	10 ± 0 ab	63 ± 2 a	100 ab	100 a
Шлак белый обезжелезненный				
100	7 ± 2 ab***	44 ± 10 a	70 ± 17 a	75 ± 9 a
50	9 ± 1 b	62 ± 5 b	98 ± 9 b	100 ± 4 b
25	14 ± 0 c	93 ± 0 c	147 ± 1 c	125 ± 1 c
12,5	14 ± 1 c	91 ± 5 c	144 ± 9 c	114 ± 7 bc
0****	10 ± 0 b	63 ± 2 b	100 b	100 b
Шлак конверторный				
100	13 ± 1 b***	89 ± 2 b	95 ± 2 b	98 ± 9 b
50	10 ± 2 a	63 ± 11 a	68 ± 10 a	66 ± 11 a
25	13 ± 1 b	84 ± 5 b	90 ± 6 b	90 ± 6 b
12,5	13 ± 1 b	87 ± 6 b	93 ± 7 b	95 ± 6 b
0****	14 ± 1 b	93 ± 0 b	100 b	100 b
Шлак доменный				
100	12 ± 1 b***	82 ± 2 b	88 ± 2 b	95 ± 2 b
50	4 ± 1 a	24 ± 4 a	26 ± 6 a	38 ± 4 a
25	13 ± 1 b	89 ± 4 b	95 ± 4 b	98 ± 2 b
12,5	13 ± 1 b	87 ± 3 b	93 ± 4 b	102 ± 5 b
0****	14 ± 0 b	93 ± 0 b	100 b	100 b

Примечание:

* доля (в процентах) от числа посеянных семян; ** доля (в процентах) от контроля, т.е. почвы без добавления шлака; *** разные буквы в столбцах обозначают, что значения различны на уровне значимости P ≤ 0,05; **** контрольная почва без добавления шлака.

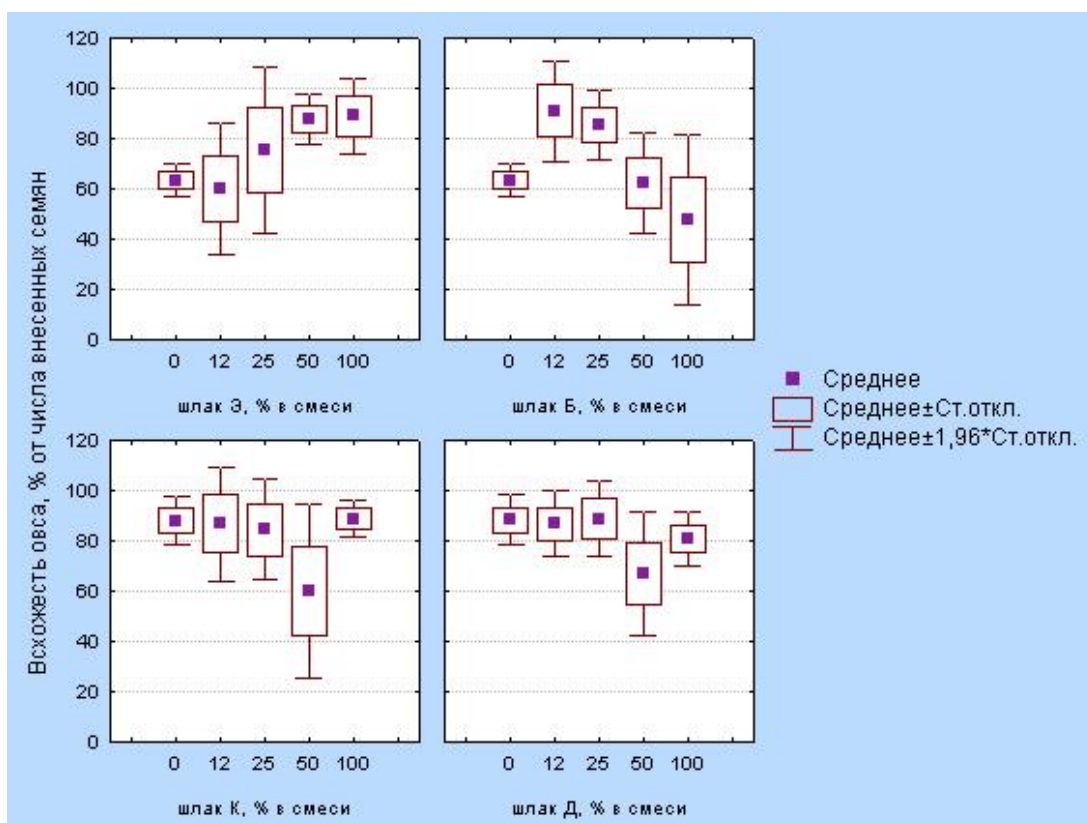


Рисунок 3. Всхожесть семян овса на различных почвенно-шлаковых смесях, в % от внесенного числа семян.

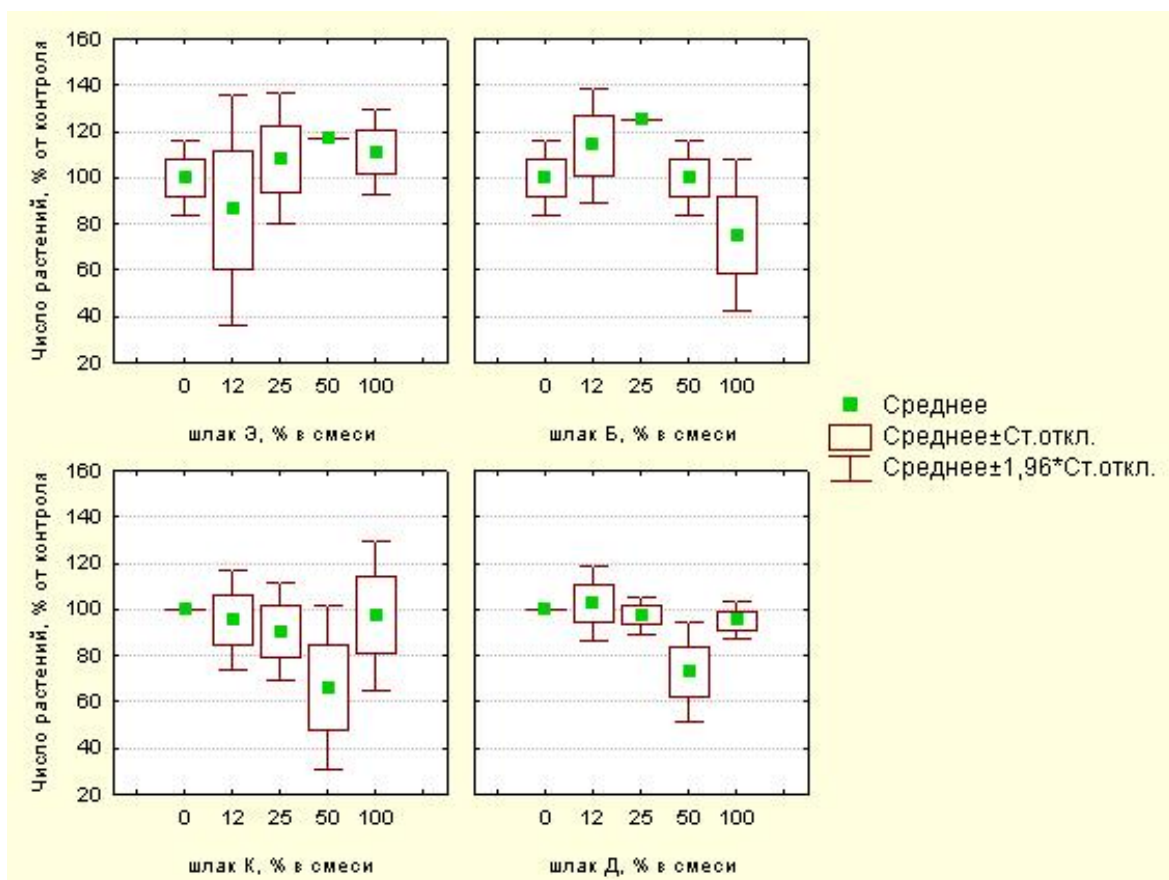


Рисунок 4. Растения овса через 2 недели после посева на почвенно-шлаковые смеси, в % от контроля (почвы без добавления шлаков)

Таблица 6. Надземная фитомасса овса на разных почвенно-шлаковых смесях и контрольной почве

% шлака в смеси	Шлак Э	Шлак Б	Шлак К	Шлак Д
100	1,07 (66*) а **	0,03 (2) а	1,09 (60) а	1,07 (58) а
50	2,09 (131) б	0,04 (3) а	1,38 (75) а	0,80 (44) а
25	1,93 (121) б	1,51 (95) б	1,85 (101) с	1,99 (109) б
12,5	1,33 (84) а	2,55 (160) с	1,67 (91) bc	1,80 (98) б
0***	1,60 (100) ab	1,60 (100) б	1,83 (100) б	1,83 (100) б

Примечание:

* доля (в процентах) от контроля, т.е. на почве без добавления шлака;

** разные буквы в столбцах обозначают, что значения различны на уровне значимости $P \leq 0,05$;

*** контрольная почва без добавления шлака.

Шлак белый обезжелезненный. На шлаке **Б** число проросших семян овса, как по отношению к контролю, так и по отношению к числу внесенных в контейнер семян, в смесях с концентрацией шлака 12,5 и 25% достоверно превышало таковое в контрольной почве (табл. 5, рис. 3). После 1 и 2 недель роста и развития относительное число растений овса на 50%-ной почвенно-шлаковой смеси достоверно не отличалось от контроля, однако на чистом шлаке было существенно снижено (рис. 4), а на почвенно-шлаковых смесях с 12,5 и 25% шлака почти в 1,5 раза повышено. Однако по фитомассе фитотоксичное действие шлака по отношению к росту и развитию растений овса было выявлено у концентраций шлака в субстратах 50 и 100% (табл. 6).

Шлак конверторный. На шлаке **К** число проросших семян овса, как по отношению к контролю, так и по отношению к числу внесенных в контейнер семян, в смеси с концентрацией шлака 50% было достоверно ниже по сравнению с контрольной почвой, а на остальных смесях отличий не было выявлено (табл. 5, рис. 3). После 1 и 2 недель роста и развития относительное число растений овса на 50%-ной почвенно-шлаковой смеси так и осталось существенно (в 1,5 раза) ниже по сравнению с контролем, однако на смесях с другими концентрациями шлака 3 статистически значимого снижения не установлено (рис. 4). По надземной фитомассе, однако, фитотоксичное действие шлака было выявлено на субстратах с концентрациями 50 и 100% (табл. 6).

Шлак доменный. На шлаке **Д** число проросших семян овса, как по отношению к контролю, так и по отношению к числу внесенных в контейнер семян, в смеси с концентрацией шлака 50% было существенно (в 3,5 раза) и достоверно ниже по сравнению с контрольной почвой, а на остальных смесях отличий не было выявлено (табл. 5, рис. 3). После 1 и 2 недель роста и развития относительное число растений овса на 50%-ной почвенно-шлаковой смеси так и осталось существенно (в 1,5 раза) меньше как по сравнению с контролем, так и по сравнению со смесями с другими концентрациями шлака (рис. 4). По надземной фитомассе токсичность шлака была установлена для концентраций 50 и 100% (табл. 6).

Корреляционный анализ показал наличие положительной связи между числом растущих через 1 неделю проростков овса и содержанием подвижного фосфора (табл. 7). По надземной фитомассе, как и следовало ожидать, выявлена положительная связь с содержанием органического углерода и азота в субстратах, а также подвижного калия и отрицательная связь с рН и оксидами щелочноземельных металлов.

Таблица 7. Коэффициенты корреляции числа растений овса с химическими свойствами почвенно-шлаковых смесей

Показатель	Проростки, % *	Растения, 1 неделя, %	Растения, 2 недели, %	
			число	фитомасса
$C_{орг}$	0,09	0,18	0,24	0,63
P_2O_5	0,16	0,47**	0,32	0,26
K_2O	0,16	0,04	0,13	0,60
pH	-0,14	-0,08	-0,16	-0,61
N	0,03	0,19	0,25	0,59
CaO	-0,27	-0,13	-0,19	-0,73
MgO	-0,07	-0,04	-0,14	-0,46

Примечание:

* доля проросших семян от внесенного числа семян;

** жирным шрифтом выделены статистически значимые коэффициенты корреляции.

ОБСУЖДЕНИЕ

В данном исследовании тестирование проводили в течение 2 недель при довольно высоких концентрациях шлака в почвенно-шлаковой смеси (12,5-100%). Выявленная положительная связь продукции фитомассы с содержанием органического углерода и общего азота свидетельствует о ведущей роли почвенной составляющей в обеспечении растений питательными элементами, разнообразными почвенными микроорганизмами, водой и т.п., т.е. в целом в обеспечении относительно благоприятной среды для роста и развития растений на почвенно-шлаковых смесях в качестве ростовых субстратов.

При этом в нашем опыте выявлена отрицательная корреляция фитомассы растений с общим содержанием кальция и магния. Ранее было показано положительное влияние добавления шлака электросталеплавильного на продукцию кукурузы (Radic et al., 2013) путем обеспечения растений Fe, Mn, Mg, K и частично P; на продукцию томатов в засоленных почвах благодаря снижению содержания обменного натрия и повышению обеспечения растений кальцием и магнием (Pistocchi et al., 2017). Внесение шлака конверторного также способствовало очень значительному повышению продукции пшеницы в парниковых и полевых условиях за счет обеспечения растений магнием на гипсованных кислых почвах (Peregrina et al., 2008), или продукции кукурузы за счет обеспечения Fe, Mn, Zn и Cu в условиях вегетационного опыта (Melali, Shariatmadari, 2008). Растения амаранта, например, за 6 недель роста оказались сильно угнетены при 10%-ной концентрации шлака в почве (Pietrini et al., 2017). Все эти результаты, однако, были получены при значительно меньших концентрациях шлака в почве (иногда менее 1%, но в основном не более 5-10%) и при более длительном (месяцы) проведении опыта (Prado et al., 2005; Melali, Shariatmadari, 2008, и др.). Таким образом, создается впечатление, что тестирование на фитотоксичность непрактично проводить при столь больших концентрациях шлака, которые в реальности нет смысла использовать, в особенности для продукции сельскохозяйственных культур. Кроме того, очевидно, что 2-х недель недостаточно для того, чтобы под влиянием почвенного раствора, почвенных микроорганизмов и роста растений произошли ощутимые сдвиги в соотношении и локализации обменных катионов в почвенно-шлаковых смесях.

Несмотря на наличие общих свойств - высокие значения pH, содержание оксидов щелочноземельных металлов – каждый шлак обладает своим спектром химических элементов в зависимости от особенностей производства на конкретном металлургическом предприятии. Поэтому, строго говоря, каждый шлак является уникальным субстратом. И всестороннее тестирование таких субстратов для широкого использования в различных отраслях необходимо в каждом конкретном случае. Несмотря на такую уникальность, создается впечатление, что шлаки электросталеплавильного и конверторного производства разных стран в целом менее токсичны (Prado et al., 2005; Melali, Shariatmadari, 2008, Radic et al., 2013; Pietrini et al., 2017; Pistocchi et al., 2017; и др.). Наши данные согласуются в этом с данными других исследователей.

В целом же высокое содержание кальция и магния в шлаках, особенно при отсутствии эффекта фитотоксичности на ранних этапах развития растений, является хорошей предпосылкой для дальнейшего более детального изучения этих шлаков при добавлении в небольших (максимум 5%) дозах в качестве мелиорантов для повышения реакции среды кислых почв, снижения засоленности почвы и удобрения растений (Матыченков, Бочарникова, 2003; Свергузова, Василенко, 2005; Шамари, 2015; Pistocchi et al., 2017).

Протестированные шлаки, за исключением щебня электросталеплавильного, в высоких концентрациях в почвенно-шлаковых смесях проявили фитотоксичность на ранних стадиях развития растений редиса и овса. Не исключено, однако, что при более длительном (6-8 недель) тестировании до появления генеративных органов у тест-растений фитотоксическое воздействие шлака может проявиться и при меньших концентрациях шлака в почвосмеси (Pietrini et al., 2017).

Тестирование на фитотоксичность того или иного материала само по себе не позволяет в полной степени выявить конкретные механизмы угнетения роста и развития растений данным материалом. Эти механизмы могут быть самыми разнообразными. А поскольку тестовые растения в частности или любые другие тест-организмы в общем не являются универсальными, то всегда существует вероятность сильного взаимодействия между тест-организмом и тестируемым материалом или веществом, т. е. проявления фитотоксичности могут быть различными при использовании разных тест-растений. Поэтому представляется целесообразным проведение тестирования отходов, в том числе и металлургических шлаков, на фитотоксичность, выбирая в качестве тест-растений те виды, которые могут быть использованы в реальных производственных технологиях утилизации данных отходов и поставленных задач рециклинга.

ВЫВОДЫ

1. При тестировании шлаков в течение двух недель при выращивании растений редиса и овса фитотоксичность не была выявлена у щебня шлакового электросталеплавильного при любых концентрациях этого шлака в тестируемой почвенно-шлаковой смеси и в чистом виде.

2. Щебень шлаковый белый обезжелезненный при тестировании и с овсом, и с редисом проявил фитотоксичность в чистом виде и в 50%-ной концентрации.

3. Щебень шлаковый конвертерный и щебень шлаковый доменный проявили фитотоксичность в концентрациях 50 и 100% при тестировании с овсом, и только в чистом виде – при тестировании с редисом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представляется нецелесообразным тестирование металлургических шлаков на фитотоксичность с использованием растений сельскохозяйственных культур, т.е. культур, которые вряд ли будут использованы в технологиях утилизации шлаков. Если все-таки планируется использование шлаков в качестве мелиорантов или удобрений на пахотных почвах для сельскохозяйственного производства, то тестирование на фитотоксичность нужно проводить при значительно более низких концентрациях шлака в почве, более длительное время и, наряду с вегетационными лабораторными опытами, в реальных полевых условиях. Для отработки потенциально перспективных экотехнологий утилизации шлаков, в частности, для выявления возможности использования шлаков в рамках инжиниринга рекреационных ландшафтов, мы рекомендуем использование бобово-злаковых, бобово-злаково-разнотравных смесей и древесно-кустарниковых культур для тестирования шлаков в условиях вегетационных и полевых опытов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Боброва З. М., Ильина О. Ю., Хохряков А. В., Цейтлин Е. М. Применение отходов горно-металлургических и металлургических производств в целях рационального природопользования // *Известия Уральского государственного горного университета*. 2015. № 4(40). С 16-26.
2. ГОСТ Р ИСО 22030-2009. Качество почвы. Биологические методы. Хроническая фитотоксичность в отношении высших растений. Москва: Стандартинформ, 2010. 19 с.
3. ИСО 11269-2:2012 *Качество почвы*. Определение воздействия загрязняющих веществ на флору почвы. Часть 2. Воздействие загрязненной почвы на всхожесть и ранний рост высших растений. Москва: Стандартинформ, 2013. 21 с.
4. Левкович Т.И., Мащенко Т.В., Мевлидинов З.А., Синявский Р.С. Об утилизации шлаков и освобождении занятых городских территорий промышленных зон с использованием шлака в дорожном строительстве // *Биосферная совместимость: человек, регион, технологии*. 2017. № 4 (20). С. 113-122.
5. Матыченков В.В., Бочарникова Е.А. Использование отходов металлургической промышленности для улучшения фосфорного питания и повышения засухоустойчивости растений. // *Агрехимия*. 2003. № 5. С. 42-47.
6. Свергузова С.В., Василенко Т.А. К вопросу об использовании цитогенетического анализа в биотестировании // *Экология и промышленность России*. 2005. №10. С.34-36.
7. Степанова Е.А., Акулова М.В. Металлургические шлаки: основные направления их применения в строительной индустрии // *Информационная среда вуза*. 2017. №1(1). С. 52-55.
8. Шамари У. Экономический аспект: защита окружающей среды и ресурсов благодаря шлакам черной металлургии // *Черные металлы*. 2015. №7(1003). С. 54-56.
9. Boltakova N.V., Faseeva G.R., Kabirov R.R., Nafikov R.M., Zakharov Yu.A. Utilization of inorganic industrial wastes in producing construction ceramics. Review of Russian experience for the years 2000–2015 // *Waste Management*, 2017, V. 60. P. 230-246.
10. Gawor L., Jonczy I. Possibilities of recycling of metallurgical slags and coal mining wastes and reclamation of dumping grounds in Upper Silesian Coal Basin (southern Poland) // *Materials and Geoenvironment*. 2015. V. 62. P. 271-276.
11. Gökalp İ., Uz V. E., Saltan M., Tutumluer E. Technical and environmental evaluation of metallurgical slags as aggregate for sustainable pavement layer applications, *Transportation Geotechnics*, 2018, V. 14, P.61-69.
12. Li J.-Y., Wang N., Xu R.-K., Tiwari D. Potential of Industrial Byproducts in Ameliorating Acidity and Aluminum Toxicity of Soils Under Tea Plantation // *Pedosphere*. 2010. V. 20, N.5, P.645-654.
13. Markandeya A., Shanahan N., Gunatilake D. M., Riding K.A., Zayed A. Influence of slag composition on cracking potential of slag-portland cement concrete // *Construction and Building Materials*. 2018. V. 164. P. 820-829.
14. Melali A. R., Shariatmadari H. Application of steel making slag and converter sludge in farm manure enrichment for corn nutrition in greenhouse conditions // *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*. 2008. V.11. No.42(B). P.505-514.

15. *Peregrina F., Mariscal I., Ordonez R., Gonzalez P., Terefe T., Espejo R.* Agronomic Implications of Converter Basic Slag as a Magnesium Source on Acid Soils // *Soil Science Society of America Journal*. 2008. V.72(2). P. 402-411.
16. *Pistocchi C., Ragaglini G., Colla V., Branca T.A., Tozzini C., Romaniello L.* Exchangeable Sodium Percentage decrease in saline sodic soil after Basic Oxygen Furnace Slag application in a lysimeter trial // *Journal of Environmental Management*. 2017. V. 203, Part 3, P.896-906.
17. *Pietrini F., Iori V., Beone T., Mirabile D., Zacchini M.* Effects of a ladle furnace slag added to soil on morpho-physiological and biochemical parameters of *Amaranthus paniculatus* L. Plants // *Journal of Hazardous Materials*. 2017. V. 329. P.339-347.
18. *Prado R. de M., Leal R M., Franco C. F., Braghirolli L.F.* Application of basic slag iron chromium in the reaction of a Dark Red Latosol // *Revista de Agricultura Piracicaba*. 2005.V.80(2). P.228-241.
19. *Radić S., Crnojević H., Sandev D, Jelić S., Sedlar Z., Glavaš K., Pevalek-Kozlina B.* Effect of electric arc furnace slag on growth and physiology of maize (*Zea mays* L.) // *Acta Biol Hung*. 2013. V.64(4). P.490-499.

Поступила в редакцию 10.04.2018; принята 14.06.2018;
опубликована 23.06.2018

Сведения об авторах:

Беланов Иван Петрович – кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории рекультивации ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия), bel_ivan@rambler.ru

Савенков Олег Александрович – кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории агрохимии ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия), oleg.a.savenkov@mail.ru

Наумова Наталья Борисовна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории агрохимии ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия), nnaumova@mail.ru

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

PHYTOTOXICITY OF GROWTH SUBSTRATES BASED ON SOIL MIXED WITH METALLURGICAL SLAGS USED FOR RECULTIVATION

© 2018 I.P. Belanov, O.A. Savenkov, N.B. Naumova 

Address: Institute of Soil Science and Agro chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation. E-mail: bel_ivan@rambler.ru

The aim of the study. *To estimate the influence of various metallurgical slags on the initial stages of plant growth and development.*

The study location and time. *Vegetation experiment was conducted in laboratory where during 2 weeks plants were grown on mixed soil-slag substrates under favourable air temperature and humidit, substrate moisture and illumination rate of 1500 lux.*

Methodology. *To conduct phytotoxicity testing we followed the protocol described by the federal standard GOST R ISO 22030-2009, using one species of the monocotyledonous plants (oats *Avena sativa* L., cultivar “Rovesnik”) and one species of dicotyledonous plants (radish *Raphanus sativus* var. *Sativus*, cultivar “Saksa”). Four slags produced at the EVRAZ West Siberian plant by different technologies were used: white non-ferrous, blast furnace, converter and electrofurnace ones. The concentration of slags in soil-slag mixtures used as growth substrates, were 0 (soil); 12.5; 25; 50 and 100% (pure slag). The data obtained were analyzed by descriptive statistics and correlation analysis.*

Main results. *The growth and development of both radish and oats plants were not impeded by electrofurnace slag in all concentrations tested. The white non-ferrous was found to be phytotoxic for both species in high concentrations only (50 and 100%). The converter and blast furnace slags had phytotoxic effect on radish only in their pure form, while for oats growth these slags were found to be harmful at 50% concentration.*

Conclusion. *At the initial stages of plant growth and development three of the four studied metallurgical slags were found to have phytotoxic effect only in very concentrations in the substrates. Therefore to develop perspective technologies of slag use in recultivation we recommend to conduct longer vegetation and field experiments with lower slag concentrations for growing plants that can be really used for specific recultivation purpose, e.g. mixtures of legumes, grains and herbs, as well as woody bushes.*

Key words: *metallurgical slags; phytotoxicity; soil-slag mixtures; radish; oats*

How to cite: Belanov I.P., Savenkov O.A., Naumova N.B Phytotoxicity of growth substrates based on soil mixed with metallurgical slags used for recultivation // *The Journal of Soils and Environment*. 2018. 1(2): 67–79. (in Russian with English abstract).

REFERENCES

1. Bobrova Z. M., Ilyina O. Yu., Hohryakov A. V., Tseitlin E. M. The use of mining and metallurgical wastes Using of metals and mining industrial wastes for the environmental management, *News of the Ural State Mining University*, 2015, V. 4(40), pp. 16-26 (in Russian).
2. *GOST ISO 22030-2009. Soil quality. Biological methods. Chronic toxicity in higher plants*. Moscow: Standardinform, 2010. 19p. (in Russian)
3. *DIN EN ISO 11269-2-2013. 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 (ISO 11269-2:2012)*. Moscow: Standardinform, 2010, 19p. (in Russian)
4. Levkovich T.I., Mashenko T.V., Mevlidinov Z.A., Sinyavsky R.S. On the disposal of slag and the liberation of occupied territories in the city industrial zones, the use of slag in road construction, *Biospheric compatibility: people, region, technology*, 2017, No. 4 (20), pp. 113-122. (in Russian).
5. Matychenkov V.V., Bocharnikova E.A. The Use of Metallurgy Waste for Improving the Phosphorus Nutrition and Increasing the Drought Resistance of Plants, *Agrochimiya*, 2003, No.5, pp. 42-47 (in Russian)
6. Svergouzova S.V., Vasilenko T.A. On the Problem of Using Cytogenetic Analysis in Biotesting, *Ecology and Industry of Russia*. 2005, No.10, pp.34-36 (in Russian)
7. Stepanova E.A., Akylova M.V. Metallurgical slag: the main directions of their use in the construction industry, *Information media of higher education establishment*, 2017, No.1(1), pp.52-55. (in Russian)
8. Schamari U. Environment protection and resource saving owing to iron and steel slags: an economical aspect, *Ferrous metals*, 2015, No.7(1003), pp. 54-56. (in Russian)
9. Boltakova N.V., Faseeva G.R., Kabirov R.R., Nafikov R.M., Zakharov Yu.A. Utilization of inorganic industrial wastes in producing construction ceramics. Review of Russian experience for the years 2000–2015, *Waste Management*, 2017, V.60, pp. 230-246.
10. Gawor L., Jonczy I. Possibilities of recycling of metallurgical slags and coal mining wastes and reclamation of dumping grounds in Upper Silesian Coal Basin (southern Poland), *Materials and Geoenvironment*, 2015, V. 62, pp. 271-276.
11. Gökalp İ., Uz V. E., Saltan M., Tutumluer E. Technical and environmental evaluation of metallurgical slags as aggregate for sustainable pavement layer applications, *Transportation Geotechnics*, 2018, V. 14, .61-69.
12. Li J.-Y., Wang N., Xu R.-K., Tiwari D. Potential of Industrial Byproducts in Ameliorating Acidity and Aluminum Toxicity of Soils Under Tea Plantation, *Pedosphere*, 2010, V. 20, No5, pp.645-654.
13. Markandeya A., Shanahan N., Gunatilake D. M., Riding K.A., Zayed A. Influence of slag composition on cracking potential of slag-portland cement concrete, *Construction and Building Materials*, 2018, V. 164, pp. 820-829.
14. Melali A. R., Shariatmadari H. Application of steel making slag and converter sludge in farm manure enrichment for corn nutrition in greenhouse conditions, *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*, 2008, V.11, No.42(B), pp.505-514.
15. Peregrina F., Mariscal I., Ordonez R., Gonzalez P., Terefe T., Espejo R. Agronomic Implications of Converter Basic Slag as a Magnesium Source on Acid Soils, *Soil Science Society of America Journal*, 2008, V.72(2), pp. 402-411.
16. Pistocchi C., Ragaglini G., Colla V., Branca T.A., Tozzini C., Romaniello L. Exchangeable Sodium Percentage decrease in saline sodic soil after Basic Oxygen Furnace Slag application in a lysimeter trial, *Journal of Environmental Management*, 2017, V. 203, Part 3, pp.896-906.
17. Pietrini F., Iori V., Beone T., Mirabile D., Zacchini M. Effects of a ladle furnace slag added to soil on morpho-physiological and biochemical parameters of *Amaranthus paniculatus* L. *Plants, Journal of Hazardous Materials*, 2017, V.329, pp.339-347.
18. Prado R. de M., Leal R M., Franco C. F., Braghirolli L.F. Application of basic slag iron chromium in the reaction of a Dark Red Latosol, *Revista de Agricultura Piracicaba*, 2005, V.80(2), pp.228-241.
19. Radić S., Crnojević H., Sandev D, Jelić S., Sedlar Z., Glavaš K., Pevalek-Kozlina B. Effect of electric arc furnace slag on growth and physiology of maize (*Zea mays* L.), *Acta Biol Hung*, 2013, V.64(4), pp.490-499.

Received 10 April 2018;
accepted 14 June 2018;
published 23 June 2018.

About the authors:

Belanov Ivan P.– Candidate of Biological Sciences, Researcher in the Laboratory of Recultivation in the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia), bel_ivan@rmblerl.ru

Savenkov Oleg A.– Candidate of Biological Sciences, Researcher in the Laboratory of Agrochemistry in the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia), oleg.a.savenkov@mail.ru

Naumova Natalia B. – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher in the Laboratory of Agrochemistry in the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia), nnaumova@mail.ru

The authors read and approved the final manuscript



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).