

УДК 669.181.28.004.82

ШЛАКИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА – ПЕРСПЕКТИВНЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ РЕКУЛЬТИВАЦИИ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ

Беланов И.П.¹, к.б.н., научный сотрудник (bel_ivan@rambler.ru)
Наумова Н.Б.¹, к.б.н., старший научный сотрудник (nnaumova@mail.ru)
Семина И.С.², к.б.н., доцент кафедры геологии, геодезии и безопасности
жизнедеятельности (semina.i@mail.ru)
Савенков О.А.¹, к.б.н., научный сотрудник (oleg.a.savenkov@mail.ru)

¹ Институт почвоведения и агрохимии СО РАН
(630090, Россия, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 8/2)
² Сибирский государственный индустриальный университет
(654007, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Приведены результаты полевого микроделяночного опыта по отработке технологии применения щебня шлакового для разрушения капиллярной каймы при рекультивации токсичных отходов (хвостохранилищ обогатительных фабрик, полигонов захоронения ТБО и др.) с минимальным нанесением плодородного слоя почвы. Такой подход позволяет утилизировать отходы черной металлургии при внедрении малозатратных энергосберегающих технологий. В качестве объектов исследования использовали четыре основных вида шлака, получаемого на АО «ЕВРАЗ ЗСМК» при различных технологиях плавки металла: белый обезжелезненный, доменный (мартеновский), электросталеплавильный и конвертерный. Эти шлаки использовали в качестве инертного материала под минимальным плодородным слоем почвы на делянках опыта, где высевали многолетние травы (злаково-бобовую смесь). На каждом варианте шлака были контрольный (без внесения удобрения) вариант и варианты с внесением гуминового препарата калия, полного минерального удобрения, а также с их совместным использованием. В конце вегетации определяли надземную фитомассу. Фитомасса надземной продукции растений изменялась в пределах 17 – 128 г/м². Установлено, что наиболее благоприятными свойствами обладают щебень шлаковый конвертерный и доменный, имеющие меньшую фитотоксичность. Внесение минерального удобрения как отдельно, так и с гуматом калия привело к увеличению фитомассы в 2 – 4 раза. Гумат калия, внесенный отдельно, не влиял на продукцию растений, но на фоне нитрофоски увеличивал фитомассу в 1,6 – 1,8 раза. Для повышения всхожести многолетних трав и стимулирования их биологической продуктивности рекомендуется совместное внесение минеральных удобрений и гуминовых препаратов. Щебни шлаковые конвертерный и доменный можно использовать в качестве инертного материала при рекультивации согласно технологии минимального нанесения плодородного слоя почвы. Шлаки белый и электросталеплавильный не рекомендовано использовать в качестве инертного материала из-за их высокой фитотоксичности, отрицательно влияющей на рост и развитие используемых при рекультивации многолетних трав.

Ключевые слова: микрополевой опыт, щебень шлаковый, инертный материал, фитотоксичность, надземная фитомасса, рекультивация.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-12-987-992

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных отходов металлургического производства является шлак – легкоплавкий силикатный материал, образующийся в виде расплава оксидов в процессе выплавки металла и представляющий собой смесь крупнообломочных, песчаных, пылеватых частиц. Согласно технологии шлаки складывают на открытых участках в виде отвалов. Такое размещение может приводить к поступлению загрязняющих веществ в воздух, водоемы и почвы, что отрицательно сказывается на состоянии флоры, фауны и здоровье населения [1 – 3].

Проблема избыточного накопления шлаков и их негативного воздействия на естественную среду наиболее ярко проявляется в крупных промышленных центрах черной металлургии [4 – 6]. По некоторым оценкам на

предприятиях черной металлургии России ежегодно накапливается более 40 млн. т шлаков [7]. Одним из экологически напряженных регионов является Новокузнецкая агломерация Кемеровской области, где функционирует гигант черной металлургии АО «ЕВРАЗ ЗСМК». Таким образом, консервация и дальнейшая утилизация путем вторичной переработки шлаковых отходов в настоящее время являются очень актуальными для этого региона.

Существующие технологии позволяют вовлекать шлаки металлургического производства в различные отрасли народного хозяйства. Например, эти отходы используют в качестве материала при строительстве дамб и дорожной одежды, отсыпки оснований зданий и сооружений, заполнения отработанных карьерных и шахтных выработок, как добавки в строительные смеси, как удобрения, содержащие кальций и магний, мелиоранты

и т.п. [8 – 12]. Шлаки можно применять при рекультивации токсичных техногенных объектов: хвостохранилищ обогатительных фабрик, полигонов захоронения ТБО и других. Поскольку проведение горно-технического этапа рекультивации такого рода объектов требует использования инертных материалов [13], перспективным материалом для этих целей может выступать щебень шлаковый металлургический.

Проведена оценка возможности применения различного рода металлургических шлаков в качестве инертного материала для разрушения капиллярной каймы при рекультивации токсичных отходов. Предпосылкой для проведения такого опыта является необходимость внедрения ресурсосберегающих технологий, основанных на минимизации мощности наносимого плодородного слоя почвы совместно с интенсивным использованием различного рода почвоулучшителей (минеральных удобрений, гуминовых препаратов или их комплекса). Основным показателем успешного применения металлургического шлака в целях рекультивации (на горнотехническом этапе) является продуктивность травосмеси, используемой на биологическом этапе рекультивации для закрепления рекультивируемого слоя устойчивым развитием травостоя.

■ ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объектов исследования использовали четыре вида щебня шлакового, получаемого на АО «ЕВРАЗ ЗСМК» при различных технологиях плавки металла: шлак белый обезжелезненный (Б), шлак доменный (мартеновский, Д), шлак электросталеплавильный (Э) и шлак конвертерный (К). 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 – 2,5 см, который по заключению компании-переработчика относится к IV классу опасности.

Предварительно каждый из используемых в опыте шлаков прошел биотестирование на фитотоксичность для определения воздействия загрязняющих веществ на флору почвы на основании методики ГОСТ Р ИСО 22030 – 2009 и ИСО11269-2:2012 [14]. Одним из критериев оценки безопасности использования шлаков в качестве инертного материала при рекультивации выступает степень его фитотоксичности [15]. Было установлено, что фитотоксичность отсутствует у шлака К при любых концентрациях его в тестируемой почвенно-шлаковой смеси, а также в чистом виде [14]. Шлак Б при тестировании и с овсом, и с редисом проявил фитотоксичность в чистом виде и при 50 %-ой концентрации разбавления с почвой, при остальных долях разбавления с почвой фитотоксичность не была выявлена. Шла-

ки Д и Э проявили фитотоксичность при концентрациях 50 и 100 % при тестировании с овсом и только в чистом виде – при тестировании с редисом. В целом отмечено, что при снижении доли шлака в общей массе почвенно-шлаковой смеси при разбавлении фитотоксичность не отмечается для всех четырех видов шлаков [14].

Также было проведено исследование на содержание тяжелых металлов, которое не выявило значительных превышений норм ПДК по основным показателям.

■ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В начале вегетационного периода 2017 г. был заложен микроделяночный полевой опыт в районе г. Новокузнецка, имитирующий рекультивацию техногенного объекта с защитным поверхностным водоупорным слоем. В качестве опытных делянок использовали углубленные в естественную почву изолированные пластиковые лотки площадью 1 м². Для снижения краевого температурного градиента применяли заглубление. В каждый лоток послойно помещали один из видов шлакового щебня мощностью 0,2 м, поверх которого насыпали плодородный слой почвы мощностью 0,1 м согласно технологии [16]. После чего производили посев травосмеси с нормой высева *Melilotus albus* – 7 кг/га, *Festuca pratensis* – 11 кг/га, *Phleum pratense* – 11 кг/га, *Lolium perenne* – 5 кг/га.

Для отработки такой технологии рекультивации были использованы четыре варианта посева многолетних трав: без внесения удобрений; с внесением минерального удобрения нитрофоски (16 % N, 16 % P₂O₅, 16 % K₂O); с внесением калиевого гуминового препарата (0,02 %); с совместным внесением минерального удобрения с калиевым гуминовым препаратом. Каждый из вариантов был заложен в двукратной повторности. В период вегетации дополнительный полив не проводили, так как дефицит влаги компенсировался дождевыми осадками. В начале сентября был произведен укос и определена сформированная надземная фитомасса для каждого варианта опыта. В настоящее время этот подход наиболее популярен в промышленной ботанике при оценке эффективности рекультивации и правильности выбора той или иной технологии [17].

Статистическую обработку полученных данных проводили методами описательной статистики и анализа главных компонент с помощью пакета Statistica 6.0.

Продукция агроценоза различных вариантов опыта напрямую зависела от используемого в качестве инертного материала шлака и степени его фитотоксичности. Наилучший результат без внесения удобрений был получен на делянках, где использовали шлак К с наименьшей фитотоксичностью (см. таблицу). При проективном покрытии до 50 % основная (75 %) доля фитомассы приходилась на *Melilotus albus*, занимающего 21 % в составе травосмеси. Удовлетворительный результат

был получен при использовании шлака Д, на делянках с которым, однако, проективное покрытие снизилось до 30 %. Основную долю фитомассы, как и на делянках со шлаком К, составил донник. При использовании в качестве инертного материала шлаков Б и Э сказывалась их фитотоксичность: всходы были неравномерны, молодые растения угнетены и относительно быстро погибали, площадь проективного покрытия была менее 10 %, а продукция надземной фитомассы – минимальна среди всех вариантов опыта.

Послепосевной полив 0,02 %-ым раствором гумата калия ускорил прорастание семян травосмеси на 1 – 3 дня, однако в итоге не привел к статистически значимому увеличению фитомассы. Внесение полного минерального удобрения стимулировало продукционный процесс растений, при этом при совместном внесении с минеральным удобрением гумат калия вызывал существенное увеличение фитомассы как у злаковых (в 1,6 раза), так и у бобовых (в 1,8 раза). Вероятнее всего, стимулирование процессов продукции и трансформации растительного вещества и питательных элементов внесением минерального удобрения способствовало в изучаемых почвосубстратах развитию и функционированию комплекса почвенных микроорганизмов, воздействие гумата на который и могло привести к более интенсивному поступлению в почву элемен-

тов питания, прежде всего азота [17 – 19]. Тем не менее на участках с использованием шлаков Б и Э растения находились в угнетенном состоянии, как и в вариантах без внесения удобрений.

Использование для подкормки растений минерального удобрения с равной (по 16 %) долей NPK оказало благоприятное и четко выраженное воздействие на рост и развитие травосмеси на делянках со шлаками К и Д (см. таблицу). Хотя всходы многолетних трав на этих делянках были одновременны с контрольными участками, они имели более равномерный характер с преобладанием злаков в проективном покрытии на начальном этапе роста и развития. Прибавка фитомассы относительно контрольного варианта увеличилась в 1,5 – 4,0 раза на различных делянках.

Максимальная надземная фитомасса высеянной травосмеси была получена при совместном внесении гумата калия и нитрофоски. Хороший результат показали делянки со шлаком Д, где на долю бобовых приходилось 98 %. Наилучший результат был получен на участках со шлаком К в качестве инертного субстрата, хотя надземная фитомасса и была невысока (см. таблицу), соотношение фитомассы злаковых (28 %) и бобовых (72 %) было сдвинуто в пользу последних, т.е. благоприятно для дальнейшего развития высеянного травяного агроценоза и его последующей сукцессии [20]. На

Надземная фитомасса трав и агрохимическая характеристика корнеобитаемого слоя (по окончании вегетации) на делянках с использованием различного рода щебня шлакового в качестве инертного материала и разных почвоулучшителей

Aboveground phytomass of herbs and chemical properties of root layer (at the end of vegetation) in microplots with different slag types and fertilizer addition

Используемый инертный материал	Вид внесенного почвоулучшителя	Фитомасса, г/м ² , воздушно-сухой массы			pH	P ₂ O ₅ , мг/кг	NO ₃ , мг/кг	K ₂ O, мг/кг
		Злаки	Бобовые	Всего				
Шлак белый	Контроль (без внесения)	0,2	0,2	0,4	10,8	3	7	125
	Гумат калия	0,4	0,2	0,6	10,4	4	11	140
	Нитрофоска	0,4	2,2	2,6	9,5	6	12	150
	Нитрофоска + гумат калия	2,3	1,9	4,2	9,5	6	14	155
Шлак доменный	Контроль (без внесения)	4,4	12,6	17,0	8,7	27	14	80
	Гумат калия	10,0	14,6	24,6	8,4	27	16	140
	Нитрофоска	9,9	64,4	74,3	7,9	41	25	215
	Нитрофоска + гумат калия	18,0	109,8	127,8	7,5	44	25	210
Шлак электросталеплавильный	Контроль (без внесения)	0,2	0,5	0,7	10,7	2,5	9	40
	Гумат калия	0,8	1,0	1,8	9,6	3	15	60
	Нитрофоска	2,7	1,7	4,4	9,1	3,5	20	150
	Нитрофоска + гумат калия	2,3	21,8	24,1	8,8	8	22	185
Шлак конверторный	Контроль (без внесения)	11,3	33,5	44,8	7,9	11	7	50
	Гумат калия	12,2	35,3	47,5	7,4	16	15	85
	Нитрофоска	15,0	38,7	53,7	7,1	27	18	115
	Нитрофоска + гумат калия	22,6	57,5	80,1	7,1	2	23	120

делянках со шлаками Б и Э тоже отмечали прибавку фитомассы относительно контроля, но в целом результат был неудовлетворительный.

Возможно, что определяющими фитотоксичность металлургических шлаков могли быть их физико-химические свойства и прежде всего щелочная среда и избыток свободных катионов Ca^+ (средняя массовая доля CaO составила 31 – 44 %) и Fe^+ (средняя массовая доля $\text{Fe}_{\text{общ}}$ – 10 – 21 %). Эти металлы, по-видимому, влияли на доступность для растений основных элементов минерального питания, даже несмотря на их поступление с минеральными удобрениями. В щелочных почвах и почвосубстратах (к которым относятся и исследуемые шлаки) преобладающим типом фосфатов в почвенном растворе является дифосфат ($\text{P}_2\text{O}_7^{4-}$) [20]; он притягивает катионы кальция, железо, марганца и алюминия с образованием нерастворимых в рассматриваемой почвенной среде соединений, недоступных для растений.

Таким образом, использование изученных шлаков при рекультивации требует обязательного снижения величины рН до 7 – 8, что не даст возможности переходу доступного для растений фосфора в труднодоступные фосфаты железа и алюминия.

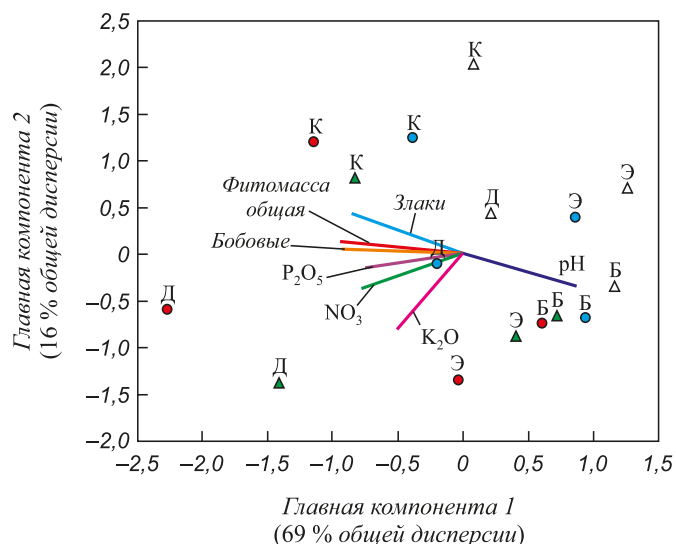
Реакция (рН) среды для шлаков Б и К характеризуется как сильнощелочная, для Д и Э – как щелочная и слабощелочная соответственно. Граница щелочности для всех исследуемых шлаков смещалась в сторону нейтральной при использовании как гумата калия, так и минерального удобрения. Этот эффект был замечен при совместном использовании гумата калия и минерального удобрения.

Анализ методом главных компонент хорошо визуализирует структуру взаимосвязи различных вариантов опыта с химическими свойствами почвосубстратов и надземной фитомассой трав (см. рисунок): почвошлаки расположены отдельными группами, варианты с внесением (как отдельно, так и совместно с гуматом калия) минерального удобрения расположены обособленно, при этом фитомасса, сформированная на делянке со шлаком Д, сильнее отзывалась на их внесение.

В целом внесение почвоулучшителей положительно влияло на рост и развитие многолетних трав вне зависимости от вида шлака. Наибольшая прибавка продукции надземной фитомассы бобово-злаковой травосмеси была достигнута при совместном использовании гумата калия с минеральным удобрением.

Выводы

В ходе проведения полевого эксперимента было установлено, что щелочные шлаковые конвертерный и доменный можно использовать в качестве инертного материала при рекультивации согласно технологии минимального нанесения плодородного слоя почвы. Для повышения уровня всходов многолетних трав и стиму-



Коэффициенты корреляции переменных (надземной фитомассы и химических свойств корнеобитаемого слоя почвы) и первых двух главных компонент (любая статистическая величина):

△ – контроль; ● – гумат калия; ▲ – нитрофоска;
● – гумат калия + нитрофоска

Correlation coefficients of original variables (aboveground phytomass and root layer soil properties) and first 2 principal components (any statistic value):

△ – check; ● – potassium humate; ▲ – nitrophoska;
● – potassium humate + nitrophoska

лирования их биологической продуктивности рекомендуется совместное внесение минеральных удобрений и гуминовых препаратов. Шлаки белый и электросталеплавильный не рекомендуется использовать в качестве инертного материала из-за их высокой фитотоксичности, отрицательно влияющей на рост и развитие многолетних трав, используемых при рекультивации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Брызгалов С.В. Снижение негативного воздействия доменных шлаков при их утилизации на объекты гидросферы: Автореф. дис. канд. техн. наук. – Пермь: изд. ПГТУ, 2009. – 17 с.
2. Пугин К.Г., Вайсман Я.И., Юшков Б.С., Максимович Н.Г. Снижение экологической нагрузки при обращении со шлаками черной металлургии. – Пермь: изд. ПГТУ, 2008. – 316 с.
3. Reuter M., Xiao Y., Boin U. Recycling and environmental issues of metallurgical slags and salt fluxes // VII International Conference on Molten Slags Fluxes and Salts. The South African Institute of Mining and Metallurgy. 2004. P. 349 – 356.
4. Ilutiu-Varvara D.A. Researching the Hazardous Potential of Metallurgical Solid Wastes // Polish Journal of Environmental Studies. 2016. Vol. 25. No. 1. P. 147 – 152.
5. Jahangir J., Nematollah K., and Afshin D. Ecological Risk Assessment of Lead (Pb) after Waste Disposal from Metallurgical Industries // Research Journal of Environmental and Earth Sciences. 2010. Vol. 2 (3). P. 139 – 145.
6. Экология Кузбасса: цифры, факты, события. Департамент природных ресурсов и экологии Кемеровской области. Режим доступа: http://kuzbasseco.ru/?page_id=1010 (Дата обращения: 18.04.2016 г.).
7. Gray N.F. Environmental impact and remediation of acide mine drainage: a management problem // Environmental Geol. 1997. Vol. 30. P. 62 – 71.

8. Lind B.B., Fallman A.M., Larsson L.B. Environmental impact of ferrochrome slag in road construction // *Waste Management*. 2001. Vol. 21 (3). P. 255 – 264.
9. Rai A., Prabakar J., Raju C., Morchalle R. Metallurgical slag as a component in blended cement // *Construction and Building Materials*. 2002. No. 16. P. 489 – 494.
10. Старостина Н.Н., Мансурова М.С. Анализ возможности снижения загрязнения окружающей среды при утилизации отходов горного производства // *Экология и безопасность жизнедеятельности*. 2014. № 1. С. 141 – 146.
11. Боброва З.М., Ильина О.Ю., Хохряков А.В., Цейтлин Е.М. Применение отходов горно-металлургических и металлургических производств в целях рационального природопользования // *Изв. Уральского государственного горного университета*. 2015. № 4 (40). С. 16 – 26.
12. 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. Vol. 62. P. 271 – 276.
13. Беланов И.П., Савенков О.А., Наумова Н.Б. Фитотоксичность почвосубстратов на основе шлаков металлургического производства, используемых в рекультивации // *Почвы и окружающая среда*. 2018. № 2 (2). С. 1 – 12.
14. Bunzl K., Trautmannsheimer M., Schramel P., Reifenhauer W. Availability of Arsenic, Copper, Lead, Thallium, and Zinc to Various Vegetables Grown in Slag Contaminated Soils // *Journal of Environmental Quality*. 2001. Vol. 30. P. 934 – 939.
15. Пат. № 2628581 РФ. Способ закрепления поверхности хвосторанилищ с использованием инертных материалов / В.А. Андроханов, Л.Т. Крупская, И.П. Беланов. 2017. Бюл. № 24.
16. Водолеев А.С., Андроханов В.А., Бердова О.В., Юмашева Н.А., Черданцева Е.С. Экологически безопасная консервация отходов железорудного обогащения // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2017. Т. 60. № 10. С. 792 – 797.
17. Nardi S., Panuccio M.R., Abenavoli M.R., Muscolo A. Auxin-like effect of humic substances extracted from faeces of *Allolobophora caliginosa* and *A. rosea* // *Soil Biol. Biochem.* 1994. Vol. 26. P. 1341 – 1346.
18. Попов А.И. Гуминовые вещества: свойства, строение, образование. – СПб.: Изд-во С. Петерб. ун-та, 2004. – 248 с.
19. Подурец О.И. Связь динамики запасов растительного вещества с фазами посттехногенного почвообразования // *Вестник Томского государственного университета*. 2011. № 346. С. 169 – 173.
20. Теучеж А.А. Изучение роли подвижного фосфора в системе почва – удобрения – урожай // *Научный журнал КубГАУ*. 2017. № 127 (03). Электронный ресурс. Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2017/03/pdf/64.pdf> (Дата обращения: 18.04.2016 г.).

Поступила 14 марта 2018 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. VOL. 61. No. 12, pp. 987–992.

METALLURGICAL PRODUCTION SLAGS – PROMISING MATERIAL FOR TECHNOLOGICAL WASTE RECLAMATION

I.P. Belanov¹, N.B. Naumova¹, I.S. Semina², O.A. Savenkov¹

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-12-987-992

¹Institute of Soil Science and Agrochemistry Siberian Branch of RAS (ISSA SB RAS), Novosibirsk, Russia

²Siberian State Industrial University, Kemerovo Region, Novokuznetsk, Russia

Abstract. The article describes results of the microplot field trial to investigate potential use of metallurgical slags for fracture of capillary rim during reclamation of toxic waste dumping areas, such as enrichment plants tailings, solid waste dumps, etc., with minimal possible introduction of fertile soil layer. Such approach allows energy-effective utilization of metallurgical wastes. Four slags, produced at EVRAZ West Siberian plant by different technologies were used: white non-ferrous, blast-furnace, converter and electric furnace slags. These slags were used as an inert material, underlying thin fertile soil layer in experimental microplots, where perennial plants (legume-grass mixture) were sown. For each slag there was check variant (no fertilizer added), and variants with potassium humic agents, and their combination as mineral fertilizers. Aboveground phytomass at the end of the growing season varied from 17 to 128 g/m². Converter and blast furnace slags, which had the least phytotoxicity, appeared to be better inert materials. Mineral fertilizer, introduced itself and combined with humic agents, has increased aboveground phytomass 2 – 4 times as compared with check variant. Used separately, humic agent did not affect plant production, whereas used together with mineral fertilizer, it increased phytomass 1.6 – 1.8 times. Thus combined introduction of mineral fertilizer and humic agents is recommended to stimulate germination ability and phytomass production. Converter and blast furnace slags can be used as inert materials for reclamation with minimal fertile soil layer application, whereas white non-ferrous and electric furnace slags are not recommended for such application due to their high phytotoxicity, negatively affecting growth and development of perennial plants, used for reclamation.

Keywords: microplot field trial, slag, underlying inert material, phytotoxicity, aboveground phytomass, reclamation.

REFERENCES

1. Bryzgalov S.V. *Snizhenie negativnogo vozdeistviya domennykh shlakov pri ikh utilizatsii na ob"ekty gidrosfery: Avtoref. dis... kand. tekh. nauk.* [Reducing negative impact of blast furnace slag being disposed at hydrosphere objects: Extended Abstract of Cand. Sci. Diss.]. Perm: izd. PGU, 2009, 17 p. (In Russ.).
2. Pugin K.G., Vaisman Ya.I., Yushkov B.S., Maksimovich N.G. *Snizhenie ekologicheskoi nagruzki pri obrashchenii so shlakami chernoi metallurgii* [Reducing environmental burden at handling slags of ferrous metallurgy]. Perm: izd. PGU, 2008, 316 p. (In Russ.).
3. Reuter M., Xiao Y., Boin U. Recycling and environmental issues of metallurgical slags and salt fluxes. VII International Conference on Molten Slags Fluxes and Salts. *The South African Institute of Mining and Metallurgy*. 2004, pp. 349–356.
4. Ilutiu-Varvara D.A. Researching the Hazardous Potential of Metallurgical Solid Wastes. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2016, vol. 25, no. 1, pp. 147–152.
5. Jahangir J., Nematollah K., and Afshin D. Ecological Risk Assessment of Lead (Pb) after Waste Disposal from Metallurgical Industries. *Research Journal of Environmental and Earth Sciences*. 2010, vol. 2 (3), pp. 139–145.
6. *Ekologiya Kuzbassa: tsifry, fakty, sobyitiya. Departament prirodnykh resursov i ekologii Kemerovskoi oblasti* [Ecology of Kuzbass: figures, facts, events. Department of Natural Resources and Ecology of the Kemerovo Region]. Electronic resource. Available at URL: http://kuzbasseco.ru/?page_id=1010 (Accessed 18.04.2016). (In Russ.).
7. Gray N.F. Environmental impact and remediation of acide mine drainage: a management problem. *Environmental Geol.* 1997, vol. 30, pp. 62–71.
8. Lind B.B., Fallman A.M., Larsson L.B. Environmental impact of ferrochrome slag in road construction. *Waste Management*. 2001, vol. 21 (3), pp. 255–264.

9. Rai A., Prabakar J., Raju C., Morchalle R. Metallurgical slag as a component in blended cement. *Construction and Building Materials*. 2002, no. 16, pp. 489–494.
10. Starostina N.N., Mansurova M.S. Analysis of possibility of reducing environmental pollution when disposing mining waste dumps. *Ekologiya i bezopasnost' zhiznedejatel'nosti*. 2014, no. 1, pp. 141–146. (In Russ.).
11. Bobrova Z.M., Il'ina O.Yu., Khokhryakov A.V., Tseitlin E.M. Use of mining and metallurgical wastes for environmental management. *Izv. Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*. 2015, no. 4 (40), pp. 16–26. (In Russ.).
12. 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, vol. 62, pp. 271–276.
13. Belanov I.P., Savenkov O.A., Naumova N.B. Phytotoxicity of soil substrates based on metallurgical slags used in reclamation. *Pochvy i okruzhayushchaya sreda*. 2018, no. 2 (2), pp. 1–12. (In Russ.).
14. Bunzl K., Trautmannsheimer M., Schramel P., Reifenhauer W. Availability of Arsenic, Copper, Lead, Thallium, and Zinc to Various Vegetables Grown in Slag Contaminated Soils. *Journal of Environmental Quality*. 2001, vol. 30, pp. 934–939.
15. Androkhanov V.A., Krupskaya L.T., Belanov I.P. *Sposob zakrepleniya poverkhnosti khvostokhranilishch s ispol'zovaniem inertnykh materialov* [Method of fixing tailings dumps surface using inert materials]. Patent RF no. 2628581. *Byulleten' izobretenii*. 2017, no. 24. (In Russ.).
16. Vodoleev A.S., Androkhanov V.A., Berdova O.V., Yumasheva N.A., Cherdantseva E.S. Environmentally safe storage of wastes from iron ore enrichment. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenij. Chernaya metallurgiya*. 2017, vol. 60, no. 10, pp. 792–797. (In Russ.).
17. Nardi S., Panuccio M.R., Abenavoli M.R., Muscolo A. Auxin-like effect of humic substances extracted from faeces of *Allolobophora caliginosa* and *A. rosea*. *Soil Biol. Biochem.* 1994, vol. 26, pp. 1341–1346.
18. Popov A.I. *Guminovye veshchestva: svoystva, stroenie, obrazovanie* [Humic substances: properties, structure, formation]. St. Petersburg: Izd-vo S. Peterb. un-ta, 2004, 248 p. (In Russ.).
19. Podurets O.I. Relation of dynamics of plant matter stocks with phases of post-technogenic soil formation. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2011, no. 346, pp. 169–173. (In Russ.).
20. Teuchezh A.A. Role of mobile phosphorus in soil - fertilizer - harvest system. *Nauchnyi zhurnal KubGAU*. 2017, no. 127 (03). Electronic resource. Available at URL: <http://ej.kubagro.ru/2017/03/pdf/64.pdf> (Accessed 18.04.2016). (In Russ.).

Information about the authors:

I.P. Belanov, *Cand. Sci.(Biological), Research Associate*
(bel_ivan@rambler.ru)

N.B. Naumova, *Cand. Sci.(Biological), Senior Researcher*
(nnaumova@mail.ru)

I.S. Semina, *Cand. Sci.(Biological), Assist. Professor of the Chair of Geology, Geodesy and Life Safety* (semina.i@mail.ru)

O.A. Savenkov, *Cand. Sci.(Biological), Research Associate*
(oleg.a.savenkov@mail.ru)

Received March 14, 2018