

## Опыт использования плодородного слоя почв для рекультивации отходов цветной металлургии (Кемеровская область)

*А. В. Еделеv<sup>1\*</sup>, Д. А. Соколов<sup>2</sup>, Н. В. Юркевич<sup>1</sup>, М. В. Степанова<sup>2,3</sup>*

<sup>1</sup>Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,  
г. Новосибирск, Российская Федерация

<sup>2</sup>Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

<sup>3</sup>Новосибирский государственный аграрный университет, г. Новосибирск,  
Российская Федерация

\* e-mail: EdelevAV@ipgg.sbras.ru

**Аннотация.** В статье показаны результаты экспериментов по биологической рекультивации опытно-производственной площадки. В качестве объектов были выбраны отходы гидрometаллургической переработки клинкеров Беловского цинкового завода (Кемеровская область). Рассматривались разные подходы, в которых техногенный грунт и его смесь с гумусированным субстратом засеивали донником желтым и кострцом безостым. В результате анализа проб определялись степень кислотности почв, ёмкость катионного обмена, фракционный состав, концентрации подвижного фосфора и калия, органического углерода, содержания подвижных форм элементов в ацетатно-аммонийном буферном растворе. Полученные результаты оценивались по агрохимическим градациям и гигиеническим нормативам. Проведенные исследования позволяют заключить, что техногенный грунт представляет собой субстрат, обладающий неблагоприятными физическими и агрохимическими свойствами. Перемешивание техногенного грунта с плодородным слоем почв не способствует улучшению его свойств.

**Ключевые слова:** биологическая рекультивация, отходы, кострец безостый, донник жёлтый, Белово

## Experience in the use of the fertile soil layer for the reclamation of non-ferrous metallurgy waste (Kemerovo region)

*A. V. Edelev<sup>1\*</sup>, D. A. Sokolov<sup>2</sup>, N. V. Yurkevich<sup>1</sup>, M. V. Stepanova<sup>2,3</sup>*

<sup>1</sup>Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk,  
Russian Federation

<sup>2</sup>Institute of Soil Science and Agrochemistry of Siberian Branch Russian Academy of Sciences,  
Novosibirsk, Russian Federation

<sup>3</sup>Novosibirsk State Agricultural University, Novosibirsk, Russian Federation

\* e-mail: EdelevAV@ipgg.sbras.ru

**Abstract.** The article shows the results of experiments on biological reclamation of a pilot production site. Wastes from hydrometallurgical processing of clinkers from the Belovsky zinc plant (Kemerovo region) were chosen as objects. Various approaches were considered, in which the technogenic soil and its mixture with a humus substrate were sown with yellow sweet clover and awnless brome. As a result of the analysis of samples, the degree of soil acidity, cation exchange capacity, fractional composition, concentrations of mobile phosphorus and potassium, organic carbon, and the content of mobile forms of elements in an acetate-ammonium buffer solution were determined. The results obtained were evaluated according to agrochemical gradations and hygienic standards. The conducted studies allow us to conclude that technogenic soil is a substrate with unfavorable physical and agrochemical properties. Mixing man-made soil with a fertile soil layer does not improve its properties.

**Keywords:** biological recultivation, waste, awnless brome, yellow sweet clover, Belovo

### ***Введение***

В рамках деятельности современной промышленности законодательство РФ требует при ухудшении качества земель в результате загрязнения обеспечить их рекультивацию, а именно мероприятия по предотвращению деградации земель и (или) восстановлению их плодородия посредством приведения земель в состояние, пригодное для дальнейшего использования в соответствии с целевым назначением [1].

Решение многих задач, связанных с проведением рекультивации, адаптации общепринятых методов к конкретным условиям находит широкое отражение в научной литературе [2-10]. При всем многообразии подходов к восстановлению земель из-за ограничений и сложности физико-химических методов исследователи в настоящее время больше внимания уделяют биологической рекультивации [2]. Часто предлагается комбинирование существующих методов (фиторемедиация, микробиологическая композиция и др.) при восстановлении загрязненных территорий [3]. Приводятся примеры успешной практики проведения рекультивационных работ и естественного восстановления растительности на поверхности техногенных экосистем, образованных в результате деятельности угольной промышленности [4]. По результатам другого исследования установлено, что степные виды растительности можно эффективно использовать для рекультивации ранее покрытых лесом ландшафтов, где происходила добыча угля [5]. Основываясь на данных, полученных в лабораторных экспериментах, предлагаются методики биологической рекультивации с целью снижения воздушной миграции из хвостохранилищ, содержащих отходы переработки оловорудного сырья [6].

Для снижения подвижности металлов в отходах горнодобывающей промышленности с низким значением рН и создания более благоприятных условий для растительности используются добавки извести, почвы, биокомпоста [7], свекловичной извести (дефеката) [8]. Эффективность рекультивации оценивается в том числе и по ферментативной активности [9]. Установлено, что максимальная эффективность почвообразования в техногенных ландшафтах достигается, если все условия и ресурсы рекультивации оцениваются на этапе планирования работ [10].

Целью настоящей работы является экспериментальная оценка эффективности биологической рекультивации смеси плодородного слоя почв с отходами металлургической промышленности.

Исследования проблем рекультивации промышленно нарушенных земель проводились в рамках сотрудничества лаборатории эколога-экономического моделирования техногенных систем Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН и лаборатории рекультивации почв Института почвоведения и агрохимии СО РАН при поддержке ООО «Рециклинг» (г. Белово, Кемеровская область).

## Объекты и методы исследований

Полевые исследования проводились в летний период 2021 г на опытно-производственной площадке в четырёх вариантах и трех повторностях. В первом варианте техногенный субстрат (техногрунт), представленный отходами гидрометаллургической переработки клинкеров Беловского цинкового завода (Кемеровская область), засевали донником желтым (*Melilotus officinalis* L.); во втором - его смесь с кострцом безостым (*Bromus inermis* Leyss). В третьем и четвертом вариантах перед посевом семян бобовых и смеси злаково-бобовых трав техногрунт смешивали с гумусированным субстратом (плодородный слой почв - ПСП) в соотношении примерно 1 к 1.

Анализ субстратов проводился в лабораториях ИПА СО РАН. Определялись степень кислотности почв, ёмкость катионного обмена (ЕКО), концентрации подвижного фосфора и калия, органического углерода по общепринятым методикам. Фракционный состав грубообломочной части субстратов определялся ситовым методом. Анализ содержания подвижных форм элементов проводили атомно-абсорбционным методом в вытяжке ацетатно-аммонийного буферного раствора с рН 4.8 (ААБ рН4.8). Полученные результаты оценивались по агрохимическим градациям [11] и гигиеническим нормативам [12].

### Результаты и обсуждение

Участки полевых опытов характеризуются различными физическими и агрохимическими свойствами субстратов. По значениям величин рН техногрунт является сильнощелочным (табл. 1), что негативно сказывается на условиях произрастания растительности. В то же время смешение техногрунта с ПСП позволяет снизить рН почвенного раствора до значений, близких к среднещелочным, при которых выбранные культуры произрастают лучше.

По ёмкости катионного обмена (ЕКО) условия произрастания растений и устойчивость к внешним воздействиям также недостаточны. По принятой градации ЕКО характеризуется как «очень низкая» (ниже 10 мг-экв на 100 г почвы) и указывает на низкое плодородие субстратов и их устойчивость к химическим воздействиям (табл. 1).

По содержанию аммонийного и нитратного азота все исследуемые субстраты характеризуются очень низкой обеспеченностью, явно недостаточной для устойчивого развития растений. Обеспеченность техногрунта подвижным фосфором ниже агрохимической нормы, в смеси техногрунта с ПСП – средняя (табл. 1). По содержанию подвижного калия техногрунт и его смесь с ПСП соответствуют повышенной градации. Содержание органического углерода относит техногрунт к малогумусированным субстратам, его смесь с ПСП к среднегумусированным.

Таблица 1

Агрохимические свойства субстрата делянок

Субстрат	рН (водн.)	рН (солев.)	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , мг/кг	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , мг/кг	К <sub>подв.</sub> , мг/кг	P <sub>подв.</sub> , мг/кг	С <sub>орг.</sub> , %	ЕКО, мг-экв/100г
техногрунт	8.7	7.6	0.067	0.79	125	11	1.4	2.6
техногрунт + ПСП	8.5	7.4	0.064	2.53	135	72	2.4	5.8

Результаты определения фракционного состава (табл. 2) показывают, что содержание каменистых фракций (более 3 мм) в техногрунте составляет 27.4 %, что соответствует сильнокаменистым почвам. Разбавление техногрунта материалом ПСП снижает каменистость до 14.4%, что отвечает среднекаменистой градации.

Таблица 2

Фракционный состав субстрата

Субстрат	Содержание фракций в %					
	>10 мм	10-7 мм	5-7 мм	3-5 мм	1-3 мм	<1 мм
Техногрунт	5.9	4.6	4.7	12.2	31.3	41.3
Техногрунт + ПСП	2.2	2.4	3.1	6.7	21.9	63.7

От гранулометрического состава мелкозема, прежде всего содержания в них частиц физической глины (<0.01 мм), также зависят физические и физико-химические свойства субстратов [13]. По гранулометрическому составу мелкозем техногрунта относится к разновидности связного песка (табл. 3), его смесь с ПСП к категории легкого суглинка. Данные о содержании физической глины в почве и её кислотности служат основой определения значений ОДК в почвах тяжелых металлов [12].

Таблица 3

Содержание физической глины в мелкоземе (< 1 мм) исследуемых субстратов

Субстрат	Содержание физической глины (>0.01 мм) (n=15), %			
	Сред.	Мин.	Макс.	Ст. откл.
Техногрунт	6.1	5.1	6.6	0.6
Техногрунт + ПСП	21.4	20.1	23.1	1.2

Результаты анализов показывают, что по содержанию подвижных форм микроэлементов техногрунт и его смеси характеризуются избыточными и высокими концентрациями (табл. 4). В техногрунте содержание элементов превышает ПДК: по меди более чем в 150 раз; по цинку в 17 раз; по свинцу почти в 5 раз. Содержание подвижного никеля оценивается как избыточное. Примечательно, что концентрация подвижного кадмия превышает ОДК для валового содержания в супеси более чем в 2 раза [12].

Смешение техногрунта с гумусированным материалом по окончании эксперимента привело к снижению концентраций подвижных форм микроэлементов. В этом варианте концентрации оставались выше ПДК: меди в 5 раз; цинка и свинца в 14 и 4 раза, соответственно. Концентрация подвижного кадмия в смеси с ПСП превысило ОДК для валового содержания более чем в 1.5 раза [12].

Отмеченные особенности содержания подвижных форм микроэлементов сопровождаются снижением значений рН реакции почвенного раствора (табл. 4). В смеси техногрунта и ПСП рН приблизилась к нейтральным значениям. Фикси-

руемые изменения рН вместе с концентрацией подвижных элементов очевидно связаны с поливом делянок, который проводился еженедельно на протяжении всего вегетационного периода. Подтверждением этому также служат концентрации подвижных форм элементов в субстратах делянок. Так, высокая каменистость и низкая доля тонких частиц в составе техногрунта способствовали вымыванию из него микроэлементов. Выцветы солей, вымытых из техногрунта, фиксировались нами по периферии участка (рис. 1).

Таблица 4

Содержание подвижных в ААБ рН4.8 форм элементов

Субстрат	рН (водн.)	Содержание металлов, мг/кг								
		Cu	Zn	Cd	Pb	Ni	Mg	Ca	K	Na
Техногрунт	8.0	472.7	403.3	1.093	27.5	2.599	60.0	4600	52	580
Техногрунт + ПСП	7.2	15.4	325.2	3.315	24.0	1.258	430.0	7200	154	470

По всей видимости, полив повлиял также и на среднекаменистые по составу делянки, сформированные смесью техногрунта и ПСП. Отмечаемые здесь минимальные концентрации подвижных форм микроэлементов (табл. 4), вероятно, обусловлены также более высокой емкостью катионного обмена и содержанием органического углерода (табл. 1), что способствует переходу микроэлементов в неподвижные формы посредством их связывания.

Оценка влияния свойств исследуемых субстратов на урожайность трав показала, что техногрунт является токсичным для растений. На техногрунте были зафиксированы только всходы злаков, высота которых не превышала 5 см. Столь низкие всходы (рис. 2) и незначительная урожайность надземной фитомассы, при отсутствии подземной (табл. 5), свидетельствует о том, что всходы на техногрунте развиваются до тех пор, пока хватает запасов семени. Более мелкие семена донника, в силу меньшей обеспеченности питательными элементами в семени, не дали всходов.



а



б

Рис. 1. Осадки солей, вымытых из техногрунта во время полива: а – выцветы по краям делянок; б – выцветы солей на месте временных водотоков на периферии участка

## Урожайность надземной и подземной фитомассы трав

Субстрат	Вариант	Фитомасса	
		Надземная г/м <sup>2</sup>	Подземная г/л
Техногрунт	донник	0	0
	донник+злаки	0.3	0.0
Техногрунт +ПСП	донник	13.7	2.0
	донник+злаки	27.2	1.5

На делянках, сформированных смесью техногрунта с ПСП, всходы чувствовали себя гораздо лучше, однако при этом оставались неравномерными (рис. 3). Неравномерность всходов объясняется неоднородностью смеси. На тех участках делянок, где в субстрате преобладал техногрунт, растительности не было зафиксировано. И наоборот, на участках с незначительным участием техногрунта отмечалась максимальная высота растений. Свидетельством негативного влияния техногрунта является также наличие сорняков, семена которых попали в смесь вместе с материалом ПСП. На плохо промешанных участках без включений техногрунта сорняки успешно конкурировали с высеваемыми травами. Поэтому большая часть фитомассы делянок приходится на сорняки.

В среднем урожайность надземной и подземной фитомассы растений выше в вариантах с ПСП. Это, помимо более благоприятных агрохимических условий, обусловлено также способностью гумусосодержащих пород к «нейтрализации» токсичности техногрунта, посредством снижения подвижности микроэлементов.



Рис. 2. Всходы злаковых трав на техногрунте



Рис. 3. Надземная фитомасса делянок, сформированных смесью техногрунта с ПСП

### Заключение

Техногрунт характеризуется высокой каменистостью, низким содержанием мелкозема и крайне низким содержанием физической глины. По агрохимическим свойствам мелкозем техногрунта является дефицитным по содержанию нитратного и аммонийного азота, подвижного фосфора, органического углерода,

обладает повышенным содержанием подвижного калия, очень низкой емкостью катионного обмена и сильнощелочной реакцией рН.

Перемешивание техногрунта с плодородным слоем почв (ПСП) не способствует улучшению его свойств, поскольку техногрунт характеризуется токсичными концентрациями подвижных форм меди, цинка, свинца и кадмия. В 50% смеси техногрунта с ПСП концентрации подвижных форм превышают ПДК: по меди от 5 до 230 раз, цинку от 14 до 160, свинцу от 4 до 90 раз. Подвижный кадмий превышает ОДК для валовой концентрации от 1.5 до 9.3 раз.

Техногрунт хорошо дренируется, что делает его опасным для прилегающих к участкам его размещения территорий. С целью минимизации негативного влияния необходимо экранирование складов техногрунта. Из исследуемых субстратов для экранирования могут быть использованы потенциально плодородные породы (ППП), поскольку способны препятствовать вымыванию из техногрунта микроэлементов. Их совместное использование с ПСП при послойном нанесении представляется наиболее эффективным. Формирование над PPP корнеобитаемого слоя из ПСП будет способствовать быстрому задернению и снижению рисков размыва поверхности.

### *Благодарности*

Исследование проводилось в рамках проекта № FWZZ-2022-0029 программы ФНИ, выполнения государственного задания ИПА СО РАН (проект № 121031700316-9), проекта РФФИ 20-05-00336 и при поддержке ООО «Рециклинг».

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Земельный кодекс РФ (ред. от 16.02.2022) [Электронный ресурс] // Официальный интернет-портал правовой информации. 2022. Режим доступа: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102073184>, свободный, – дата обращения 12.04.2022.
2. El Rasafi T., Nouri M., Haddioui A. Metals in mine wastes: environmental pollution and soil remediation approaches—a review // *Geosystem Engineering*. – 2021. – Vol. 24. – №. 3. – P. 157-172.
3. Асякина Л. К., Дышлюк Л. С., Просеков А. Ю. Мировой опыт в области рекультивации посттехногенных ландшафтов // *Техника и технология пищевых производств*. – 2021. – Т. 51. – №. 4. – С. 805-818.
4. Двуреченский В. Г., Андроханов В. А. Почвенно-экологическое состояние техногенных ландшафтов Новокузнецкого промышленного комплекса // *Живые и биокосные системы*. – 2017. – №. 20. – С. 3-18.
5. Swab R. M., Lorenz N., Byrd S., Dick R. Native vegetation in reclamation: Improving habitat and ecosystem function through using prairie species in mine land reclamation // *Ecological Engineering*. – 2017. – Vol. 108. – P. 525-536.
6. Крупская Л. Т., Голубев Д. А., Растанина Н. К., Филатова М. Ю. Рекультивация поверхности хвостохранилища закрытого горного предприятия Приморского края с использованием биоремедиации // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2019. – №. 9. – С. 138-148.
7. Benidire L., Pereira S., Abouddrar W., Hafidi M., Castro P., Boularbah A. Remediation of metal-contaminated mine tailings by the application of organic and mineral amendments // *Journal of Soils and Sediments*. – 2022. – Vol. 22. – №. 2. – P. 482-495.

8. Fernández-Caliani J. C., Giráldez M. I., Waken W. H., Del Río Z. M., Córdoba F. Soil quality changes in an Iberian pyrite mine site 15 years after land reclamation // *Catena*. – 2021. – Vol. 206. – P. 105538.

9. Uzarowicz Ł., Wolińska A., Błońska E., Szafranek-Nakonieczna A., Kuźniar A., Słodczyk Z., Kwasowski W. Technogenic soils (Technosols) developed from mine spoils containing Fe sulphides: Microbiological activity as an indicator of soil development following land reclamation // *Applied Soil Ecology*. – 2020. – Vol. 156. – P. 103699.

10. Sokolov D. A., Androkhanov V. A., Abakumov E. V. Soil formation in technogenic landscapes: trends, results, and representation in the current classifications (Review) // *Вестник Томского государственного университета. Биология*. – 2021. – №. 56. – С. 6–32.

11. Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения. — М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2003. – 240 с.

12. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 № 2 "Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 "Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания" // Официальный интернет-портал правовой информации. 2021. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202102030022> (Дата обращения 20.03.2022).

13. ГОСТ 12536-2014 Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. – М.: Стандартинформ. – 2015. – 19 с.

© А. В. Еделев, Д. А. Соколов, Н. В. Юркевич, М. В. Степанова, 2022