

УДК 550.47:550.7:574.4

DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-5-717-726

Оценка мобильности элементов из отходов переработки медеплавильных шлаков в лесные почвы

Е. С. Золотова¹, В. Ф. Рябинин¹, А. Л. Котельникова¹, Н. С. Иванова²

¹Институт геологии и геохимии УрО РАН, 620016, г. Екатеринбург, ул. Акад. Вонсовского, 15,
e-mails: afalinakate@gmail.com, ryabininvf@mail.ru, kotelnikova@prm.uran.ru

²Ботанический сад Уральского отделения РАН, 620144, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202а, e-mail: i.n.s@bk.ru

Поступила в редакцию 25.10.2019 г., принята к печати 20.02.2020 г.

Объект исследований. «Технический песок» ОАО СУМЗ является тонкодисперсным материалом, прошедшим процесс механоактивации при дроблении литого шлака, он имеет повышенное содержанием меди, цинка и других халькофильных элементов. С целью изучения трансформации отхода в природных экосистемах продукт вторичной переработки медеплавильного шлака вносили в бурные горно-лесные почвы под пологом сосновых лесов и на соответствующих им сплошных вырубках в южно-таежном округе Зауральской холмисто-предгорной провинции (Средний Урал). **Материалы и методы.** Исследования проводили в двух типах леса, выделенных согласно принципам генетической лесной типологии: сосняк брусничниковый и сосняк ягодниково-липняковый. Эксперимент проводился в осенний период перед установлением снежного покрова в двух вариантах: 1) на метровых площадках равномерно рассыпали один килограмм отхода; 2) «песок» взвешивали по 100 г, упаковывали в нетканый материал и закапывали в почвенный профиль постоянных пробных площадей на глубину 7–10 см в трехкратной повторности. Через два года мешочки с отходом выкапывали, взвешивали. Микроэлементный анализ проведен в Центре коллективного пользования «Геоаналитик» Института геологии и геохимии УрО РАН методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на квадрупольном масс-спектрометре Elan-9000. **Результаты.** Установлено, что в течение двух лет нахождения в почве отход теряет 11% массы. В круговорот вовлекается большинство халькофильных элементов. Наиболее сильно меняется содержание цинка, мышьяка, кадмия, селена. Выявлена разница в степени миграции элементов из «технического песка» в бурные горно-лесные почвы двух типов леса и вырубок. Однократное поверхностное внесение в осенний период 1 кг/м² минерального отхода не повлияло на качественный состав травянистого яруса всех типов леса и соответствующих им вырубок в следующий весенне-летний период. **Заключение.** Результаты исследований представляют интерес для разработки способов утилизации минеральных отходов медеплавильных производств. Однако необходимы дальнейшие исследования по анализу распределения компонентов, мигрирующих из «технического песка» по почвенному профилю лесных почв, а также их вовлечение в биогеохимические циклы.

Ключевые слова: минеральные отходы, медеплавильные шлаки, утилизация техногенных отходов, миграция элементов

Источник финансирования

Исследования выполнены в рамках темы государственного задания ИГГ УрО РАН (гос. регистрации № АААА-А18-118052590028-9), а также в рамках государственного задания Ботанического сада УрО РАН

Assessment of element mobility from copper smelting waste slag into forest soils

Ekaterina S. Zolotova¹, Viktor F. Ryabinin¹, Alla L. Kotelnikova¹, Natalya S. Ivanova²

¹A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Urals Branch of RAS, 15 Akad. Vonsovsky st., Ekaterinburg 620016, Russia,
e-mails: afalinakate@gmail.com, ryabininvf@mail.ru, kotelnikova@prm.uran.ru

²Botanical Garden of the Ural Branch of RAS, 202a March 8 st., Ekaterinburg 620144, Russia, e-mail: i.n.s@bk.ru

Received 25.10.2019, accepted 20.02.2020

Research subject. In this paper, we investigate the possibility of recycling wastes from copper smelting facilities in brown mountain forest soils. The research object was “technical sand” obtained at the Sredneuralsky copper smelter as a by-

Для цитирования: Золотова Е.С., Рябинин В.Ф., Котельникова А.Л., Иванова Н.С. (2020) Оценка мобильности элементов из отходов переработки медеплавильных шлаков в лесные почвы. *Литосфера*, 20(5), 717-726. DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-5-717-726

For citation: Zolotova E.S., Ryabinin V.F., Kotelnikova A.L., Ivanova N.S. (2020) Assessment of element mobility from copper smelting waste slag into forest soils. *Litosfera*, 20(5), 717-726. DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-5-717-726

© Е.С. Золотова, В.Ф. Рябинин, А.Л. Котельникова, Н.С. Иванова, 2020

product. This finely dispersed material rich in copper, zinc and other chalcophilic elements undergo mechanical activation during crushing of the cast slag. *Materials and methods.* Experiments were carried out in the southern taiga district of the Trans-Ural hilly-foothill province (Middle Urals) in autumn before snow cover. Two types of forest areas identified according to the genetic forest typology were investigated: cowberry shrub pine forest and berry pine forest with linden, both under trees and in clear-cutting areas. The experiments involved scattering 1 kg of waste across 1 m² of experimental soil, packing such a sand in 100 g packages made of non-woven material and burying these packages in 3 experimental plots a depth of 7–10 cm. Following 2 years, the packages were retrieved and weighed. The microelement analysis of soil samples was carried out by the method of inductively coupled plasma mass-spectrometry using an Elan-9000 ICP mass-spectrometer at the Geoanalytik center of the Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of RAS. *Results.* It was found that, after 2 years of residing in the soil, copper smelting waste slag loses 11% of its mass. The majority of chalcophilic elements are involved in the biogeochemical cycle. The content of zinc, arsenic, cadmium and selenium varies most significantly. A difference in the degree of element migration from the “technical sand” to the brown mountain forest soil was observed for 2 forest types and clear-cutting areas. A single surface application of mineral waste (1 kg/m²) in autumn did not affect the qualitative composition of the grassy layer of all forest types and clear-cutting areas in the following spring–summer period. *Conclusion.* The findings can be of interest for specialists developing new methods for recycling mineral wastes from copper smelters. Future research should analyse the distribution of components migrating from the “technical sand” along the soil profile of forest soils, as well as their involvement in biogeochemical cycles.

Keywords: *mineral waste, copper smelting slag, industrial waste utilization, element migration*

Funding information

The studies were carried out within the framework of the State Task of the Institute of Geology and Geochemistry Urals Branch of RAS No. AAAA-A18-118052590028-9, as well as within the State Task of the Botanical Garden of the Ural Branch of the RAS

ВВЕДЕНИЕ

Отходы горно-металлургического производства являются причиной серьезных изменений природных экосистем. Они нарушают естественные ландшафты, загрязняют окружающую среду, трансформируют сложившиеся биогеохимические циклы.

В настоящее время общее направление исследований техногенных образований сосредоточено в рамках оценки их в качестве потенциального источника минеральных ресурсов (Макаров, 2007; Грехнев, Рассказов, 2009; Наумов, Наумова, 2019). С ростом внимания к факторам экологического риска интенсифицировались исследования в области миграции компонентов промышленных отходов в почву и гидросферу (Пашкевич, 2000; Захаров и др., 2014; Тарасенко и др., 2017). Акцент делается на изучении мобилизации химических элементов, токсичных для природной среды.

Экспериментально изучены процессы выщелачивания металлов, в том числе Cu и Zn, из шлаков и “хвостов” обогащения (Рыльникова и др., 2010; Муравьев, Фомченко, 2013; Гейдаров и др., 2016). Методами лабораторного и численного эксперимента исследованы процессы выветривания минеральных отходов добычи и переработки апатитонефелиновых руд (Калабин и др., 2000), сульфидсодержащих отходов горно-металлургического комплекса (Калинников и др., 2002). Проведены

исследования миграции элементов из техногенных отходов в водные растворы (Гаськова, 2000; Котельникова, Рябинин, 2004; Гуман и др., 2010).

Деятельность медеплавильных предприятий сопровождается формированием отвалов литого либо гранулированного медеплавильного шлака. Первые успешные попытки переработки литого шлака в качестве нетрадиционного источника меди относятся к 90-м гг. XX в. Технология заключается в измельчении литого шлака с последующим флотационным извлечением медного концентрата (ОАО СУМЗ, ЗАО Кировоградский медеплавильный комбинат, АО “Карабашмедь”).

В качестве отходов накапливается тонкодисперсный материал размерности 0.05 мм с малоизученными свойствами – “технический песок” (Котельникова, Рябинин, 2018). При таком способе переработки в отходах сохраняется повышенное содержание меди, цинка и других биофильных компонентов. К настоящему времени только на Среднеуральском медеплавильном заводе накоплено около 20 млн т “технического песка” (Металлоснабжение и сбыт, 2018).

В результате измельчения литого шлака многократно увеличивается площадь удельной поверхности зерен, проницаемость для воды и атмосферных газов, происходят процессы механоактивации материала с ростом его энтропии. Как результат интенсифицируются процессы выветривания и прямого пыления.

Минеральный состав отходов во многом определяет их свойства, в том числе миграционную активность компонентов. По данным ОАО СУМЗ, “технический песок” состоит из фаялита – 49%, кварца – 20, магнетита – 10, феррита цинка – 8, пирротина – 1, борнита – 0.5, халькопирита – 0.4, ковеллина – 0.05, прочие – 11.05% (Гуман и др., 2010). Исследование микроскопических минеральных обломков, слагающих отход вторичной переработки медеплавильных шлаков, на электронном микроскопе позволило установить следующий ряд минеральных фаз (в порядке убывания): фаялит, железистое стекло, виллемит, пироксены, магнетит, гематит, вюстит, кварц, пирротин, пирит, куприт, а также штейн и шпейза. По фазовому составу “технический песок” представляет собой фаялит (Fe_2SiO_4) – 45%, железистое стекло – 30, диоксид ($\text{CaZn}(\text{Si}_2\text{O}_6)$) – 8 и магнетит (Fe_3O_4) – 3.5%. Установлено, что тяжелые и цветные металлы, включая медь, преимущественно сосредоточены в штейне и шпейзе в виде сульфидов и интерметаллидов. Цинк наблюдается во всех фазах: около 43% – в штейне в виде сульфидов, более 50% – в виде изоморфной примеси в фаялите и стекле. Основная масса щелочных и щелочноземельных элементов, алюминий и кремний находятся в стеклофазе. Около 50% железа заключено в фаялите (Котельникова, Рябинин, 2018).

Ранее исследовались вопросы подвижности цинка и меди при выщелачивании отходов вторичной переработки отвальных медеплавильных шлаков СУМЗ в модельных гипергенных условиях (Котельникова, 2006, 2010; Реутов и др., 2014), а также миграция элементов в водные растворы (Котельникова, 2008; Гуман и др., 2010). Для экспериментов использована как дистиллированная вода, так и талая снеговая вода, характеризующая состав атмосферных осадков на территории, прилегающей к участкам складирования “технического песка” (Гуман и др., 2010). В водных растворах наблюдается очень сильная миграционная активность S, Na, Ca, сильная – Mg, K, P, Mn, средняя – Zn и Pb. Миграционная активность Cu варьирует от средней до слабой в зависимости от соотношения шлак/вода (Котельникова, 2008). Эксперименты по моделированию системы “почвенный раствор–отходы” 1 М ацетатно-аммонийным буферным раствором показали повышенную миграционную активность Fe, Mn, Zn, Pb и As. Концентрации меди на протяжении всего эксперимента (20 сут), а кремния и алюминия на вторые сутки были ниже фоновых значений (Котельникова, 2010).

Тем не менее, согласно санитарно-эпидемиологическому заключению от 11 мая 2004 г., отходы вторичной переработки литого отвального шлака СУМЗ отнесены к IV классу опасности, а по результатам экологической экспертизы межрегио-

нального территориального управления Ростехнадзора по УрФО от 31 августа 2006 г. – к V классу опасности.

Введение отходов вторичной переработки литых медеплавильных шлаков в почвенный профиль природных экосистем позволило бы решить крайне актуальную задачу его утилизации. Однако прежде следует восполнить имеющиеся пробелы и изучить такие свойства “песка”, как направленность процессов преобразования в зоне выветривания, состав полученных продуктов, степень мобилизации элементов из шлака в почвы, их участие в биогеохимических циклах, а также влияние отходов на устойчивость природных экосистем в целом и на их компоненты в частности.

В настоящее время проводятся масштабные рекультивации эродированных площадей в пределах санитарно-защитной зоны медеплавильных производств с использованием отходов вторичной переработки литых шлаков. Формируются новые ландшафты на субстрате, являющемся аналогом геологической среды. Таким образом возникает уникальная возможность отслеживать ландшафт в динамике развития и формирование экосистем практически с момента их образования. Однако в связи с большими площадями нарушенных земель они оказываются изолированными от исходных природных экосистем и теряют генетическую связь с ними, что приводит к обедненному и во многом случайному их составу с неустойчивой системой взаимосвязей между компонентами. Результаты, получаемые при изучении таких экосистем, имеют ограниченную область применения и не приближат к пониманию действия отходов вторичной переработки медеплавильных шлаков на видовой состав, продуктивность травянистой растительности и биогеохимические циклы природных ландшафтов.

В связи с этим подобные исследования целесообразно дополнить изучением рядов формирования растительности при сохранении генетической связи с коренными экосистемами. Для данных целей удобными объектами являются сплошные вырубки, где процесс формирования биогеоценоза фактически начинается с “нулевого цикла”, но при этом наследуются элементы и формы организации старой системы (Маслаков, 1984).

Лесные биогеоценозы, представляющие собой саморегулирующиеся экологические системы, играют ведущую роль при компенсации антропогенных нагрузок на окружающую среду. Известно, что существует положительная связь между устойчивостью биогеоценоза и его биоразнообразием (Евсеева, 2018). Но антропогенное влияние на лесные биогеоценозы часто приводит к обратному эффекту: увеличению их биоразнообразия и одновременно снижению устойчивости (Алещенко, Букварева, 2010). Кроме того, методом математического

моделирования установлен факт потери устойчивости систем с ростом их сложности (Ланкин и др., 2012; Soukhovolsky et al., 2018). Это противоречие свидетельствует о недостаточности знаний о процессах взаимодействия биогеоценозов и антропо-сферы, что обосновывает актуальность дальнейших исследований данной проблемы.

Для устранения перечисленных проблем, повышения воспроизводимости и достоверности результата, для получения картины в динамике и возможности построения моделей процесса миграции элементов из шлака и влияния техногенных отходов на растительность нами выполнен контролируемый эксперимент. Было внесено дозированное количество техногенного материала известного химического и минерального состава в условиях конкретного ландшафта, находящегося на достаточном удалении от промышленных зон и имеющего лесотипологические, возрастные и прочие характеристики в четко определенных рамках.

Целью первого этапа исследований являлась оценка мобильности элементов из отходов вторичной переработки литого медеплавильного шлака в бурые горно-лесные почвы под пологом лесов и на сплошных вырубках. Также планировалось в первом приближении оценить влияние техногенного отхода на доминирующие и диагностические виды травянистой растительности выбранных лесных экосистем.

РАЙОН И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Полевой эксперимент закладывали в лесных биогеоценозах Зауральской холмисто-предгорной провинции Свердловской области ($57^{\circ}00' - 57^{\circ}05'$ с.ш. и $60^{\circ}15' - 60^{\circ}25'$ в.д.). Район исследования – расчлененное предгорье, образованное чередованием меридиональных возвышенностей и гряд с широкими межгорными вытянутыми понижениями, в которых расположены крупные озера, окруженные торфяниками (Колесников и др., 1973). Абсолютные высоты 200–500 м над ур. м. Возвышенности имеют мягкие очертания, тупые и широкие вершины. Склоны – длинные и пологие. Климат умеренно-холодный, умеренно-влажный. Исследования выполнены на постоянных пробных площадях (0.25–0.5 га), заложенных в двух типах соснового леса и соответствующих им сплошных вырубках. Особенности рельефа, лесорастительных условий и почвенного покрова пробных площадей приведены в табл. 1. Названия фитоценозов даны по практическому руководству Б.П. Колесникова с коллегами (1973), названия почв – согласно сложившейся классификации региона исследований (Фирсова, 1977).

В бурые горно-лесные почвы под пологом выбранных типов сосновых лесов и соответствующих им сплошных вырубков (см. табл. 1) вносили отход вторичной переработки отвального шлака медеплавильного производства Среднеуральского

Таблица 1. Характеристика бурых горно-лесных почв под пологом соснового леса и на сплошных вырубках Зауральской холмисто-предгорной провинции Среднего Урала

Table 1. Characterization of brown mountain forest soils under the canopy of pine forests and on clear cuts of the Trans-Ural hilly-foothill province (Middle Urals, Russia)

Положение в рельефе (Колесников и др., 1973)	Тип леса, вырубки (Колесников и др., 1973)	Описание бурых горно-лесных почв (Золотова, 2013)	
		Мощность профиля (аккумулятивного горизонта), см	Характеристика
Периодически сухие местообитания			
Вершины и верхние половины склонов возвышенностей	Сосняк бруснични- вый (С бр.)	Менее 40 (9)	Легкосуглинистые и супесча- ные почвы рассыпчатого и рыхло- го сложения с высокой скелетно- стью, слабокислой реакцией водной вытяжки и сильнокислой реакцией солевой вытяжки, кото- рые не меняются по горизонтам
	Вырубка вейниковая (вырубка С бр.)		
Устойчиво свежие местообитания			
Верхние части придолинных склонов и вершины невысоких холмов	Сосняк ягодниково- липняковый (С яг.лп.)	50 (15)	Супесчаные и легкосуглинистые почвы рассыпчатого и рыхлого сложения со слабокислой реакци- ей водной вытяжки и очень силь- нокислой реакцией солевой вытяжки
	Вырубка липняково- вейниковая (вырубка С яг.лп.)		

медеплавильного завода (СУМЗ). Отход представляет собой тонкодисперсный материал (≤ 0.05 мм), называемый “технический песок”, содержащий около 3.4% цинка, 0.4 – меди, 0.4 – свинца, 35.0% – железа (Котельникова, Рябинин, 2018). Его химический состав приведен в табл. 2.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучение отходов вторичной переработки литого медеплавильного шлака СУМЗа – “технического песка” – выполнено в Центре коллективного пользования “Геоаналитик” Института геологии и геохимии УрО РАН. Микроэлементный состав “технического песка” выявлен методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) на квадрупольном масс-спектрометре Elan-9000.

Для проведения эксперимента по трансформации отходов вторичной переработки медеплавильных шлаков в природных условиях выбраны постоянные пробные площади в двух типах соснового леса: брусничниковом и ягодниково-липняковом, и соответствующих им сплошных вырубках Зауральской холмисто-предгорной провинции Среднего Урала (см. табл. 1). Типы леса выделены согласно принципам генетической лесной типологии и кадастру типов леса Свердловской области (Колесников и др., 1973). Ранее на данных пробных площадях проводились комплексные исследования древесной и травянистой

растительности, были сделаны полнопрофильные почвенные разрезы и взяты образцы для анализов.

“Технический песок” в бурые горно-лесные почвы (названия даны согласно сложившейся классификации региона исследований (Фирсова, 1977)) выбранных лесных экосистем вносили в осенний период перед установлением снежного покрова (сентябрь–октябрь). Полевой эксперимент по оценке мобильности элементов из отходов вторичной переработки литого медеплавильного шлака в почву и их влияние на лесную растительность проводили в двух вариантах.

Задачей первого варианта опыта было оценить влияние “технического песка” на диагностические и доминирующие виды травяно-кустарничкового яруса выбранных условно-коренных лесов и соответствующих им вырубков. Для этого закладывали площадки 2×2 м² на каждой пробной площади (в каждом типе леса и соответствующих им вырубках), которые затем разбивали на четыре метровые площадки. Всего получилось 16 метровых площадок. На каждой равномерно рассыпали 1 кг отходов вторичной переработки отвального медеплавильного шлака. На следующее лето, в период максимального развития травянистой растительности (июль), проводили оценку видового состава пробных площадок с использованием методов полевой геоботаники (Okland, Eilertsen, 1994) и эколого-флористической классификации (Braun-Blanquet, 1964).

Таблица 2. Химический состав отхода вторичной переработки отвального шлака (“технический песок”) Среднеуральского медеплавильного завода

Table 2. The chemical composition of the waste processing copper smelting slag (“technical sand”) from the Sredneuralsky copper smelter

Компонент	Массовая доля, %			Компонент	Массовая доля, %		
	1	2	3		1	2	3
SiO ₂	31.0	32.67	35.8	H ₂ O	–	0.18	–
Al ₂ O ₃	7.05	5.15	7.78	Cu	0.44	–	0.34
Fe ₂ O ₃	14.29	11.14	10.09	Zn	3.28	3.94	2.93
FeO	32.3	36.76	35.77	Pb	0.20	–	0.08
TiO ₂	0.26	0.20	0.26	S	1.32	0.81	2.75
MnO	0.09	0.09	–	As	0.53	–	0.01
CaO	4.53	3.63	0.97	Ba	0.43	–	–
MgO	1.64	1.57	1.09	Ni	0.001	–	–
K ₂ O	0.74	0.72	0.82	V	0.004	–	–
Na ₂ O	0.64	0.62	0.83	Mo	0.02	–	–
P ₂ O ₅	0.18	0.16	0.62				

Примечание. Химические анализы выполнены в Институте геологии и геохимии УрО РАН (1), в Институте минералогии УрО РАН (2) (Котельникова, Рябинин, 2018), в УНЦ УГГУ (3) (Гуман и др., 2010). Прочерк – нет данных.

Note. Chemical analyzes were performed at the Institute of Geology and Geochemistry Urals Branch of RAS (1), at the Institute of Mineralogy Urals Branch of RAS (2) (Kotel'nikova, Ryabinin, 2018), at the Ural State Mining University (3) (Guman i dr., 2010). Dash – no data.

Задача второго варианта полевого эксперимента заключалась в оценке мобильности элементов из отхода вторичной переработки литого медеплавильного шлака в бурые горно-лесные почвы под пологом лесов и на сплошных вырубках. Для этого “технический песок” развешивали по 100 г, упаковывали в нетканый материал и закапывали в почвенный профиль пробных площадей на глубину 7–10 см в гумусовый горизонт (A1) в трехкратной повторности. Опыт делали максимально аккуратно, стараясь нанести минимальные повреждения. Подстилка на время внесения отхода снималась, затем возвращалась на место. Данный эксперимент так же, как и первый, проводили в осенний период. Всего было заложено 12 мешочков с техногенным отходом. Через два года мешочки с отходом выкапывали, высушивали при комнатной температуре до постоянной массы, взвешивали и проводили микроэлементный анализ методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

Многофакторное воздействие условий среды на минеральные отходы вторичной переработки медеплавильного шлака приводит к изменению соотношения водорастворимых, подвижных и потенциально-подвижных форм тяжелых металлов. Длительное нахождение шлака в среде почвенных растворов значительно повышает содержание водорастворимых (ионных) форм тяжелых металлов (Котельникова, 2012).

В 2003–2005 гг. проводились исследования внесения отходов вторичной переработки шлака в гумусово-аккумулятивный горизонт A1 (A1A2) двух типов почв: дерново-подзолистых и серых лесных (Шалинский район Свердловской области, подзона южной тайги) (Леонтьев, Рябинин, 2005, 2007; Леонтьев и др., 2006). По результатам первого года выявлено увеличение в верхнем горизонте ва-

ловых концентраций Cu и Zn, а также снижение содержания Ag. Выдвигается гипотеза о том, что на данный процесс мало влияют типовые различия почв (Леонтьев, Рябинин, 2005). Через два года после начала эксперимента геохимическая ситуация в исследуемых почвах меняется. В гумусово-аккумулятивном горизонте дерново-среднеподзолистой почвы Cd повторяет геохимическое поведение Cu, Zn и Pb, через год после внесения шлака содержание повышается (более чем в два раза), а на следующий год – снижается. Для Ag на второй год сохраняется тенденция снижения валового содержания (Леонтьев, Рябинин, 2007).

Для изучения миграции элементов из отходов вторичной переработки литых медеплавильных шлаков в почвы и влияния “технического песка” на травянистую растительность начаты расширенные исследования в Зауральской холмисто-предгорной провинции (Средний Урал). Структура и состав исследуемых типов леса, биоразнообразие травяно-кустарничкового яруса, морфологическое описание почв, их физико-химические свойства изложены ранее (Иванова, Золотова, 2011, 2013; Золотова, Иванова, 2012; Золотова, 2013).

В результате первого варианта полевого эксперимента установлено, что однократное поверхностное внесение в осенний период 1 кг/м² минерального отхода вторичной переработки медеплавильного шлака не повлияло на качественный состав травянистого яруса всех типов леса и соответствующих им вырубков в следующий весенне-летний период. Диагностические и доминирующие виды травяно-кустарничкового яруса изученных типов леса при внесении данной концентрации “технического песка” не изменились (табл. 3).

Второй вариант полевого эксперимента, когда в гумусовый горизонт бурых горно-лесных почв двух типов леса и соответствующих им вырубков вносили заданную навеску “технического песка”, позволил установить, что через два года мобилизуется около 11 г отхода. При навеске 100 г отхо-

Таблица 3. Диагностические и доминирующие виды травяно-кустарничкового яруса условно-коренных лесов и соответствующих им вырубков Зауральской холмисто-предгорной провинции Среднего Урала

Table 3. Diagnostic and dominant species of grass-shrub layer of indigenous forests and their clear-cuttings of the Trans-Ural hilly foothill province, Middle Urals, Russia

Тип леса	Диагностические виды	Доминирующие виды
Сосняк брусничниковый	<i>Vaccinium vitis-idaea</i> , <i>Antennaria dioica</i>	<i>Calamagrostis arundinacea</i> , <i>Vaccinium vitis-idaea</i>
Вырубка сосняка брусничникового		<i>Calamagrostis arundinacea</i> , <i>Vaccinium vitis-idaea</i> , <i>Vaccinium myrtillus</i> , <i>Rubus saxatilis</i>
Сосняк ягодниково-липняковый	<i>Vaccinium myrtillus</i> , <i>Rubus saxatilis</i> , <i>Carex digitata</i>	<i>Vaccinium myrtillus</i> , <i>Vaccinium vitis-idaea</i> , <i>Calamagrostis arundinacea</i>
Вырубка сосняка ягодниково-липнякового		<i>Calamagrostis arundinacea</i> , <i>Chamerion angustifolium</i> , <i>Brachypodium pinnatum</i>

Таблица 4. Потеря массы отходов вторичной переработки медеплавильного шлака после двухлетнего нахождения в гумусовом горизонте бурых горно-лесных почв двух типов леса и соответствующих им вырубок Зауральской холмисто-предгорной провинции Среднего Урала

Table 4. Mass loss of waste processing copper smelting slag after two years in the humus horizon brown mountain-forest soils of two forests types and the corresponding clear-cuttings of the Trans-Ural hilly foothill province of the Middle Urals

Фитоценоз	Потеря массы отхода (среднее), г	Стандартное отклонение (ед. изм.)
Сосняк брусничниковый	11.1	0.8
Вырубка сосняка брусничникового	11.0	0.5
Сосняк ягодниково-липняковый	11.3	1.6
Вырубка сосняка ягодниково-липнякового	11.0	0.7

дов зависимость между двумя типами леса (два режима увлажнения: периодически сухие и устойчиво свежие), сукцессионным статусом (лес–вырубка) не установлена (табл. 4).

Из отхода вторичной переработки медеплавильного шлака вовлекаются в круговорот большинство халькофильных элементов, наиболее сильно меняется содержание цинка, мышьяка, кадмия, селена (табл. 5). При сравнении двух коренных типов леса установлено, что “технический песок” сильнее взаимодействует с гумусовым горизонтом почв сосняка ягодниково-липнякового, представляющим собой легкий суглинок рыхлого сложения со слабокислой реакцией водной вытяжки и сильнокислой реакцией солевой вытяжки ($pH_{H_2O} = 5.10$, $pH_{KCl} = 4.06$). Однако мышьяк значительно сильнее мигрирует в верхний горизонт сосняка бруснични-

кового (супесь, $pH_{H_2O} = 5.24$, $pH_{KCl} = 3.95$). В почвах на вырубках содержание халькофильных элементов, вовлеченных в круговорот, незначительно превышает таковые, наблюдаемые в коренных лесах. Также сохраняется тенденция, выявленная для почв лесов: на вырубке сосняка ягодниково-липнякового процессы миграции из отходов в почву преимущественно проходят интенсивнее, чем на вырубке сосняка брусничникового.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании имеющихся научных заделов по изучению отходов вторичной переработки литых отвалов медеплавильного шлака ОАО СУМЗ и начальных результатов полевых экспериментов можно сделать вывод о том, что внесение “техническо-

Таблица 5. Содержание халькофильных элементов в исходном “техническом песке” и после двухлетнего нахождения его в гумусовом горизонте бурых горно-лесных почв двух типов леса и соответствующих им вырубках Зауральской холмисто-предгорной провинции Среднего Урала

Table 5. The content of chalcophilic elements in the initial “technical sand” and after two years of finding it in the humus horizon of brown mountain-forest soils of two forest types and the corresponding clear-cuttings of the Trans-Ural hilly foothill province, Middle Urals

Элемент	Содержание в отходе вторичной переработки медеплавильных шлаков, мг/кг				
	Исходный	С бр.	Вырубка С бр.	С яг.лп.	Вырубка С яг.лп.
Cu	1667.17	1217.8	1162.61	1038.96	1093.14
Zn	12144.61	4968.65	4737.25	4314.4	4471.13
Ga	8.58	5.47	5.19	4.65	4.72
As	420.54	195.02	192.05	230.29	221.53
Se	2.67	1.14	1.13	1.03	1.07
Ag	0.87	0.73	0.70	0.66	0.67
Cd	3.57	0.16	0.27	0.10	0.16
Sn	19.45	15.84	15.81	14.59	14.91
Sb	141.87	141.05	139.96	129.54	134.0
Te	0.16	0.16	0.16	0.14	0.14
Tl	0.54	0.39	0.38	0.36	0.37
Pb	1020.18	782.78	781.65	732.18	756.82
Bi	1.01	0.81	0.8	0.76	0.77

го песка” в лесные экосистемы в рамках его утилизации возможно и перспективно. Негативного эффекта на доминирующие и диагностические виды травяно-кустарничкового яруса двух типов сосновых лесов и вырубок по прошествии одного года после единоразового поверхностного внесения отхода в концентрации 1 кг/м² не выявлено. Однако необходимы дальнейшие исследования. Данные по проективному покрытию и фитомассе травяно-кустарничкового яруса, а также многолетние исследования позволят более точно и обоснованно сделать вывод о происходящих изменениях в лесных экосистемах под воздействием “технического песка”.

Подтверждены данные лабораторных экспериментов по исследованию мобильности элементов из отхода вторичной переработки медеплавильного шлака. Установлено, что “технический песок” за два года нахождения в гумусовом горизонте бурых горно-лесных почв теряет около 11% своей массы. Большинство халькофильных элементов из отходов вовлекаются в биогеохимические циклы. Наиболее сильно меняется содержание цинка, мышьяка, кадмия, селена. Выявлена разница в степени миграции элементов из “технического песка” в бурые горно-лесные почвы двух типов леса и вырубок.

Необходимы дальнейшие исследования по распределению элементов, мигрирующих из отходов, по почвенному профилю лесных почв, а также их вовлечению в биогеохимические циклы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алещенко Г.М., Букварева Е.Н. (2010) Двухуровневая иерархическая модель оптимизации биологического разнообразия. *Изв. Акад. наук. Сер. Биол.*, (1), 5-15.
- Гаськова О.Л., Бортникова Е.П., Бортникова С.Б., Андросова Н.В. (2000) Экспериментальное моделирование окислительного выщелачивания хвостов предела никель-кобальтовых руд. *Химия в интересах устойчивого развития*, 8(3), 373-380.
- Гейдаров А.А., Кашкай Ч.М., Гулиева А.А., Курбанзаде Г.А., Махмудов М.К., Джафаров З.Р. (2016) Исследование перколяционного выщелачивания ценных компонентов из хвостов обогащения Дашкесанского горно-обогатительного комбината. *Kimya Problemleri*, (1), 17-25.
- Грехнев Н.И., Рассказов И.Ю. (2009) Техногенные месторождения в минеральных отходах Дальневосточного региона как новый источник минерального сырья. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*, 55, 38-46.
- Гуман О.М., Долиннина И.А., Макаров А.Б., Рудой А.Г. (2010) Использование отходов переработки отвальных шлаков для рекультивации земель горнодобывающего комплекса. *Изв. высших учебных заведений. Горн. журн.*, (4), 43-49.
- Евсеева А.А. (2018) Биоразнообразие растительного компонента как показатель стабильности лесных экосистем. *Проблемы регион. экологии*, (4), 11-16. <https://doi.org/10.24411/1728-323X-2018-14011>
- Захаров А.В., Гуман О.М., Макаров А.Б., Антонова И.А., Ли Т.И. (2014) Экологическое состояние окружающей среды отвалов черной металлургии (по результатам мониторинга шлакового отвала НМТК). *Изв. УГГУ*, 35(3), 51-56.
- Золотова Е.С. (2013) Лесотипологические особенности растительности и почв Зауральской холмисто-предгорной провинции. Дис. ... канд. биол. наук. Екатеринбург: УГЛТУ, 208 с.
- Золотова Е.С., Иванова Н.С. (2012) Лесотипологическое исследование вырубок Зауральской холмисто-предгорной провинции. *Изв. Самарского НЦ РАН*, 14(1), 1016-1019.
- Иванова Н.С., Золотова Е.С. (2011) Факторы типологического и видового разнообразия лесов Зауральской холмисто-предгорной провинции. *Фундаментальные исследования*, 12(2), 275-280.
- Иванова Н.С., Золотова Е.С. (2013) Биоразнообразие условно-коренных лесов Зауральской холмисто-предгорной провинции. *Современные проблемы науки и образования*, (1). <http://www.science-education.ru/107-8563>.
- Калабин Г.В., Мазухина С.И., Малиновский Д.Н., Сандмиров С.С. (2000) Исследование процессов выветривания минеральных отходов добычи и переработки апатит-нефелиновых руд. *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология*, (1), 85-91.
- Калинников В.Т., Макаров Д.В., Васильев Т.Н. (2002) Физико-химические процессы в сульфидсодержащих горнопромышленных отходах. Апатиты: КНЦ РАН, 163 с.
- Колесников Б.П., Зубарева Р.С., Смолоногов Е.П. (1973) Лесорастительные условия и типы лесов Свердловской области. Свердловск: УНЦ АН СССР, 176 с.
- Котельникова А.Л. (2006) Исследование подвижности загрязняющих веществ при кислотном выщелачивании хвостов переработки медеплавильных шлаков. *Инженерная экология*, (1), 54-62.
- Котельникова А.Л. (2008) О влиянии соотношения шлак/вода на миграционную активность компонентов шлака. *Ежегодник-2007*. Екатеринбург, ИГГ УрО РАН, 273-276.
- Котельникова А.Л. (2010) О мобилизации компонентов медеплавильного шлака модельными почвенными растворами. *Ежегодник-2009*. Тр. ИГГ УрО РАН. Вып. 157, 142-145.
- Котельникова А.Л. (2012) О подвижных формах тяжелых металлов медеплавильных шлаков. *Ежегодник-2011*. Тр. ИГГ УрО РАН. Вып. 159, 96-98.
- Котельникова А.Л., Рябинин В.Ф. (2004) Экспериментальное изучение растворимости шлаков медеплавильных комбинатов в воде. *Электр. научно-инф. журнал “Вестник Отделения наук о Земле РАН”*, 1(22).
- Котельникова А.Л., Рябинин В.Ф. (2018) Особенности вещественного состава и перспективы использования отхода вторичной переработки отвальных медеплавильных шлаков. *Литосфера*, 18(1), 133-139. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2018-18-1-133-139>
- Ланкин Ю.П., Басканова Т.Ф., Печуркин Н.С. (2012) Моделирование адаптивной самоорганизации экосистем. *Современные проблемы науки и образования*, (5). <http://science-education.ru/article/view?id=6735> (дата обращения: 21.10.2019).
- Леонтьев М.С., Котельникова А.Л., Рябинин В.Ф. (2006) Влияние отходов цветной металлургии на распределение анионов в профиле серых лесных почв. *Эколо-*

го-экономическая эффективность природопользования на современном этапе развития Западно-Сибирского региона. Омск: Наука, 183-185.

Леонтьев М.С., Рябинин В.Ф. (2005) Экогеохимическая характеристика распределения халькофильных металлов в дерново-подзолистых и серых лесных почвах Урала. *Ежегодник-2004*. Екатеринбург, ИГГ УрО РАН, 366-377.

Леонтьев М.С., Рябинин В.Ф. (2007) Влияние техногенного вещества на геохимию халькофильных металлов в дерново-подзолистых почвах. "Проблемы минералогии, петрографии и металлогении". Научные чтения памяти П.Н. Чирвинского. Вып. 10. Пермь, ПГУ, 326-331.

Макаров А.Б. (2007) Главные типы техногенно-минеральных месторождений Урала: условия формирования, особенности состава и направления использования. *Изв. УГТУ*, 22, 61-68.

Маслаков Е.Л. (1984) Формирование сосновых молодняков. М.: Изд. Лесн. пром-сть, 165 с.

Металлоснабжение и сбыт (2018). [Электронный ресурс]. СУМЗ переработал четверть шлаков медеплавильного производства. <https://www.metalinfo.ru/ru/news/101265> (дата обращения: 19.02.2020).

Муравьев М.И., Фомченко Н.В. (2013) Выщелачивание цветных металлов из медеплавильного шлака с использованием ацидофильных микроорганизмов. *Прикладная биохимия и микробиология*, 49(6), 561-569.

Наумов В.А., Наумова О.Б. (2019) Формы нахождения и перспективы освоения золота в природных и техногенно-минеральных образованиях Западного Урала. *Вестн. Пермского университета. Геология*, 18(1), 55-63.

Пашкевич М.А. (2000) Техногенные массивы и их воздействие на окружающую среду. СПб.: С.-Петербургский горный ин-т, 230 с.

Реутов Д.С., Котельникова А.Л., Халезов Б.Д., Кориневская Г.Г. (2014) Технология извлечения цинка, меди и утилизация песков из твердых отходов, полученных после флотации медеплавильных шлаков. *Проблемы недропользования*, (1), 121-126.

Рыльникова М.В., Радченко Д.Н., Милкин Д.А. (2010) Исследование процессов выщелачивания ценных компонентов из текущих хвостов обогащения медно-колчеданных руд. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, (2), 256-268.

Тарасенко И.А., Харитонова Н.А., Оводова Е.В., Зиньков А.В., Корзун А.В. (2017) Трансформация минералого-геохимического состава отходов обогащения и ее влияние на формирование высокоминерализованных вод (Приморский край, Россия). *Тихоокеан. геология*, 36(2), 106-118.

Фирсова В.П. (1977) Почвы таежной зоны Урала и Зауралья. М.: Наука, 176 с.

Braun-Blanquet J. (1964) *Pflanzensociologie. Grundzuge der Vegetationskunde*. 3 Aufl. Wien-N. Y.: Springer-Verlag, 865 p.

Okland R.H., Eilertsen O. (1994) Canonical correspondence-analysis with variation partitioning some comments and an application. *J. Veg. Sci.*, 5(1), 117-126.

Soukhovolsky V., Ivanova Y. (2018) Modeling production processes in forest stands: An adaptation of the Solow growth model. *Forests*, 9(7), 391. <https://doi.org/10.3390/f9070391>

REFERENCES

Aleshchenko G.M., Bukvareva E.N. (2010) Two-level hierarchical model of optimal biological diversity. *Biol. Bull.*, 37(1), 1-19.

Braun-Blanquet J. (1964) *Pflanzensociologie. Grundzuge der Vegetationskunde*. 3 Aufl. Wien-N.Y., Springer-Verlag, 865 p.

Gas'kova O.L., Bortnikova E.P., Bortnikova S.B., Androsova N.V. (2000) Experimental modeling of oxidative leaching of tailings of redistribution of nickel-cobalt ores. *Khimiya v interesakh ustoichivogo razvitiya [Chemistry for sustainable development]*, 8(3), 373-380. (In Russian)

Geidarov A.A., Kashkai Ch.M., Guliyeva A.A., Kurbanzade A.Kh., Makhmudov M.K., Dzharfarov Z.R. (2016) Research into percolation leaching of valuable components out of enriched wastes of Dashkesan mining and processing plant. *Kimya Problemleri*, (1), 17-25. (In Russian)

Grekhnnev N.I., Rasskazov I.Yu. (2009) Technogenic deposits in mineral wastes of the Far East region as a new source of mineral raw materials. *Gornyi Informatsionno-analiticheskii Byullyuten' (Nauchno-tekhnicheskii Zhurnal)*, (55), 38-46. (In Russian)

Guman O.M., Dolinina I.A., Makarov A.B., Rudoi A.G. (2010) The use of waste processing of waste slag for land reclamation of the mining complex. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Gorn. J.*, (4), 43-49. (In Russian)

Evseeva A.A. (2018) Plant component biodiversity as an index for forest ecosystems stability. *Probl. Region. Ekol.*, (4), 11-16. <https://doi.org/10.24411/1728-323X-2018-14011> (In Russian)

Firsova V.P. (1977) *Pochvy taezhnoi zony Urala i Zaural'ya [Soils in the taiga zone of the Ural and Trans-Urals regions]*. Moscow, Nauka Publ., 176 p. (In Russian)

Ivanova N.S., Zolotova E.S. (2011) Factors of richness in typology and species of forests in the Zaural'e hilly piedmont province. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 12(2), 275-280. (In Russian)

Ivanova N.S., Zolotova E.S. (2013). Biodiversity of the natural forests in the Zaural'e hilly piedmont province. *Sovremennye Problemy Nauki i Obrazovaniya*, (1). <http://www.science-education.ru/107-8563> (accessed 21.10.2019). (In Russian)

Kalabin G.V., Mazukhina S.I., Malinovskii D.N., Sandimirov S.S. (2000) Investigation of weathering processes of mineral wastes from the extraction and processing of apatite-nepheline ores. *Geoekologiya. Inzhenernaya Geologiya, Gidrogeologiya, Geokriologiya*, (1), 85-91. (In Russian)

Kalinnikov V.T., Makarov D.V., Vasil'ev T.N. (2002) Fiziko-khimicheskie protsessy v sul'fidsoderzhashchikh gornopromyshlennykh otkhodakh [Physico-chemical processes in sulfide-containing mining waste]. Apatity, KSC RAS, 163 p. (In Russian)

Kolesnikov B.P., Zubareva R.S., Smolonogov E.P. (1973) Lesorastitel'nye usloviya i tipy lesov Sverdlovskoi oblasti [Forest vegetation conditions and forest types of the Sverdlovsk region]. Sverdlovsk, AN SSSR, 176 p. (In Russian)

Kotel'nikova A.L. (2006) Investigation of the mobility of pollutants during acid leaching of tailings from the processing of copper smelting. *Inzhener. Ekol.*, (1), 54-62. (In Russian)

- Kotel'nikova A.L. (2008) On the effect of the slag/water ratio on the migration activity of slag components]. *Ezhegodnik-2007*. Ekaterinburg, IGG UrO RAN. V. 155, 273-276. (In Russian)
- Kotel'nikova A.L. (2010) On the mobilization of components of copper smelting slag by model soil solutions. *Ezhegodnik-2009*. Ekaterinburg, IGG UrO RAN. V. 157, 142-145. (In Russian)
- Kotel'nikova A.L. (2012) On the mobile forms of heavy metals of copper smelting slag. *Ezhegodnik-2011*. Ekaterinburg, IGG UrO RAN. V. 159, 96-98. (In Russian)
- Kotel'nikova A.L., Ryabinin V.F. (2004) Experimental study of the solubility of slags from copper-smelting plants in water. Electr. scientific-inf. journal "Herald Department of Earth Sciences of the Russian Academy of Sciences", **1**(22). (In Russian)
- Kotel'nikova A.L., Ryabinin V.F. (2018) The composition features and perspective of use for the copper slag recycling waste. *Litosfera*, **18**(1), 133-139. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2018-18-1-133-139> (In Russian)
- Lankin Yu.P., Baskanova T.F., Pechurkin N.S. (2012) Modeling of adaptive self-organizing of ecosystems. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*, (5). <http://science-education.ru/ru/article/view?id=6735> (accessed 21.10.2019). (In Russian)
- Leont'ev M.S., Kotel'nikova A.L., Ryabinin V.F. (2006) The effect of non-ferrous metallurgy wastes on the distribution of anions in the profile of gray forest soils. *Ekologo-ekonomicheskaya effektivnost' prirodopol'zovaniya na sovremennom etape razvitiya Zapadno-Sibirskogo regiona* [Ecological and economic efficiency of nature management at the present stage of development of the West Siberian region]. Omsk, Nauka Publ., 183-185. (In Russian)
- Leont'ev M.S., Ryabinin V.F. (2005) Ecogeochemical characterization of the distribution of chalcophilic metals in sod-podzolic and gray forest soils of the Urals. *Ezhegodnik-2004*. Ekaterinburg, IGG UrO RAN. V. 152, 366-377. (In Russian)
- Leont'ev M.S., Ryabinin V.F. (2007) Influence of technogenic matter on the geochemistry of chalcophilic metals in sod-podzolic soils. "Problemy mineralogii, petrografii i metallogenii" *Nauchnye chtenia pamyati P.N. Chirvinskogo* ["Problems of mineralogy, petrography and metallogeny" Scientific readings in memory of P.N. Chirvinsky]. Issue 10. Perm, PGU Publ., 326-331. (In Russian)
- Makarov A.B. (2007) Main types of technogenous-mineral deposits of the Urals: formation conditions, peculiarities of composition and directions of usage. *Izvestiya Ural'skogo Gosudarstvennogo Gornogo Universiteta*, (22), 61-68. (In Russian)
- Maslakov E.L. (1984) Formirovanie sosnovykh molodnyakov [Formation of young pine trees]. Moscow, Lesnaya prom-st', 165 p. (In Russian)
- Metallosnabzhenie i sbyt (2018). [Elektronnyi resurs]. SUMZ pererabotal chetvert' shlakov medeplavil'nogo proizvodstva [Metal Supply and Sales Magazine, News of the russian metallurgical industry (2018). [Electronic resource]. SUMZ processed a quarter of smelter slags]. URL: <https://www.metalinfo.ru/ru/news/101265> (accessed: 19.02.2020). (In Russian)
- Murav'ev M.I., Fomchenko N.V. (2013) Leaching of nonferrous metals from copper converter slag with application of acidophilic microorganisms. *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya*, **49**(6), 561-569. (In Russian)
- Naumov V.A., Naumova O.B. (2019) Forms of location and prospects of gold mining potential in natural and technogenic mineral formations of the Western Urals. *Vest. Perm. Univ. Geologiya*, **18**(1), 55-63. (In Russian)
- Okland R.H., Eilertsen O. (1994) Canonical correspondence-analysis with variation partitioning some comments and an application. *J. Veg. Sci.*, **5**(1), 117-126.
- Pashkevich M.A. (2000) *Tekhnogennyye massivy i ikh vozdeistvie na okruzhayushchuyu sredu* [Technogenic massifs and their environmental impact]. St.Petersburg, St.Petersburg. Mining Institute, 230 p. (In Russian)
- Reutov D.S., Kotel'nikova A.L., Khalezov B.D., Korinevskaya G.G. (2014) Studies and research technology to extract zinc, copper and utilization sands from solid waste obtained after flotation copper smelting slag. *Problemy Nedropol'zovaniya*, (1), 121-126. (In Russian)
- Ryl'nikova M.V., Radchenko D.N., Milkin D.A. (2010) Investigation of the leaching of valuable components from the current tailings of copper-pyrite ore beneficiation. *Gornyi Informatsionno-analiticheskiy Byulleten'*, (2), 256-268. (In Russian)
- Soukhovolsky V., Ivanova Y. (2018) Modeling production processes in forest stands: An adaptation of the Solow growth model. *Forests*, **9**(7), 391. <https://doi.org/10.3390/f9070391>
- Tarassenko I.A., Kharitonova N.A., Ovodova E.V., Zin'kov A.V., Korzun A.V. (2017) Transformation of mineralogical and geochemical composition of tails and its influence on the high mineralization water origination (Primorye region, Russia). *Tikhookean. Geol.*, **36**(2), 106-118. (In Russian)
- Zakharov A.V., Guman O.M., Makarov A.B., Antonova I.A., Li T.A. (2014) Environmental situation of dumps steel (based on the results of the slag dump monitoring on the Nizhnii Tagil Iron and Steel Works). *Izv.UGGU*, **3**(35), 51-56. (In Russian)
- Zolotova E.S. (2013) *Lesotipologicheskie osobennosti rastitel'nosti i pochv Zaural'skoi kholmisto-predgornoi provintsii* Dis. kand. biol. Nauk [Forest typological features of vegetation and soils of the Trans-Ural hilly-piedmont province. Cand. biol. sci. dis.]. Ekaterinburg, Ural State Forestry University, 208 p. (In Russian)
- Zolotova E.S., Ivanova N.S. (2012) Typological research of clear cutting in Zaural'e hilly piedmont province. *Izv. Samara Sci. C. RAN*, **14**(1), 1016-1019. (In Russian)