



УДК 669.046:504.054

DOI 10.17073/0368-0797-2024-5-542-548



Оригинальная статья  
Original article

## МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЙ И ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВЫ ПОЧВ, ФОРМИРУЮЩИХСЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ХВОСТОХРАНИЛИЩ

И. П. Беланов<sup>1</sup>, А. М. Шипилова<sup>2</sup>, О. П. Мезенцева<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт почвоведения и агрохимии Сибирского отделения РАН (Россия, 630099, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 8/2)

<sup>2</sup> Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

✉ asya\_nk77@mail.ru

**Аннотация.** Объектом исследования являются гидроотвалы складирования отходов первичного и вторичного обогащений железной руды (хвостохранилища). В ходе исследования получены данные минералогического состава образцов почвообразующей породы техногенных ландшафтов. Рассматриваемый показатель является одним из основных факторов почвообразования при изучении литологии на более низком иерархическом уровне. Минералогический состав оказывает влияние на содержание и соотношение в почвах элементов питания и токсикантов, процессы ионного обмена, устойчивость почв к деградации и общее плодородие почв. Он является матрицей формирования почв и регулирует трансформацию, миграцию и аккумуляцию в почве веществ, энергии и информации внешней среды и антропогенного воздействия. Гидроналивной способ складирования отходов оказывает влияние на пространственное распределение материала в хвостохранилищах. Прежде всего выделяется контрастное сложение по гранулометрическому составу из-за осаждения частиц в водных условиях под действием гравитационного поля. Скорость осаждения зависит от массы, размера, формы и плотности вещества частиц, вязкости и плотности среды, а также от ускорения, силы тяжести и действующих на частицы центробежных сил. Несмотря на значительное количество исследований по влиянию минералогического состава на развитие почв, данная проблема изучена недостаточно. Это определяет отсутствие общепринятых показателей скорости развития почв, формирующихся на техногенном минеральном субстрате, и степени накопления в таких почвах биофильных элементов.

**Ключевые слова:** минералогический состав, почвообразующие породы, хвостохранилище, почвы техногенных ландшафтов, гранулометрический состав

**Для цитирования:** Беланов И.П., Шипилова А.М., Мезенцева О.П. Минералогический и гранулометрический составы почв, формирующихся на поверхности железорудных хвостохранилищ. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2024;67(5):542–548.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-5-542-548>

## MINERALOGICAL AND GRANULOMETRIC COMPOSITION OF SOILS FORMED ON THE SURFACE OF IRON ORE TAILINGS DUMPS

I. P. Belanov<sup>1</sup>, A. M. Shipilova<sup>2</sup>, O. P. Mezentseva<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (8/2 Akademika Lavrent'eva Ave., Novosibirsk 630099, Russian Federation)

<sup>2</sup> Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)

✉ asya\_nk77@mail.ru

**Abstract.** Hydraulic dumps for storing waste from primary and secondary iron ore processing (tailings dumps) were selected as objects for research. In the course of the study, data on the mineralogical composition of soil-forming rock samples of technogenic landscapes were obtained. This indicator is one of the main factors of soil formation when considering lithology at a lower hierarchical level. The mineralogical composition influences the content and ratio of nutrients and toxicants in soils, ion exchange processes, soil resistance to degradation and overall soil fertility. The mineralogical composition is the matrix of soil formation and regulates the transformation, migration and accumulation of matter, energy and information of the external environment and anthropogenic impact in the soil. The hydraulic filling method of waste storage has an impact on the spatial distribution of material in tailings dumps. First of all, a contrasting addition in terms of granulometric composition is distinguished due to the deposi-

tion of particles in aqueous conditions under the influence of a gravitational field. The deposition rate depends on the mass, size, shape and density of the particle substance, viscosity and density of the medium, as well as on acceleration, gravity and centrifugal forces acting on the particles. Despite a significant amount of research on the effect of mineralogical composition on soil development, this problem was not sufficiently studied. This determines the absence of generally accepted indicators of the development rate of soils formed on a man-made mineral substrate and the accumulation degree of biophilic elements in such soils.

**Keywords:** mineralogical composition, soil-forming rocks, tailings dump, soils of man-made landscapes, granulometric composition

**For citation:** Belanov I.P., Shipilova A.M., Mezentseva O.P. Mineralogical and granulometric composition of soils formed on the surface of iron ore tailings dumps. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2024;67(5):542–548. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-5-542-548>

## ВВЕДЕНИЕ

Кузбасс является одним из наиболее промышленно развитых регионов России. Высокая концентрация промышленных предприятий и нерациональное использование природных ресурсов привело к тому, что на месте когда-то плодородных земель сформированы техногенные ландшафты. На юге Кемеровской области – Кузбасса расположен АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (ЕВРАЗ ЗСМК) – металлургический комбинат полного цикла, производящий металлопрокат для строительной, железнодорожной и других отраслей промышленности. Сырьем является железная руда, которая обогащается на Абагурской обогатительно-агломерационной фабрике (ранее на Мундыбашской обогатительной фабрике). В результате переработки руд образуются отходы (хвосты обогащения), которые складываются в хвостохранилища. Таким образом, на этой территории формируются техногенные ландшафты, на поверхности которых происходит формирование молодых почв.

Минералогический состав почв является одним из определяющих факторов, который оказывает непосредственное влияние на их физические и химические свойства, а также на протекающие в них процессы. Он является матрицей формирования свойств почв, регулирует трансформацию, миграцию и аккумуляцию веществ, энергии и информации внешней среды. В отличие от остальных факторов (климат, рельеф, растительность и др.), которые определяют механизм и темпы почвообразования, минеральный субстрат формирует вещественную основу, в массе которой возникает почвенный профиль [1; 2].

Изучение минералогического состава позволяет сформировать не только понимание свойств, но и понимание особенностей генезиса вновь формирующихся техногенных почв, так как он определяет предпосылки для вектора и интенсивности почвообразовательных процессов (гумусово-аккумулятивного, внутрипочвенного выветривания, лессиважа, оподзоливания, оглеения, буроземообразования и др.). Следовательно, требуются определение и учет минералогического состава при классификации почв [1; 3; 4].

Основной целью настоящей работы является исследование минералогического и гранулометрического составов пород в посттехногенный период хвостохра-

нилищ первичного и вторичного обогащения железной руды, на поверхности которых в настоящее время протекает процесс формирования молодых почв (эмбриоземов).

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объектов исследования выступали хвостохранилища Мундыбашской (первичное) обогатительной (N53°13'28,90" E86°16'04,01") и Абагурской (вторичное) обогатительно-агломерационной фабрик (N53°42'11,95" E87°14'12,50").

Мундыбашская обогатительная фабрика (ОФ) была построена в 1931 – 1935 гг. для обогащения железной руды расположенного рядом Тельбесского рудника Кузнецкого металлургического комбината. Работа фабрики продолжалась до апреля 2015 г., после чего фабрика прекратила деятельность. Хвостохранилище предположительно не эксплуатируется с 2000 г.

Абагурская обогатительно-агломерационная фабрика перерабатывает первичные концентраты и получает вторичный концентрат. Потребителем продукции фабрики является ЕВРАЗ ЗСМК. Производительность корпусов 1 и 2 по промпродукту составляет 3,560 млн т в год, по концентрату – 2,780 млн т (с рудников Горной Шории и Абаканского рудника). Производительность корпуса 3 по промпродукту – 2,858 млн т в год, по концентрату – 1,960 млн т (с Тейского рудника и 10 % с рудников Горной Шории). Исследуемое хвостохранилище не эксплуатируется с 2001 г.

На каждом из исследуемых хвостохранилищ железной руды выделяли четыре концентрические зоны, отличающиеся по степени дисперсности материала седиментации (приустьевая, основная, приядерная и ядерная). Верхняя часть седиментационного бассейна (приустьевая зона) характеризуется легким механическим составом и обладает высокой дренирующей способностью. Основная зона, сформированная частицами средней дисперсности, занимает большую часть территории гидроотвала. Аккумулятивным центром водосборной чаши (прудка) являются приядерная и ядерная зоны, характеризующиеся тиксотропным состоянием или покрыты водой. В каждой из зон отбирали образцы в слое 0 – 40 см ввиду того, что рассматриваемый слой потенциально может выступать слоем аккумуляции 90 % корневой массы.

Минералогический и петрографический составы проб из различных зон седиментации гидроотвалов изучали с помощью стереоскопического микроскопа МБС-10 (увеличение 8 – 16 крат) в отраженном свете. Проводили изучение внешних (макроскопических) признаков и физических свойств. В некоторых случаях применяли простейшие микрохимические капельные реакции, реакции в порошках [5; 6].

Гранулометрический состав как один из важных показателей почв, от которого зависят многие аспекты существования и функционирования почвы, анализировали по Качинскому пирофосфатным методом пробоподготовки. При анализе отбирали фракции физического песка и физической глины размером более 0,01 (до 1 мм) и менее 0,01 мм.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Гидроналивной способ складирования отходов обогащения руд оказывает влияние на пространственное распределение материала в хвостохранилищах. Прежде всего выделяется контрастное сложение по гранулометрическому составу из-за осаждения частиц в водных условиях под действием гравитационного поля. Скорость осаждения зависит от массы, размера, формы и плотности вещества частиц, вязкости и плотности среды, а также от ускорения, силы тяжести и действующих на частицы центробежных сил.

Для всех зон седиментации характерна пространственная неоднородность гранулометрического состава: увеличение содержания физической глины и сниже-

ние фракций песка от приустьевой зоны к ядерной (см. таблицу). Все образцы были представлены мелкоземом, фракция более 1 мм отсутствовала. Перераспределение фракций физической глины в зонах седиментации на всех объектах исследования носит схожий характер, по количеству от общего ее содержания в каждой из зон выстраивается следующий ряд: пыль мелкая (около 50 %) – пыль средняя (около 30 %) – ил (около 20 %). Перераспределение фракций, входящих в группу физического песка, на всех исследуемых объектах неоднородно и зависело от вида разрушаемых горных пород.

Приустьевая зона, расположенная по внешнему периметру гидроотвалов, характеризуется песчаным (Мундыбашская ОФ) или супесчаным (Абагурская аглофабрика) гранулометрическим составом. В рассматриваемой зоне на всех объектах наблюдения замедленное почвообразование, поэтому основу почвенного покрова составляют инициальные эмбриоземы. Растительный покров полностью отсутствует или представлен единичными экземплярами рудеральной растительности ксерофитной экогруппы. В составе физического песка гидроотвала ОФ «Мундыбашская» чуть менее 50 % приходится на фракцию мелкого песка, а оставшаяся часть равными долями разделяется на крупный-средний песок и крупную пыль. Похожая закономерность распределения по фракциям физического песка прослеживается на гидроотвале Абагурской аглофабрики. В целом стоит отметить, что на поверхности гидроотвалов в этой зоне отмечается наивысшая степень проявления дефляционных и эрозионных процессов.

### Гранулометрический состав шламов хвостохранилищ

#### Granulometric composition of sludge from tailings dumps

| Зона<br>седимен-<br>тации                                                                            | Преобладающий<br>тип почвы              | Количество частиц, %, диаметром, мм |             |             |              |               |                |                          |                          |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------|-------------|-------------|--------------|---------------|----------------|--------------------------|--------------------------|
|                                                                                                      |                                         | 1,00 – 0,25                         | 0,25 – 0,05 | 0,05 – 0,01 | 0,01 – 0,005 | 0,005 – 0,001 | 0,001 – 0,0001 | Физ. глина<br>менее 0,01 | Физ. песок<br>менее 0,01 |
| Гидроотвал Мундыбашской обогатительной фабрики                                                       |                                         |                                     |             |             |              |               |                |                          |                          |
| IV                                                                                                   | Э. инициальный                          | 23,31                               | 42,35       | 24,77       | 3,41         | 4,63          | 1,52           | 9,6                      | 90,4                     |
| III                                                                                                  | Э. органо-аккумулятивный                | 0,42                                | 6,60        | 65,52       | 10,15        | 13,32         | 3,99           | 27,5                     | 72,5                     |
| III                                                                                                  | Э. дерновый                             | 3,94                                | 19,67       | 36,42       | 14,55        | 20,20         | 5,21           | 40,0                     | 60,0                     |
| I                                                                                                    | Э. грубогумусово-аккумулятивный глеевый | 0,49                                | 0           | 43,04       | 21,10        | 28,03         | 7,34           | 56,5                     | 43,5                     |
| Гидроотвал Абагурской агломерационной фабрики                                                        |                                         |                                     |             |             |              |               |                |                          |                          |
| IV                                                                                                   | Э. инициальный                          | 22,67                               | 33,41       | 19,61       | 8,96         | 12,44         | 2,91           | 24,3                     | 75,7                     |
| III                                                                                                  | Э. органо-аккумулятивный                | 28,91                               | 16,40       | 26,03       | 9,11         | 14,23         | 5,32           | 28,7                     | 71,3                     |
| III                                                                                                  | Э. органо-аккумулятивный глеевый        | 4,10                                | 0           | 25,54       | 28,42        | 34,65         | 7,30           | 70,4                     | 29,6                     |
| I                                                                                                    | Э. органо-аккумулятивный глеевый        | 0,96                                | 0           | 26,05       | 27,35        | 36,94         | 8,71           | 73,0                     | 27,0                     |
| П р и м е ч а н и е. Э. – эмбриозем; I – ядерная; II – приядерная; III – основная; IV – приустьевая. |                                         |                                     |             |             |              |               |                |                          |                          |

Минералогический состав представлен как первичными, так и вторичными минералами. Минеральный состав Мундыбашской ОФ характеризуется наличием обломков магнетита размером менее 0,5 мм (около 10 %), реже до 1,5 мм; единичным вкраплением молибденита; множеством кристаллов кальцита, в том числе обломков мрамора размерами от 1,5 до 2,0 мм и мельче; серпентина (размер обломков от 1,5 до 2,0 мм) около 10 – 15 %; единичными чешуйками талька; пироксенов менее 5 % и единично кварца. Для Абагурской аглофабрики характерно наличие магнетитовой пыли (около 5 – 10 %); единично железного шлака и халькопирита; единично пирита; кальцита (кристаллы) и доминирование обломков мрамора; кварца около 10 %; мусковита около 20 %; пироксенов около 1 – 3 %; единичное содержание амфиболы и гипса (селенита). Для хвостохранилищ в рассматриваемой зоне седиментации характерно наличие вторичных минералов, таких как гетит и гематит, которые встречаются единично.

По результатам наблюдений в основной зоне седиментации двух хвостохранилищ сформировались органо-аккумулятивные эмбриоземы [7; 8]. На поверхности присутствует рудеральная растительность ксерофитной экогруппы, общее проективное покрытие не превышает 2 – 5 %. Общее содержание физического песка для этой зоны составляет 71 – 90 %, при этом гранулометрический состав гидроотвалов соответствует легкому суглинку. Несмотря на это, на каждом из объектов перераспределение фракций песка не идентично: преобладающей группой на хвостохранилище Мундыбашской ОФ является 0,05 – 0,01 мм (примерно 90 %), Абагурской аглофабрики – 1,00 – 0,25 мм (примерно 39 %) и 0,05 – 0,01 мм (примерно 36 %). На поверхности развиты процессы эрозии, присутствуют промоины глубиной от 15 до 40 см, выражены следы дефляционных процессов.

Минералогический состав зоны Мундыбашской ОФ представлен обломками менее 0,5 мм (около 10 %) магнетита и железного шлака; доминированием кристаллов кальцита, обломков мрамора размером менее 0,5 мм (изредка 1,0 – 1,5 мм); обломками менее 0,5 мм (редко 1,0 – 1,5 мм) серпентина (около 5 %); единичными чешуйками талька и кварца; обломками пироксенов размером 1,0 – 1,5 мм и мельче (около 1 – 5 %). Из вторичных минералов присутствует единично гетит. Минералогический состав в основной зоне хвостохранилища идентичен приустьевой зоне, однако размеры обломков менее 0,5 – 1,0 мм; в пылевой фракции: магнетит (около 5 – 10 %), доминируют кальцит, кварц и мусковит, пироксены, вторичные минералы отсутствуют.

Приядерная зона выступает в качестве ярко-выраженной переходной границы по преобладанию или значительному увеличению физической глины в гранулометрическом составе. Такое увеличение обусловлено особенностями намыва гидроотвала и седимен-

тации частиц породы, а также приносом фракции мелкой пыли в результате развития эрозионных процессов в момент выпадения дождей. Утяжеление гранулометрического состава от среднего суглинка до средней глины (см. таблицу) приводит к формированию на поверхности гидроотвалов дернового и органо-аккумулятивного или органо-аккумулятивного глеевого (со следами оксидов железа из-за сезонного застоя влаги) эмбриоземов. В результате этого наблюдается разница в сформировавшихся экогруппах рудеральной растительности. В основной зоне преобладают мезоксерофитная или ксеромезофитная группы с площадью проективного покрытия до 10 %, на гидроотвале Мундыбашской ОФ – до 50 %.

Минералогический состав хвостохранилища ОФ представлен частицами менее 0,5 мм железного шлака и магнетита (около 10 %); обломками угля и шлака; кристаллами кальцита и обломками мрамора размером 1,0 – 0,5 мм и мельче (около 3 %); единично кварца и чешуйками талька; фрагментами современной растительности (много); вторичные минералы отсутствуют. Минералогический состав приядерной зоны хвостохранилища аглофабрики идентичен составу приустьевой зоны, однако имеет ряд некоторых особенностей: размеры обломков минералов менее 0,5 – 1,0 мм; количество магнетитовой пыли около 5 – 10 %; доминирование кварца и кальцита; содержание пирита около 0,5 %; вторичные минералы отсутствуют.

На каждом из исследуемых объектов ядерная зона является конечной зоной аккумуляции глинистых частиц. В проанализированных образцах содержание физической глины изменяется от 56 до 73 %. При этом соотношение фракций, относящихся к физической глине, остается условно неизменным, хотя можно предположить перераспределение долей в пользу более тонких частиц. В составе физического песка отсутствует фракция крупного-среднего и мелкого песка (1,00 – 0,05 мм), вся доля приходится на крупную пыль (0,05 – 0,01 мм). Тяжелый гранулометрический состав приводит к затруднению фильтрации и длительному застою талых снеговых и дождевых вод. На поверхности ядерной зоны в настоящий момент диагностировано два типа глеевых эмбриоземов (см. таблицу). Различие в формировании эмбриозема на том или ином объекте обусловлено длительностью посттехногенного периода, литогенными свойствами пород и продуктивностью растительных сообществ [9; 10]. Сформировавшиеся фитоценозы относятся к ксеромезофитной/мезофитной экогруппе, встречаются гигрофиты (камыш, осока и другие), но в период засухи (дефицита влаги) такие растения погибают или находятся в угнетенном состоянии.

Минералогический состав ядерной зоны хвостохранилища первичного обогащения представлен частицами железного шлака и магнетита размерами менее 0,01 мм (около 1 – 3 %); неопределимыми минераль-

ными частицами размером менее 0,01 мм, а также современными растительными фрагментами (около 15 %); вторичные минералы отсутствуют. Минералогический состав прищипной зоны хвостохранилища, сформированного при вторичном обогащении, характеризуется таким же составом, как и предыдущие, доминирующие по рельефу зоны. Тем не менее имеются свои особенности: преобладание обломков минералов размером менее 0,5 – 1,0 мм, наличие магнетитовой пыли около 5 – 10 % и доминирование кальцита и кварца; вторичные минералы отсутствуют, как и в предыдущих двух зонах седиментации.

## ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Несмотря на значительное количество исследований по влиянию минералогического состава на развитие почв, формирующихся на поверхностях хвостохранилищ железных руд, рассматриваемая проблема изучена недостаточно [11 – 14]. Это определяет отсутствие общепринятых показателей скорости развития почв, формирующихся на техногенном минеральном субстрате, и степени накопления в таких почвах биофильных элементов.

Наиболее распространенными первичными минералами, преобладающими в крупных фракциях естественных почв, являются кварц, кальцит, слюды. При этом стоит отметить, что такой набор минералов является индикатором благоприятного процесса почвообразования на поверхности техногенных ландшафтов [15 – 17]. От первичных минералов зависят физические свойства почв, они уже являются резервным источником зольных элементов питания растений, в результате их видоизменения образуются вторичные минералы (минералы простых солей, минералы оксидов и гидроксидов, глинистые минералы). Минералы простых солей (кальцит, магнезит, доломит, гипс и др.) определяют качественный и количественный составы засоления почв. Минералы оксидов и гидроксидов благодаря своей огромной поверхности поглощают много фосфора, делают его малодоступным растениям. Глинистые минералы (монтмориллонит, каолинит) и гидрослюды, преобладающие в тонкодисперсных фракциях, в сочетании с гумусовыми кислотами способствуют улучшению водно-физических свойств почв, являются источниками элементов минерального питания для растений, обуславливают поглощательную способность почв [8].

Важнейшим индикатором педогенных преобразований почв техногенных ландшафтов является кальцит [18; 19]. Наличие карбонатов по профилю хорошо отображает трансформацию исходного субстрата в процессе почвообразования. Наиболее высокие содержания кальцита наблюдаются в прищипной, основной и прищипной зонах Мундыбашского хвостохранилища. Количество и разнообразие форм выделения кальцита

достаточно хорошо отражает интенсивность процессов почвообразования и трансформации исходного субстрата. Содержание кальцита обусловлено, с одной стороны, более благоприятными гидрологическими условиями (промывной водный режим), а с другой – вероятно, продолжительным временем почвообразования на участках ввиду того, что ядерная зона подвержена периодическому затоплению.

Наличие вторичных минералов (гетита), сформированного в результате окисления пироксена и гематита (дегидратации гетита в прищипной и основной зонах хвостохранилищ), свидетельствует об интенсивности и скорости процессов выветривания. Можно предположить, что почти все содержащее железо минералы после изменения в результате воздействия воды и гумусовых кислот преобразуются в лимонит. Кроме того, выветривание оксидов железа (магнетит, гематит, гетит), встречающихся в минеральном составе рассматриваемых хвостохранилищ, может приводить к выделению железа в поровые воды и осаждению в виде ферригидрита [20 – 22], а также к образованию в воде и осаждению в водоносных породах гидроксида железа. Ферригидрит в дальнейшем трансформируется в гематит, также может образовываться и гетит. Тип конечного минерала зависит от физических и химических факторов в процессе функционирования гидроотвалов из отходов обогащения железных руд (температуры, величины pH, концентрации Fe(III) в растворе, природы и количества сопутствующих анионов). Доля гематита достигает максимума в слабощелочной среде, а минимума – в умеренно кислой. Рост температуры и снижение влажности приводят к более быстрой трансформации ферригидрита и увеличению отношения гематит : гетит [22]. При контакте с водой, содержащей сульфиды, происходит образование гидросульфида железа, который, в свою очередь, может адсорбироваться на поверхности частиц минеральных зерен и превращаться в оксиды железа, причем в более сложных процессах может участвовать и оксид железа FeO<sub>2</sub>.

По своей сути минеральный скелет почв, состоящий в основном из кварца, кальцита и железистых первичных и вторичных минералов, является основой, внутри которой протекает основная часть химических, физико-химических и биохимических процессов, составляющих сущность почвообразования на поверхности исследуемых хвостохранилищ. Почвообразование как форма биологического выветривания приводит к трансформации в гранулометрическом составе, а периодическое промачивание – к перераспределению и изменению соотношения фракций. Так, например, зимнее промачивание в серых лесных почвах приводит к усреднению фракций до 0,01 мм и повышает подвижность ила, что усиливает преобразование почвообразующих пород [23].

Более интенсивный почвообразовательный процесс в настоящее время наблюдается на поверхности минерального субстрата гидроотвала Мундыбаш-

ской обогатительной фабрики. Так, за прагматически приемлемый период там сформировались грубогумусовые-аккумулятивные и дерновые эмбриоземы. Это обусловлено более сбалансированным гранулометрическим составом пород, состоящим не более чем на 60 % из физической глины, не препятствующей сезонному промачиванию корнеобитаемой толщи и фильтрации избытка влаги в нижележащие горизонты. При превышении содержания физической глины более чем на 60 % как в придерной, так и ядерной зонах гидротвала Абагурской аглофабрики наблюдается процесс формирования водоупорного слоя практически на поверхности минеральной части (в слое 10–30 см), что приводит к застою влаги, особенно в весенний и осенний периоды. Это явление приводит к замедлению процессов почвообразования на поверхности хвостохранилищ. Так, на рассматриваемых территориях за длительный период времени сформировались лишь органо-аккумулятивные эмбриоземы, что говорит о неудовлетворительном почвенно-экологическом состоянии при застойном водном режиме.

## Выводы

Минеральные преобразования динамичны в почвах техногенных ландшафтов, сформированных из отходов первичного и вторичного обогащений руд черных металлов. Минеральная часть почвообразующей породы, сформированной отходами первичного обогащения, представлена в основном магнетитом, кальцитом, кварцем и чешуйками талька и незначительно изменяется от одной зоны седиментации частиц к другой. В хвостохранилище вторичного обогащения минеральная часть более однородна от зоны к зоне и состоит в основном из мусковита, кварца, кальцита и магнетитовой пыли. Для основной и приустьевой зон седиментации обоих хвостохранилищ характерно формирование вторичных минералов (гетит и гематит). Предположительно образование гематита происходит в результате дегидратации гидроксидов железа. Гематит образуется через фазу ферригидрита – путь, характерный для почв (особенно в гумидных регионах), а при определенных гидротермических условиях может формироваться гетит.

Даже при благоприятном минералогическом составе почвообразующих пород отмечается замедление почвообразовательного процесса вследствие особенностей гранулометрического состава хвостохранилищ железных руд. При содержании физической глины в породах более 60 % за прагматически приемлемый срок (не менее 20 лет) на поверхности формируются лишь органо-аккумулятивные эмбриоземы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Соколов И.А. Теоретическая проблема генетического почвоведения. Новосибирск: Наука; 2004:288.
- Фридланд В.М. Основные принципы и элементы базовой классификации почв и программа работ по ее созданию. Москва: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева; 1982:150.
- Vassilev S.V., Vassileva C.G. Mineralogy of combustion wastes from coal-fired power station. *Fuel Processing Technology*. 1996;47(3):261–280.  
[https://doi.org/10.1016/0378-3820\(96\)01016-8](https://doi.org/10.1016/0378-3820(96)01016-8)
- Долинский В.А. Фабрики для обогащения железных руд. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ; 2007:144.
- Сазонов А.М. Оптическое определение порообразующих минералов. Красноярск: СФУ; 2017:100.
- Gromoglasov A.A., Kopylov A.F., Pilschikov A.P. Water Preparation: Processes and Devices. Moscow: Energoatomizdat; 1990:99.
- Подземные органы растений в травяных экосистемах / А.А. Титлянова, Н.П. Косых, Н.П. Миронычева-Токарева, И.П. Романова. Новосибирск: Наука; 1996:125.
- Скрябина О.А. Минералогический состав почв и почвообразующих пород. Пермь: ФГОУ ВПО «Пермская ГСХА»; 2010:120.
- Андроханов В.А., Куляпина В.Д., Курачев В.М. Почвы техногенных ландшафтов: генезис и эволюция. Новосибирск: Изд-во СО РАН; 2004:50–51.
- Carras J.N., Day S.J., Saghaei A., Williams D.J. Greenhouse gas emissions from low-temperature oxidation and spontaneous combustion at open-cut coal mines in Australia. *International Journal of Coal Geology*. 2009;78(2):161–168.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.coal.2008.12.001>
- Deng Y., Flury M., Harsh J.B., Felmy A.R., Qafoku O. Cancrinite and sodalite formation in the presence of cesium, potassium, magnesium, calcium and strontium in Hanford tank waste simulants. *Applied Geochemistry*. 2006; 21(12):2049–2063.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2006.06.019>
- Ram L.C., Tripathi P.S.M., Mishra S.P. Mossbauer spectroscopic studies on the transformations of iron-bearing minerals during combustion of coals: Correlation with fouling and slagging. *Fuel Processing Technology*. 1995;42(1):47–60.  
[https://doi.org/10.1016/0378-3820\(94\)00111-6](https://doi.org/10.1016/0378-3820(94)00111-6)
- Reed S.J.B. Electron Microscope Analysis and Scanning Electron Microscopy in Geology. Cambridge University Press; 2005:206.
- Манаков Ю.А. Нарушенные земли Кузбасса. Путь решения проблемы – фонд рекультивации. *Промышленная экология*. 2008;(4):29–34.  
Manakov Yu.A. The disturbed lands of Kuzbass. The way to solve the problem is the reclamation fund. *Promyshlennaya ekologiya*. 2008;(4):29–34. (In Russ.).
- Новоселов А.А. Индикаторы почвообразования на техногенных субстратах золоотвалов. *Российский журнал прикладной экологии*. 2019;(3(19)):46–50.  
Novoselov A.A. Indicators of soil formation on technogenic substrates of ash dumps. *Rossiiskii zhurnal prikladnoi ekologii*. 2019;(3(19)):46–50. (In Russ.).
- Querol X., Izquierdo M., Monfort E., Alvarez E., Font O., Moreno T., Alastuey A., Zhuang X., Lud W., Wang Y. Environmental characterization of burnt coal gangue banks at Yangquan, Shanxi Province, China. *International Journal of Coal Geology*. 2008;75(2):93–104.  
<https://doi.org/10.1016/j.coal.2008.04.003>

17. Finkelman R.B. Potential health impacts of burning coal beds and waste banks. *International Journal of Coal Geology*. 2004;59(1-2):19–24.  
<https://doi.org/10.1016/j.coal.2003.11.002>
18. Uzarowicz Ł., Skiba S. Technogenic soils developed on mine spoils containing iron sulphides: Mineral transformations as an indicator of pedogenesis. *Geoderma*. 2011;163(1-2):95–108.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.04.008>
19. Uzarowicz Ł., Skiba S., Leue M., Zagórski Z., Gąsiński A. Technogenic soils (Technosols) developed from fly ash and bottom ash from thermal power stations combusting bituminous coal and lignite. Part II. Mineral transformations and soil evolution. *Catena*. 2018;62(1):255–259.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2017.11.005>
20. Warren C.J., Dudas M.J. Formation of secondary minerals in artificially weathered fly ash. *Journal of Environmental Quality*. 1985;14(3):405–410.  
<https://doi.org/10.2134/JEQ1985.00472425001400030019X>
21. Zevenbergen C., Bradley J.P., Van Reeuwijk L.P., Shyam A.K., Hjelmar O., Comans R.N.J. Clay formation and metal fixation during weathering of coal fly ash. *Environmental Monitoring and Assessment*. 1999;33(19):3405–3409.  
<http://dx.doi.org/10.1021/es9900151>
22. Водяницкий Ю.Н. Соединения железа и их роль в охране почв. Москва: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева; 2010:155.
23. Дюкарев А.Г. Ландшафтно-динамические аспекты таежного почвообразования в Западной Сибири. Томск: Изд-во Научно-технической литературы; 2005:283.

## Сведения об авторах

## Information about the Authors

**Иван Петрович Беланов**, к.б.н., старший научный сотрудник  
Лаборатории рекультивации почв, Институт почвоведения и  
агрохимии Сибирского отделения РАН  
**E-mail:** [bel\\_ivan@rambler.ru](mailto:bel_ivan@rambler.ru)

**Ася Максимовна Шипилова**, к.с.-х.н., доцент кафедры геологии,  
геодезии и безопасности жизнедеятельности, Сибирский госу-  
дарственный индустриальный университет  
**E-mail:** [asya\\_nk77@mail.ru](mailto:asya_nk77@mail.ru)

**Ольга Петровна Мезенцева**, к.г.-м.н., доцент кафедры геологии,  
геодезии и безопасности жизнедеятельности, Сибирский госу-  
дарственный индустриальный университет  
**E-mail:** [mesentsevaop@yandex.ru](mailto:mesentsevaop@yandex.ru)

**Ivan P. Belanov**, Cand. Sci. (Biological), Senior Researcher of the Labo-  
ratory of Soil Reclamation, Institute of Soil Science and Agrochemistry,  
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences  
**E-mail:** [bel\\_ivan@rambler.ru](mailto:bel_ivan@rambler.ru)

**Asya M. Shipilova**, Cand. Sci. (Agricultural), Assist. Prof. of the Chair  
of Geology, Geodesy and Life Safety, Siberian State Industrial Uni-  
versity  
**E-mail:** [asya\\_nk77@mail.ru](mailto:asya_nk77@mail.ru)

**Ol'ga P. Mezentseva**, Cand. Sci. (Geol.-Mineralogical), Assist. Prof. of the  
Chair of Geology, Geodesy and Life Safety, Siberian State Industrial Uni-  
versity  
**E-mail:** [mesentsevaop@yandex.ru](mailto:mesentsevaop@yandex.ru)

## Вклад авторов

## Contribution of the Authors

**И. П. Беланов** – отбор проб, написание статьи.  
**А. М. Шипилова** – обработка и анализ проб.  
**О. П. Мезенцева** – обработка и анализ проб.

**I. P. Belanov** – sampling, writing the text.  
**A. M. Shipilova** – sample processing and analysis.  
**O. P. Mezentseva** – sample processing and analysis.

Поступила в редакцию 30.10.2023  
После доработки 01.07.2024  
Принята к публикации 21.08.2024

Received 30.10.2023  
Revised 01.07.2024  
Accepted 21.08.2024