



## **Гранулированный доменный шлак стимулирует рост саженцев березы пушистой в условиях закисленного почвенного субстрата**

**Ольга В. Захарова**<sup>1,2</sup>✉, [olgazakharova1@mail.ru](mailto:olgazakharova1@mail.ru),  <https://orcid.org/0000-0001-8590-2529>

**Ольга А. Федорова**<sup>3</sup>, [fed-olga78@mail.ru](mailto:fed-olga78@mail.ru)  <https://orcid.org/0000-0001-7581-6141>

**Григорий В. Григорьев**<sup>1</sup>, [bboykick@outlook.com](mailto:bboykick@outlook.com)  <https://orcid.org/0000-0003-1236-3960>

**Александр А. Гусев**<sup>1,2</sup>, [nanosecurity@mail.ru](mailto:nanosecurity@mail.ru)  <https://orcid.org/0000-0002-8699-9112>

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина», ул. Интернациональная, 33, Тамбов, 392036, Российская Федерация

<sup>2</sup> Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский пр-кт, д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация

<sup>3</sup> Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, Воронеж, 394087, Российская Федерация

Проведено исследование влияния гранулированного доменного шлака на рост саженцев березы пушистой (*Betula pubescens* Ehrh.) в условиях модельных закисленных субстратов (pH 4.2–5.2). Показано, что внесение шлака, основными компонентами которого являются оксиды кальция, кремния, магния и алюминия, эффективно нейтрализует кислотность почвы. Раскисление субстрата до pH ~ 6.0 достоверно стимулировало ростовые показатели растений: в слабокислом субстрате (pH 5.2) высота саженцев увеличилась на 74%, а диаметр стволика в сильнокислом субстрате (pH 4.2) – на 38% по сравнению с контрольными растениями без шлака. Нормализация pH также способствовала повышению интенсивности фотосинтеза и содержания хлорофиллов до уровня контроля, одновременно снижая активность антиоксидантных ферментов, что свидетельствует о смягчении окислительного стресса. Результаты демонстрируют тройной экологический эффект: безопасная утилизация промышленного отхода, улучшение качества кислых лесных почв и стимуляция роста лесных культур, что вносит вклад в декарбонизацию металлургической отрасли.

**Ключевые слова:** утилизация промышленных отходов, закисление почв, декарбонизация, гранулированный доменный шлак, береза пушистая

**Финансирование:** Исследования проводились в рамках реализации государственного задания FEMG-2024-0018 "Физико-химические и биотехнологические подходы к переработке вторичных продуктов металлургии для декарбонизации отрасли".

**Благодарности:** автор благодарит рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

**Конфликт интересов:** автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Захарова О.В. Гранулированный доменный шлак стимулирует рост саженцев березы пушистой в условиях закисленного почвенного субстрата / О.В. Захарова, О.А. Федорова, Г.В. Григорьев, А.А. Гусев // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 4 (60). – С. 493-508. – Библиогр.: с. 504–507 (42 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/29>.

**Поступила** 29.06.2025. **Пересмотрена** 29.10.2025. **Принята** 30.11.2025. **Опубликована онлайн** 26.12.2025.

## **Granulated blast furnace slag stimulates the growth of downy birch seedlings in acidified soil conditions**

**Olga V. Zakharova**<sup>1,2</sup> ✉, olgazakharova1@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0001-8590-2529>

**Olga A. Fedorova**<sup>3</sup>, fed-olga78@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0001-7581-6141>

**Grigory V. Grigoriev**<sup>1</sup>, bboykick@outlook.com  <https://orcid.org/0000-0003-1236-3960>

**Alexander A. Gusev**<sup>1,2</sup>, nanosecurity@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0002-8699-9112>

<sup>1</sup> Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Tambov State University named after G.R. Derzhavin", st. International, 33, Tambov, 392036, Russian Federation

<sup>2</sup> Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "National University of Science and Technology MISIS", Leninsky Prospekt, 4, building 1, Moscow, 119049, Russian Federation

<sup>3</sup> Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov" Timiryazev str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation

### **Abstract**

A study was conducted to investigate the effect of granulated blast furnace slag on the growth of downy birch (*Betula pubescens* Ehrh.) seedlings in model acidified substrates (pH 4.2–5.2). The addition of slag, whose main components are calcium, silicon, magnesium, and aluminum oxides, was shown to effectively neutralize soil acidity. Substrate deacidification to pH ~6.0 significantly stimulated plant growth: seedling height increased by 74% in a slightly acidic substrate (pH 5.2), and stem diameter by 38% in a strongly acidic substrate (pH 4.2), compared to control plants without slag. Normalizing pH also contributed to an increase in photosynthesis intensity and chlorophyll content to control levels, while simultaneously reducing the activity of antioxidant enzymes, indicating mitigation of oxidative stress. The results demonstrate a triple environmental benefit: safe disposal of industrial waste, improvement of the quality of acidic forest soils, and stimulation of forest plant growth, which contributes to the decarbonization of the metallurgical industry.

**Keywords:** *industrial waste disposal, soil acidification, decarbonization, granulated blast furnace slag, downy birch*

**Funding:** The research was conducted as part of the state contract FEMG-2024-0018 "Physicochemical and Biotechnological Approaches to Recycling Secondary Metallurgy Products for Industry Decarbonization."

**Acknowledgments:** The author thanks the reviewers for their contributions to the peer review of this article.

**Conflict of interest:** The author declares no conflicts of interest.

**For citation:** Zakharova O.V., Fedorova O.A., Grigoriev G.V., Gusev A.A. (2025). Granulated blast furnace slag stimulates the growth of downy birch seedlings in acidified soil conditions. *Forestry Engineering journal*, Vol. 15 No. 4 (60), pp. 493-508 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/29>.

**Received** 29.06.2025. **Revised** 29.10.2025. **Accepted** 30.11.2025. **Published online** 26.12.2025.

### **Введение**

Черная металлургия является одной из базовых отраслей промышленности, а также одним из крупнейших источников твердых техногенных отходов и выбросов CO<sub>2</sub> - на долю

сталелитейной промышленности приходится около 6-7% глобальных выбросов CO<sub>2</sub> [1]. По оценкам Международного энергетического агентства (МЭА), прямые выбросы CO<sub>2</sub> составляют примерно 1.4 тонны CO<sub>2</sub> на тонну произведенной стали [2], а по данным

международной консалтинговой компании McKinsey и Всемирной ассоциации производителей стали – 1.85 [3, 4].

Среди основных крупнотоннажных отходов черной металлургии можно выделить шлаки [5]. В настоящее время годовой объем производства металлургических шлаков во всем мире составляет около 600 миллионов тонн [6]. Шлак образуется в качестве побочного продукта при выплавке чугуна и стали, что приводит к значительной вариабельности их состава и физических свойств. Основными компонентами металлургического шлака как правило являются оксид кальция (CaO), диоксид кремния (SiO<sub>2</sub>), оксид железа (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), оксид алюминия (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) и оксид магния (MgO), а также незначительные количества MnO, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и TiO<sub>2</sub> [5].

На данный момент, основными сферами использования металлургических шлаков являются строительная промышленность [7-9], экология, прежде всего, в качестве сорбента тяжелых металлов [10-12] и сельское хозяйство [13-15]. Использование в сельском хозяйстве подразумевает применение шлаков как мелиорантов, удобрений и раскислителей закисленных почв. В 2011 году в Китае началась реализация первой программы по использованию сталеплавильных шлаков в качестве удобрений, финансируемой Taiyuan Iron and Steel Group и Harsco Corporation из США [16]. К примеру, показано, что полная замена коммерческих удобрений на сталеплавильный шлак позволила увеличить рост гороха [17]. В другом исследовании при культивировании ячменя на почвах содержащих шлак урожайность зерна повышалась на 21% [18]. Отмеченные эффекты могут быть связаны с присутствием важных микроэлементов в составе шлака, а также с улучшением качества почвы. Стоит отметить, что наиболее часто, металлургический шлак предлагается в качестве раскислителя почв сельхоз угодий [19-21].

При этом, подкисление лесных почв во всем мире, также стало серьезной экологической проблемой, а количество публикаций о глобальном подкислении лесных почв неуклонно

растет [22]. Такие методы ведения лесного хозяйства, как сплошные рубки, являются одним из основных нарушений, приводящих к выносу питательных веществ из почвы. Выщелачивание, потеря основных катионов и их удаление при заготовке древесины приводят к подкислению почвы, что может замедлить регенерацию или восстановление лесов [23]. Подкисление лесной почвы может вызвать повышение токсичности Al<sup>3+</sup> для растений и снижение плодородия почвы, что влияет на рост растений в лесной экосистеме, обилие почвенной фауны и разнообразие микроорганизмов [24]. В связи с вышесказанным, разработка методов раскисления почв лесных насаждений является актуальной задачей, а более широкое применение сталеплавильных шлаков принесло бы значительные выгоды как с экологической, так и с экономической точки зрения [25].

Поскольку оценка эффектов воздействия гранулированного доменного шлака на представители распространенных лесных пород в различных экологических условиях ранее не проводилась, в нашей работе исследовались морфометрические, физиологические и биохимические аспекты влияния этого отхода на саженцы березы пушистой в условиях субстратов с различной кислотностью. При этом ставились задачи исследовать стресс-протекторные свойства шлака как мелиоранта-раскислителя, а также источника микроэлементов, обладающих стимулирующими свойствами.

### **Материалы и методы**

В работе использовался гранулированный доменный шлак ПАО «Северсталь» (Череповец, Россия). Состав используемого доменного шлака был исследован методом рентгенофлуоресцентного анализа на спектрометре ARL 9900 (Thermo Fisher Scientific (Ecublens) SARL, Швейцария). Морфологию частиц шлака изучали методом сканирующей электронной микроскопии на микроскопе JCM-7000 NeoScope (JEOL, Япония).

В качестве объекта исследования использовали берёзу пушистую (*Betula pubescens* Ehrh.) гибрида 15-1. Селекционный объект

единого генетико-селекционного комплекса (ЕГСК) берёз расположен в Семилукском питомнике Воронежской области (Россия). Для проведения эксперимента использовали микрорастения размноженные в культуре *in vitro* (Рис. 1).

В качестве субстрата для культивирования использовали искусственный грунт согласно ГОСТ Р ИСО 18763-2019. Для проведения опыта было выбрано три варианта кислотности субстрата, имитирующих почвы разной степени закисленности: рН солевой вытяжки ~ 4.2 – сильнокислая; 4.8 – среднекислая; 5.2 – слабокислая. В качестве контроля использовали субстрат с рН солевой вытяжки ~ 6. Во все закисленные грунты вносили гранулированный шлак до достижения нейтральной реакции (рН солевой вытяжки ~ 6).

Полученные модельные субстраты помещали в пластиковые контейнеры объемом 1 литр и высаживали по одному растению на контейнер. В каждом варианте культивировали по 15 растений. Исследование проводили в условиях теплицы.

Учетные показатели: высота от начала прироста и диаметр стволика (измерялся штангенциркулем у основания прироста). Измерения площади листа проводились при помощи лазерного переносного измерителя площади листа CI-202 (США), длина волны лазерного диода 670 нм, максимальная длина измерения 360 мм, ширина 150 мм, скорость сканирования 127 мм/сек, точность проводимых измерений 0.01 см<sup>2</sup>.



Рисунок 1. Экспериментальные растения: а) размножение *in vitro* растений березы пушистой; б) растения в теплице.

Figure 1. Experimental plants: a) *in vitro* propagation of downy birch plants; b) plants in a greenhouse.

Источник: собственная композиция авторов  
Source: author's composition

Для измерения скорости поглощения углекислого газа листом *in vivo* использовали портативную систему измерения газообмена SIRAS-4 (PP Systems, США), оборудованную специальной рабочей камерой, предназначенной для проведения экспериментов с использованием метода открытой системы.

Содержание хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов определяли по методике Wellburn [26]. Около 100 мг листовой ткани растирали в фарфоровой ступке в пробирках на 5 мл,

добавляли 1 мл 80% ацетона и инкубировали с перемешиванием 15 мин в темноте. После центрифугирования 5 мин при 13000 об./мин супернатант отбирали в новые пробирки с защитой от света. Экстракцию 80% ацетоном повторяли дважды, супернатанты объединяли и доводили до 3 мл. Оптическую плотность растворов измеряли на 663, 646 и 470 нм против 80% ацетона. Содержание пигментов рассчитывали по следующим формулам (1 - 3):

$$\text{Хлорофилл } a = 12,21 \times A(663) - 2,81 \times A(646) \quad (1)$$

$$\text{Хлорофилл } b = 20,13 \times A(646) - 5,03 \times A(663) \quad (2)$$

$$\text{Каротиноиды} = \frac{1000 \times A(470) - 3,27 \text{ хл.А} - 104 \text{ хл.В}}{198} \quad (3),$$

где

A (663, 646, 470) – поглощение при 663, 646, 470 нм.

Для измерения содержания пролина в листьях берёзы пушистой, готовили кислый нингидрин путем нагревания 1.25 г нингидрина в 30 мл ледяной уксусной кислоты и 20 мл 6 М фосфорной кислоты, с перемешиванием до растворения. Навеску материала 0.1 г (полностью развернутые листья) гомогенизировали в 1,5 мл 3% водного раствора сульфосалициловой кислоты, фильтровали через бумагу Whatman # 2. После чего 0.8 мл фильтрата смешивали с 0.8 мл кислого нингидрина и 0.8 мл ледяной уксусной кислоты. Реакция проходила в течение часа при 100°C после чего её останавливали на ледяной бане. Реакционную смесь экстрагировали 1,6 мл толуола, осторожно перемешивая пробирочной мешалкой 15-20 с. Верхний слой толуола с хромофором отделяли от водной фазы, нагревали до комнатной температуры и измеряли при длине волны 520 нм (толуол использовали в качестве контроля). Измерения проводили на

спектрофотометре Multiskan Sky (Thermo Scientific, США). Концентрацию пролина определяли по стандартной кривой и рассчитывали в мкг пролина/г сырой массы [27].

Для определения активности ферментов, 0.1 г листовой ткани растирали с использованием ступки и пестика с 2 мл натрий-фосфатного буфера (рН 7.8), содержащего 1 мМ EDTA и 2% поливинилполипирролидон и центрифугировали при 15000 g 10 мин при 4°C. Для предотвращения снижения или потери активности образцы после центрифугирования помещали в твердотельный термостат при температуре 4°C. В супернатанте определяли активность ферментов спектрофотометрическим методом [28, 29] на приборе Multiskan Sky (Thermo Scientific, США).

Статистическая обработка данных проводилась с использованием теста одностороннего дисперсионного анализа (ANOVA). На графиках и в таблицах данные представлены в виде среднего ± стандартного отклонения, звездочками отмечены статистически значимые различия (p < 0,05).

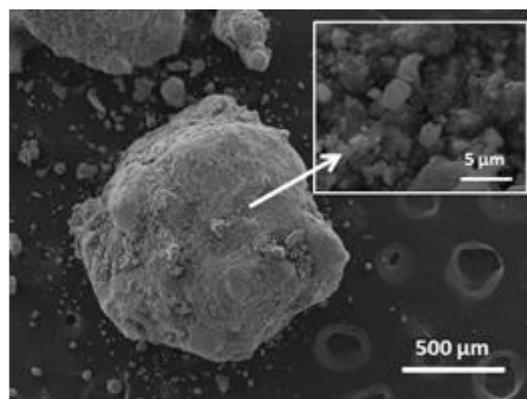
### Результаты

#### Характеризация шлака

Образец гранулированного доменного шлака состоял из частиц размером 0.5 – 5 мм (Рис. 2а), имеющих иррегулярную морфологию и пористую структуру (Рис. 2б).



а)



б)

Рисунок 2. Образец шлака: а) внешний вид; б) электронные микрофотографии

Figure 2. Slag sample: a) general view; b) electron micrographs

Источник: собственная композиция авторов  
Source: author's composition

## ЭКОЛОГИЯ

Рентгенофлуоресцентный анализ гранулированного доменного шлака показал (Табл. 1), что основными компонентами образца являются оксид кальция (45.4 %), диоксид кремния

(32.3 %), оксид магния (12.3 %) и оксид алюминия (7.3 %). Остальные компоненты содержались в концентрации менее 1 %.

Таблица 1  
Table 1

Состав образца шлака  
Slag sample composition

Компонент / Component	aO	iO <sub>2</sub>	gO	l <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	a <sub>2</sub> O	zO	nO		e <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	iO <sub>2</sub>
Содержание, масс. % / Content, wt. %	5.4±3.4	2.3±3.7	2.3±2.3	.3±.7	.67±0.08	.53±0.05	.43±0.04	.31±0.02	.13±0.03	.06±0.01

Источник: собственные вычисления авторов / Source: own calculations

Таким образом, в работе использовался образец шлака, состоящий из пористых гранул размером 0.5 – 5 мм содержащих преимущественно оксиды кальция, кремния, магния и алюминия. В небольших количествах (менее 1 %) зафиксированы натрий, калий, марганец, сера, железо и титан.

Результаты оценки влияния шлака на березу пушистую.

### Морфометрические параметры

Важной характеристикой качества посадочного материала, наряду с потенциалом роста корней, жизнеспособностью и др. является его морфометрические параметры. В связи с чем, перед закладкой опыта были измерены: высота растений, диаметр корневой шейки стволика, среднее количество листьев на одном растении и средняя площадь листовой пластины (Табл. 2).

Таблица 2  
Table 2

Морфометрические параметры побегов березы пушистой перед началом эксперимента  
Morphometric parameters of downy birch shoots before the start of the experiment

Параметр / Parameter	Значение / Value
Высота растений, см / Plant height, cm	6.9±0.29 / 6.9±0.29
Диаметр корневой шейки стволика, мм / Root collar diameter, mm	1.4±0.08 / 1.4±0.08
Среднее количество листьев, шт / Average number of leaves, pcs.	5.6±0.37 / 5.6±0.37
Площадь листа, см <sup>2</sup> / Leaf area, cm <sup>2</sup>	3.1±0.18 / 3.1±0.18

Источник: собственные вычисления авторов  
Source: own calculations

Через 60 дней после постановки эксперимента выявлено значительное преимущество в росте и развитии растений, высаженных в почвосмеси, содержащие гранулированный доменный шлак, по сравнению с растениями, высаженными в субстрат без

дополнения шлака (Рис. 3). Как видно из представленных данных (Рис. 3а), максимальные значения ростовых параметров наблюдались в субстрате с рН 5.2, содержащим гранулированный шлак (26.1±2.1 см). При этом, самая низкая ростовая активность зафиксирована у растений

берёзы в варианте с рН 4.2 ( $15.0 \pm 2.1$  см). В целом, при сравнении контрольных и опытных вариантов с одинаковым рН можно отметить, что добавление шлака повлияло на увеличение ростовых показателей берёзы, по-видимому, за счёт снижения кислотности в субстрате и дополнительного обеспечения корней макро- и микроэлементами.

Одновременно с измерением параметров высоты проводили замеры диаметра стволика берёзы пушистой у контрольных и опытных растений (Рис. 3б). Результаты показали отсутствие достоверного влияния кислотности грунта на анализируемый показатель. Исключением стали растения, культивируемые в субстрате с максимальной кислотностью (рН 4.2), где показатель составил  $1.4 \pm 0.3$  против  $2.6 \pm 0.4$  в контроле (рН 6.0). Добавление шлака увеличило диаметр стволика на 38% у растений, культивируемых в сильнокислом субстрате и на 20% в слабокислом.

В течение экспериментального периода наблюдалось увеличение количества листьев в среднем с  $5.6 \pm 0.37$  шт. в начале опыта до  $14.5 \pm 0.82$

шт. в конце. Диапазон изменчивости количества листьев у опытных и контрольных растений всех вариантов эксперимента существенно не изменялся (Рис. 3в). Также не выявлено существенных различий при сравнении контрольных и опытных растений у каждого из изученных рН почвосмесей (в рамках одной кислотности). Закисление субстрата достоверно не влияло на площадь листовой пластины (Рис. 3г). Внесение шлака во всех случаях увеличивало показатель, максимальные значения средней площади листа отмечены при добавлении шлака в слабокислый субстрат – показатель был больше в 1.4 раза.

Показатели активности фотосинтетической системы

Сравнительный анализ параметров фотосинтетической активности листа берёзы пушистой на заключительной стадии культивирования показал, что фотосинтетическая активность растений у всех вариантов опыта без шлака плавно возрастала в ряду кислотности субстрата от рН 4.2 до рН 6.0 (Рис. 4а).

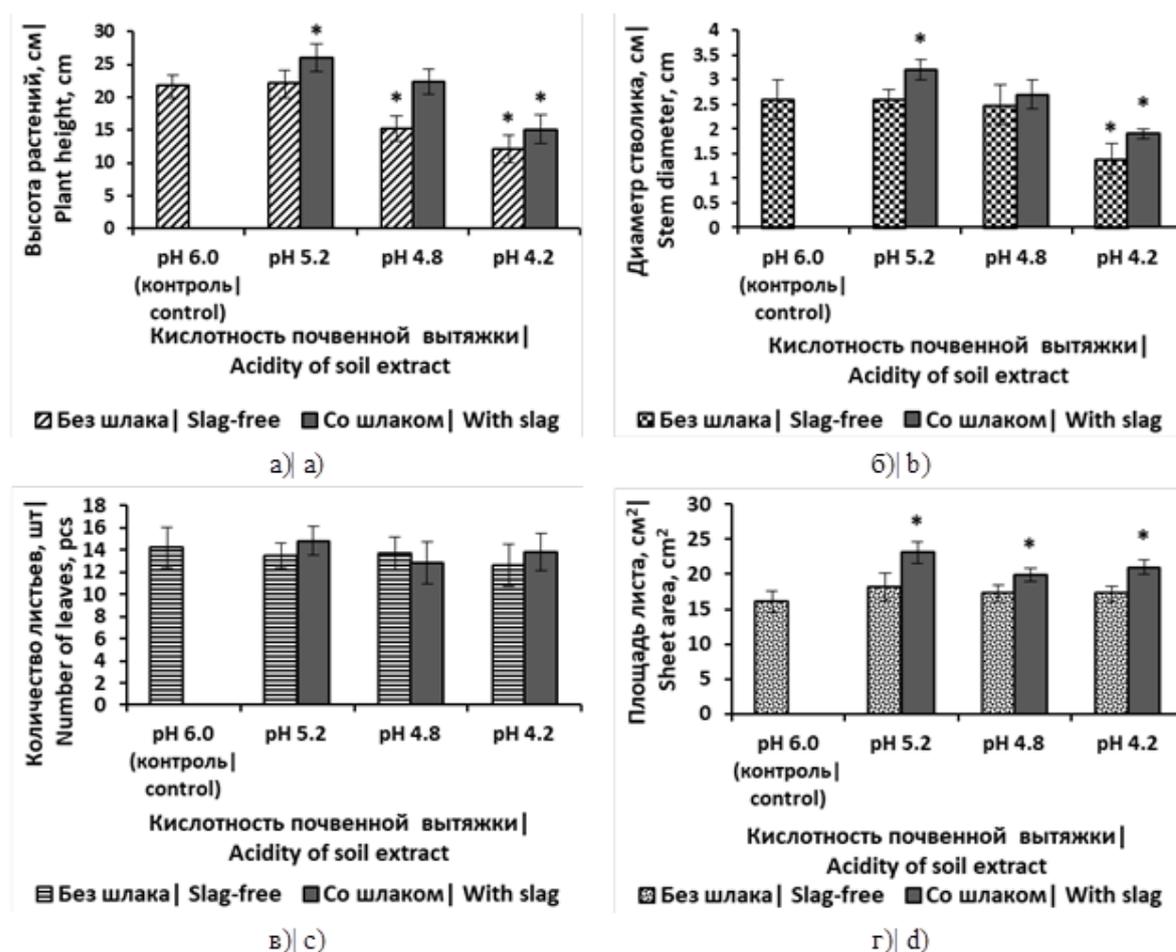


Рисунок 3. Морфометрические параметры побегов березы: а) высота растений; б) диаметра стволика; в) количество листьев на одном растении; г) средняя площадь листа.

Figure 3. Morphometric parameters of birch shoots: a) plant height; b) stem diameter; c) number of leaves per plant; d) average leaf area

Источник: собственная композиция авторов  
Source: author's composition

Абсолютные значения интенсивности поглощения углекислоты растениями в варианте с сильнокислым почвогрунтом достигали  $7.8 \pm 1.35$  мкмоль/м<sup>2</sup>/с. Постепенное увеличение изучаемого параметра наблюдалось последовательно в вариантах со среднекислым и слабокислым субстратом –  $8.0 \pm 1.01$  и  $9.5 \pm 1.03$  мкмоль/м<sup>2</sup>/с соответственно. Для растений контрольной группы (рН 6.0) показатель был на уровне  $11.7 \pm 0.93$  мкмоль/м<sup>2</sup>/с. Внесение шлака активировало фотосинтетическую систему во всех вариантах кислотности и доводило показатели до уровня контроля. Анализ содержания пигментов показал дозозависимое снижение концентрации хлорофиллов а, б и каротиноидов при повышении кислотности субстрата (Рис. 46). При этом, как и в случае с ассимиляцией CO<sub>2</sub>, раскисление субстрата

шлаком повышало содержание фотосинтетических пигментов до уровня концентраций в контрольной группе.

Активность антиоксидантной системы Эффективное функционирование антиоксидантной защитной системы находится в основе адаптации растений к неблагоприятным условиям. В связи с чем, нами была оценена активность антиоксидантной системы березы пушистой при повышении кислотности субстрата, а также при повышении рН почвенной вытяжки путем внесения гранулированного доменного шлака. Результаты показали повышение активности супероксиддисмутазы при повышении кислотности субстрата (Рис. 5а), минимальные значения (58 ед./мг) отмечены при рН 6.0, максимальные (298.4 ед./мг) при рН 4.2. Внесение

в грунт доменного шлака снижало активность фермента, однако показатели в группах,

культивируемых в среднекислом и сильнокислом субстратах, все же превышали контрольные.

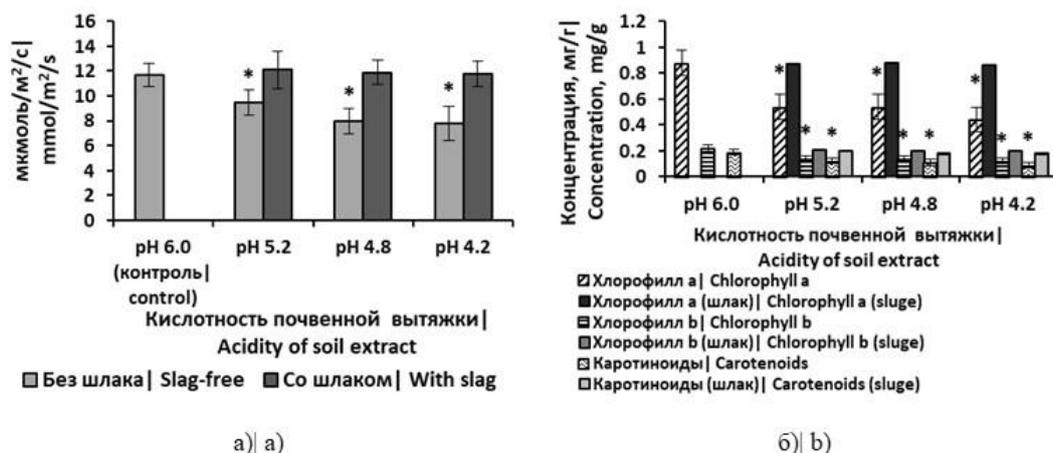


Рисунок 4. Показатели активности фотосинтетической системы: а) интенсивность ассимиляции CO<sub>2</sub>; б) содержание фотосинтетических пигментов

Figure 4. Photosynthetic system activity indicators: а) CO<sub>2</sub> assimilation rate; б) photosynthetic pigment content.

Источник: собственная композиция авторов  
Source: author's composition

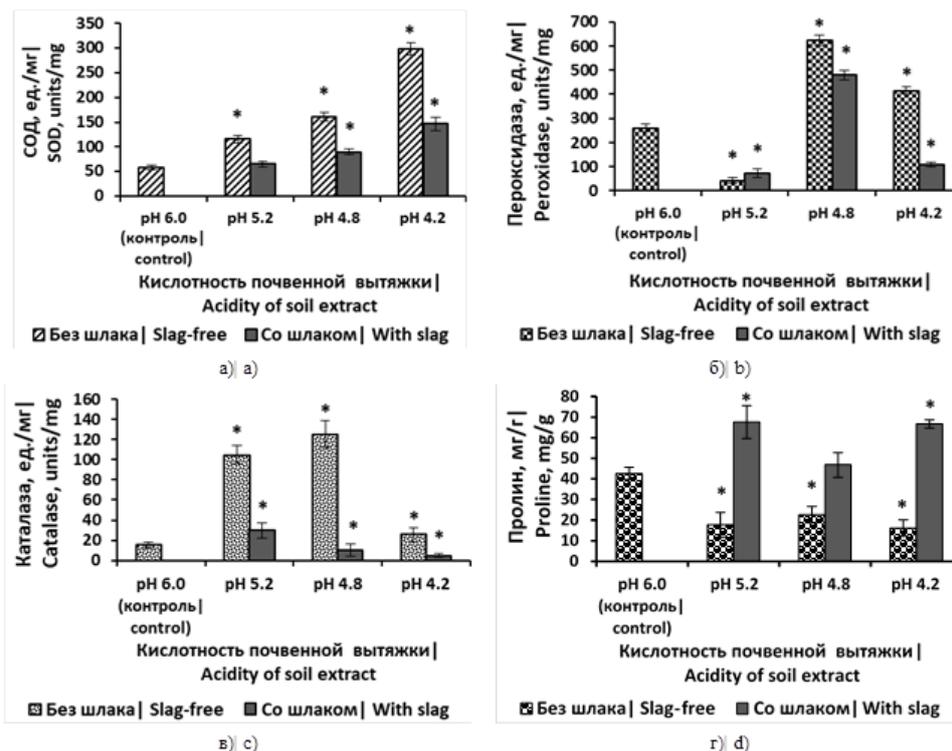


Рисунок 5. Показатели активности антиоксидантной системы: а) супероксиддисмутазы; б) пероксидаза; в) каталаза; г) содержание пролина.

Figure 5. Antioxidant system activity indicators: а) superoxide dismutase; б) peroxidase; в) catalase; г) proline content.

Источник: собственная композиция авторов/Source: author's composition

Активность пероксидазы, отвечающей за нейтрализацию активных форм кислорода, имела минимальные значения у растений, культивируемых в субстрате с рН 5.2 (в варианте без шлака показатель был в 6 раз ниже, чем в контроле, при добавлении шлака – в 4 раза), а максимальные у растений из группы с рН 4.8 (Рис. 5б). Внесение шлака в субстрат несколько снижало активность фермента в группах с рН 4.8 и рН 4.2, тогда как при рН 5.2 наоборот – значения активности несколько повышались. В случае с каталазой также отмечена не линейная зависимость активности фермента от кислотности субстрата (Рис. 5в). Однако для каталазы, минимальная активность зафиксирована в контроле и в сильноокислом грунте, при этом максимум также отмечен при рН 4.8. При раскислении субстрата, активность фермента имела линейную зависимость от кислотности вытяжки, наибольшие показатели были при рН 5.2 (в 2 раза выше контрольных), наименьшие при рН 4.2 (в 3 раза ниже контрольных).

Содержание пролина в листьях березы уменьшалось при уменьшении рН вытяжки ниже 6.0 (Рис. 5г). Добавление шлака повышало показатели, однако, если в вариантах с рН 5.2 и рН 4.2 уровень содержания пролина был выше контрольных значений (в 1.6 раза), то при рН 4.8 содержание пролина вросло только до контрольного уровня.

Таким образом, проведенное исследование показало, что гранулированный доменный шлак может эффективно раскислять закисленные почвы и, благодаря этому, способствовать нормальному росту древесных растений.

### **Обсуждение**

Полученные нами результаты показывают перспективность использования доменного шлака в качестве раскислителя почв лесных насаждений. Как видно из приведенных данных, закисление субстрата негативно влияло на развитие саженцев березы. Известно, что уменьшение рН почвы снижает доступность питательных веществ (фосфора, калия, кальция и магния), влияет на структуру и функционирование микробных

сообществ и повышает доступность токсичных тяжелых металлов и других вредных элементов, особенно при уровнях рН ниже 4,5 [30, 31]. При этом внесение доменного шлака способствовало увеличению морфометрических параметров растений, а также интенсивности фотосинтеза. Полученные эффекты могут быть связаны, прежде всего, с повышением рН субстрата, а также содержащимися в составе шлака элементами. Например магний, участвует в синтезе хлорофилла, производстве, транспортировке и использовании фотоассимилятов, активации ферментов и синтезе белка [32]. Кремний, способствует повышению устойчивости к экологическим стрессам, таким как засуха, дефицит питательных веществ и болезни [33, 34]. Имеются данные, что кремний повышает жесткость клеточных стенок за счет биокремнификации, что очень полезно для роста растений и смягчает негативное воздействие биотических и абиотических стрессовых факторов [35, 36]. Кроме того, в составе шлака содержатся такие важные микроэлементы как железо и марганец, в первую очередь участвующие в фотосинтезе и производстве хлорофилла [37, 38].

Разными авторами было показано, что внесение шлака помогает повысить рН и доступность питательных веществ в почве, что способствует росту сельскохозяйственных культур и повышению урожайности [39]. Например, при добавлении сталеплавильного шлака в бедный питательными веществами субстрат позволило улучшить минеральный состава почвы, а также увеличить фотосинтетическую активность и рост биомассы кукурузы [40]. Другими авторами также показан прирост сухой массы кукурузы при добавлении шлака в почвы с различной кислотностью. При этом установлено, что внесение 1 и 2% шлака в почвы с рН 4,1 и 6,7 увеличивало поглощение Р и Мп, однако, поглощение Fe и К усиливалось только при рН 6,7, в то время как поглощение К снижалось только в почве с рН 4,1 [41]. Шлаковые удобрения на основе кремнезема, внесенные в почву с дефицитом кремния, улучшили рост и урожайность риса, а также устойчивость растений

к бурым пятнам [42]. Добавление 3% и 5% измельченного гранулированного доменного шлака к илисто-гравийному песку, загрязненному 1,5 мг/кг Cd, увеличивало индекс площади листьев *Pinellia ternata* на 29% и 30%, а индекс площади корней на 65% и 66%, соответственно, по сравнению с контролем [43].

Таким образом, полученные нами данные хорошо соотносятся с мировым опытом применения шлаков в сельском хозяйстве, в частности с исследованиями на кукурузе и рисе, где также отмечалось повышение рН почвы и продуктивности биомассы. Однако наша работа вносит принципиально новый вклад, демонстрируя положительный эффект на древесной культуре в контексте лесовосстановления и предоставляя результаты комплексной физиолого-биохимической оценки стрессоустойчивости растений.

### **Заключение**

Настоящее исследование убедительно подтвердило выдвинутое предположение о том, что гранулированный доменный шлак может служить не просто эффективным раскислителем, а активным стимулятором ростовых и физиологических процессов у саженцев березы пушистой в условиях кислотного стресса. Экспериментально установлено, что положительный эффект обусловлен комплексным воздействием, связанным с устранением избыточной кислотности, а также улучшением минерального питания растений за счет микроэлементов, высвобождаемых из шлака.

Ключевым количественным результатом стало значительное улучшение исследованных основных параметров роста. В слабокислом субстрате с добавкой шлака высота саженцев увеличилась на 74%, достигнув  $26.1 \pm 2.1$  см против  $15.0 \pm 2.1$  см в контрольной группе с кислым

субстратом. Особенно показательным стало увеличение диаметра стволика на 38% в сильнокислой среде, что демонстрирует устранение главного сдерживающего фактора роста. Физиологическая оценка подтвердила полное восстановление функциональности фотосинтетического аппарата – интенсивность ассимиляции CO<sub>2</sub> и содержание хлорофиллов у обработанных шлаком растений достигали показателей интактного контроля. Важным свидетельством снятия окислительного стресса стало достоверное снижение активности антиоксидантных ферментов, что указывает на компенсацию токсического воздействия ионов алюминия и марганца в кислых почвах.

Перспективы дальнейших исследований определяются выявленными «белыми пятнами». Критически необходимы долгосрочные полевые эксперименты в условиях лесных питомников для оценки устойчивости эффекта в естественных условиях. Требуется изучение влияния различных доз и гранулометрического состава шлака на эффективность его действия. Особого внимания заслуживает мониторинг потенциального накопления тяжелых металлов в почве и тканях растений для полной оценки экологической безопасности. Кроме того, остается открытым вопрос о влиянии внесения шлака на структуру и функцию микробных сообществ кислых лесных почв как ключевого фактора благополучия экосистемы.

Таким образом, данная работа не только подтверждает высокую эффективность гранулированного доменного шлака как мелиоранта для лесного хозяйства, но и четко определяет границы применимости полученных знаний, формируя направления для будущих научных и прикладных изысканий в области устойчивого развития и циркулярной экономики.

## Список литературы

1. Abdelbasir S.M., Abdel Khalek M.A. From Waste to Waste: Iron Blast Furnace Slag for Heavy Metal Ions Removal from Aqueous System. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022; 29(38): 57964–57979. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19834-3>
2. Alejandro S., Höller S., Meier B., Peiter E. Manganese in Plants: From Acquisition to Subcellular Allocation. *Frontiers in Plant Science*. 2020; 11: 300. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00300>
3. Ali M.T., Shahram S. Converter Slag as a Liming Agent in the Amelioration of Acidic Soils. *International Journal of Agriculture & Biology*. 2007; 9(5). URL: <https://www.researchgate.net/publication/228663048>
4. Baalamurugan J., Ganesh Kumar V., Padmapriya R., Bupesh Raja V.K. Recent Applications of Steel Slag in Construction Industry. *Environment, Development and Sustainability*. 2024; 26(2): 2865–2896. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02894-3>
5. Bates L.S., Waldren R.P., Teare I.D. Rapid Determination of Free Proline for Water-Stress Studies. *Plant and Soil*. 1973; 39(1): 205–207. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00018060>
6. Beauchamp C., Fridovich I. Superoxide Dismutase: Improved Assays and an Assay Applicable to Acrylamide Gels. *Analytical Biochemistry*. 1971; 44(1): 276–287. DOI: [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(71\)90370-8](https://doi.org/10.1016/0003-2697(71)90370-8)
7. Deus A., Bertani R., Meirelles G., etc. The Comprehensive Utilization of Steel Slag in Agricultural Soils. 2018. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.81440>
8. Díaz-Piloneta M., Ortega-Fernández F., Terrados-Cristos M., Álvarez-Cabal J.V. Application of Steel Slag for Degraded Land Remediation. *Land*. 2022; 11(2): 224. DOI: <https://doi.org/10.3390/land11020224>
9. Fu S., Kwon E.E., Lee J. Upcycling Steel Slag into Construction Materials. *Construction and Building Materials*. 2024; 444: 137882. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137882>
10. Fujii K., Funakawa S., Kosaki T. Effects of Forest Management on Soil Acidification in Cedar Plantation. *Geoderma*. 2022; 424: 115967. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115967>
11. Gao W., Zhou W., Lyu X., etc. Comprehensive Utilization of Steel Slag: A Review. *Powder Technology*. 2023; 422: 118449. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118449>
12. Ghanta I., Biswas C., Basu P. Application of Bof Steelmaking Slag as a Partial Replacement of Agricultural Fertilizer. *Journal of The Institution of Engineers (India)*. 2024; 105(3): 1527–1536. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40033-023-00560-0>
13. Ghisman V., Muresan A.C., Buruiana D.L., Axente E.R. Waste Slag Benefits for Correction of Soil Acidity. *Scientific Reports*. 2022; 12(1): 16042. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20528-6>
14. Goswami V., Sharma D., Sharma P., Kothamasi D. Recycling Steel Slag as Fertiliser Proxy in Agriculture Is Good Circular Economy but Disrupts Plant Microbial Symbioses in the Soil. *Science of The Total Environment*. 2024; 954: 176750. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176750>
15. Hao T., Zhu Q., Zeng M., etc. Impacts of Nitrogen Fertilizer Type and Application Rate on Soil Acidification Rate under a Wheat-Maize Double Cropping System. *Journal of Environmental Management*. 2020; 270: 110888. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110888>
16. Hoffmann C., Hoey M.V., Zeumer B. Steel Players across the Globe, and Especially in Europe, Are Increasingly Facing a Decarbonization Challenge. McKinsey & Company. URL: <https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/decarbonization-challenge-for-steel>
17. IEA. Iron and Steel Technology Roadmap. URL: <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>
18. Ishfaq M., Wang Y., Yan M., etc. Physiological Essence of Magnesium in Plants and Its Widespread Deficiency in the Farming System of China. *Frontiers in Plant Science*. 2022; 13. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.802274>
19. Ji R., Liu T.-J., Kang L.-L., etc. A Review of Metallurgical Slag for Efficient Wastewater Treatment: Pretreatment, Performance and Mechanism. *Journal of Cleaner Production*. 2022; 380: 135076. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135076>
20. Khan A.L. Silicon: A Valuable Soil Element for Improving Plant Growth and Co2 Sequestration. *Journal of Advanced Research*. 2025; 71: 43–54. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jare.2024.05.027>
21. Kumari S., Usha K., Gupta C.K., Singh B. Steel Slag Utilization in Agriculture as an Amendment and Fertilizer: Addressing the Chromium Challenge for Sustainable Resource Recycling and Management of the Industry Waste. *Toxicological & Environmental Chemistry*. 2025; 107(6): 971–1009. DOI: <https://doi.org/10.15832/ankutbd.1197239>
22. Maehly A.C., Chance B. The Assay of Catalases and Peroxidases. In: *Methods of Biochemical Analysis*. 1954; P. 357–424. DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470110171.ch14>
23. Mombelli D., Dall'Osto G., Scolari S., etc. The Use of Secondary Metallurgy Slag as Soil Corrective in Agriculture: Approval of Their Application in Italy. *Steel research international*. 2025; 96(1): 2400310. DOI: <https://doi.org/10.1002/srin.202400310>

24. Ng C.W.W., Chowdhury N., Wong J.T.F. Effects of Ground Granulated Blast-Furnace Slag (Ggbs) on Hydrological Responses of Cd-Contaminated Soil Planted with a Herbal Medicinal Plant (*Pinellia Ternata*). *Canadian Geotechnical Journal*. 2020; 57(5): 673–682. DOI: <https://doi.org/10.1139/cgj-2018-0868>
25. Ning D., Song A., Fan F., Li Z., Liang Y. Effects of Slag-Based Silicon Fertilizer on Rice Growth and Brown-Spot Resistance. *PLoS One*. 2014; 9(7): e102681. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0102681>
26. O'Connor J., Nguyen T.B.T., Honeyands T., etc. Production, Characterisation, Utilisation, and Beneficial Soil Application of Steel Slag: A Review. *Journal of Hazardous Materials*. 2021; 419: 126478. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126478>
27. Okeke E.S., Nweze E.J., Ezike T.C., etc. Silicon-Based Nanoparticles for Mitigating the Effect of Potentially Toxic Elements and Plant Stress in Agroecosystems: A Sustainable Pathway Towards Food Security. *Science of The Total Environment*. 2023; 898: 165446. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165446>
28. Piemonti A., Conforti A., Cominoli L., etc. Exploring the Potential for Steel Slags Valorisation in an Industrial Symbiosis Perspective at Meso-Scale Level. *Waste and Biomass Valorization*. 2023; 14(10): 3355–3375. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12649-022-01940-5>
29. Qifeng S., Guo M.-Z., Wang L., Ling T.-C. Use of Steel Slag as Sustainable Construction Materials: A Review of Accelerated Carbonation Treatment. *Resources, Conservation and Recycling*. 2021; 173: 105740. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105740>
30. Radić S., Crnojević H., Sandev D., etc. Effect of Electric Arc Furnace Slag on Growth and Physiology of Maize (*Zea Mays L.*). *Acta Biologica Hungarica*. 2013; 64(4): 490–499. DOI: <https://doi.org/10.1556/ABiol.64.2013.4.8>
31. Repo E., Warchoń J.K., Westholm L.J., Sillanpää M. Steel Slag as a Low-Cost Sorbent for Metal Removal in the Presence of Chelating Agents. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2015; 27: 115–125. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2014.12.025>
32. Rout G.R., Sahoo S. Role of Iron in Plant Growth and Metabolism. *Reviews in Agricultural Science*. 2015; 3: 1–24. DOI: <https://doi.org/10.7831/ras.3.1>
33. Sun X., Li Z., Wu L., etc. Root-Induced Soil Acidification and Cadmium Mobilization in the Rhizosphere of Sedum *Plumbizincicola*: Evidence from a High-Resolution Imaging Study. *Plant and Soil*. 2019; 436(1): 267–282. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-018-03930-w>
34. Wang G.C. In: *The Utilization of Slag in Civil Infrastructure Construction. 2 - Ferrous Metal Production and Ferrous Slags*. Woodhead Publishing. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2014-0-03995-0>
35. Wellburn A.R. The Spectral Determination of Chlorophylls a and B, as Well as Total Carotenoids, Using Various Solvents with Spectrophotometers of Different Resolution. *Journal of Plant Physiology*. 1994; 144(3): 307–313. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(11\)81192-2](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(11)81192-2)
36. World Steel Association. *World Steel in Figures*. 2024. URL: <https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures/world-steel-in-figures-2024/#major-steel-producing-countries%3Cbr%3E2022-and-2023>
37. Yi H., Xu G., Cheng H., etc. An Overview of Utilization of Steel Slag. *Procedia Environmental Sciences*. 2012; 16: 791–801. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.10.108>
38. Zakharova O.V., Baranchikov P.A., Chebotaryova S.P., etc. Metallurgical Waste for Sustainable Agriculture: Converter Slag and Blast-Furnace Sludge Increase Oat Yield in Acidic Soils. *Agronomy*. 2024; 14(11): 2642. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy14112642>
39. Zargar S.M., Mahajan R., Bhat J.A., Nazir M., Deshmukh R. Role of Silicon in Plant Stress Tolerance: Opportunities to Achieve a Sustainable Cropping System. *Biotech*. 2019; 9(3): 73. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13205-019-1613-z>
40. Zhang Y., Ying Y., Xing L., etc. Carbon Dioxide Reduction through Mineral Carbonation by Steel Slag. *Journal of Environmental Sciences*. 2025; 152: 664–684. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2024.06.016>
41. Zhang Y., Zhou J., Chen H. Global Trajectories of Forest Soil Acidification: A Scientometric Synthesis of Drivers, Impacts and Sustainable Solutions. *Forests*. 2025; 16(5): 733. DOI: <https://doi.org/10.3390/f16050733>
42. Zhang Y., Zhou J., Ren H., Chen H. Characterization of Forest Soil Acidification in Wenzhou Daluoshan and Zhejiang Wuyanling National Nature Reserve. *Sustainability*. 2024; 16(16): 7051. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16167051>

**References**

1. Abdelbasir S.M., Abdel Khalek M.A. From Waste to Waste: Iron Blast Furnace Slag for Heavy Metal Ions Removal from Aqueous System. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022; 29(38): 57964–57979. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19834-3>
2. Alejandro S., Höller S., Meier B., Peiter E. Manganese in Plants: From Acquisition to Subcellular Allocation. *Frontiers in Plant Science*. 2020; 11: 300. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00300>
3. Ali M.T., Shahram S. Converter Slag as a Liming Agent in the Amelioration of Acidic Soils. *International Journal of Agriculture & Biology*. 2007; 9(5). URL: <https://www.researchgate.net/publication/228663048>
4. Baalamurugan J., Ganesh Kumar V., Padmapriya R., Bupesh Raja V.K. Recent Applications of Steel Slag in Construction Industry. *Environment, Development and Sustainability*. 2024; 26(2): 2865–2896. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02894-3>
5. Bates L.S., Waldren R.P., Teare I.D. Rapid Determination of Free Proline for Water-Stress Studies. *Plant and Soil*. 1973; 39(1): 205–207. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00018060>
6. Beauchamp C., Fridovich I. Superoxide Dismutase: Improved Assays and an Assay Applicable to Acrylamide Gels. *Analytical Biochemistry*. 1971; 44(1): 276–287. DOI: [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(71\)90370-8](https://doi.org/10.1016/0003-2697(71)90370-8)
7. Deus A., Bertani R., Meirelles G., etc. The Comprehensive Utilization of Steel Slag in Agricultural Soils. 2018. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.81440>
8. Díaz-Piloneta M., Ortega-Fernández F., Terrados-Cristos M., Álvarez-Cabal J.V. Application of Steel Slag for Degraded Land Remediation. *Land*. 2022; 11(2): 224. DOI: <https://doi.org/10.3390/land11020224>
9. Fu S., Kwon E.E., Lee J. Upcycling Steel Slag into Construction Materials. *Construction and Building Materials*. 2024; 444: 137882. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137882>
10. Fujii K., Funakawa S., Kosaki T. Effects of Forest Management on Soil Acidification in Cedar Plantation. *Geoderma*. 2022; 424: 115967. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115967>
11. Gao W., Zhou W., Lyu X., etc. Comprehensive Utilization of Steel Slag: A Review. *Powder Technology*. 2023; 422: 118449. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118449>
12. Ghanta I., Biswas C., Basu P. Application of Bof Steelmaking Slag as a Partial Replacement of Agricultural Fertilizer. *Journal of The Institution of Engineers (India)*. 2024; 105(3): 1527–1536. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40033-023-00560-0>
13. Ghisman V., Muresan A.C., Buruiana D.L., Axente E.R. Waste Slag Benefits for Correction of Soil Acidity. *Scientific Reports*. 2022; 12(1): 16042. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20528-6>
14. Goswami V., Sharma D., Sharma P., Kothamasi D. Recycling Steel Slag as Fertiliser Proxy in Agriculture Is Good Circular Economy but Disrupts Plant Microbial Symbioses in the Soil. *Science of The Total Environment*. 2024; 954: 176750. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176750>
15. Hao T., Zhu Q., Zeng M., etc. Impacts of Nitrogen Fertilizer Type and Application Rate on Soil Acidification Rate under a Wheat-Maize Double Cropping System. *Journal of Environmental Management*. 2020; 270: 110888. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110888>
16. Hoffmann C., Hoey M.V., Zeumer B. Steel Players across the Globe, and Especially in Europe, Are Increasingly Facing a Decarbonization Challenge. McKinsey & Company. URL: <https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/decarbonization-challenge-for-steel>
17. IEA. Iron and Steel Technology Roadmap. URL: <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>
18. Ishfaq M., Wang Y., Yan M., etc. Physiological Essence of Magnesium in Plants and Its Widespread Deficiency in the Farming System of China. *Frontiers in Plant Science*. 2022; 13. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.802274>
19. Ji R., Liu T.-J., Kang L.-L., etc. A Review of Metallurgical Slag for Efficient Wastewater Treatment: Pretreatment, Performance and Mechanism. *Journal of Cleaner Production*. 2022; 380: 135076. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135076>
20. Khan A.L. Silicon: A Valuable Soil Element for Improving Plant Growth and Co2 Sequestration. *Journal of Advanced Research*. 2025; 71: 43–54. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jare.2024.05.027>
21. Kumari S., Usha K., Gupta C.K., Singh B. Steel Slag Utilization in Agriculture as an Amendment and Fertilizer: Addressing the Chromium Challenge for Sustainable Resource Recycling and Management of the Industry Waste. *Toxicological & Environmental Chemistry*. 2025; 107(6): 971–1009. DOI: <https://doi.org/10.15832/ankutbd.1197239>
22. Maehly A.C., Chance B. The Assay of Catalases and Peroxidases. In: *Methods of Biochemical Analysis*. 1954; P. 357–424. DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470110171.ch14>
23. Mombelli D., Dall’Osto G., Scolari S., etc. The Use of Secondary Metallurgy Slag as Soil Corrective in Agriculture: Approval of Their Application in Italy. *Steel research international*. 2025; 96(1): 2400310. DOI: <https://doi.org/10.1002/srin.202400310>

24. Ng C.W.W., Chowdhury N., Wong J.T.F. Effects of Ground Granulated Blast-Furnace Slag (Ggbs) on Hydrological Responses of Cd-Contaminated Soil Planted with a Herbal Medicinal Plant (*Pinellia Ternata*). *Canadian Geotechnical Journal*. 2020; 57(5): 673–682. DOI: <https://doi.org/10.1139/cgj-2018-0868>
25. Ning D., Song A., Fan F., Li Z., Liang Y. Effects of Slag-Based Silicon Fertilizer on Rice Growth and Brown-Spot Resistance. *PLoS One*. 2014; 9(7): e102681. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0102681>
26. O'Connor J., Nguyen T.B.T., Honeyands T., etc. Production, Characterisation, Utilisation, and Beneficial Soil Application of Steel Slag: A Review. *Journal of Hazardous Materials*. 2021; 419: 126478. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126478>
27. Okeke E.S., Nweze E.J., Ezike T.C., etc. Silicon-Based Nanoparticles for Mitigating the Effect of Potentially Toxic Elements and Plant Stress in Agroecosystems: A Sustainable Pathway Towards Food Security. *Science of The Total Environment*. 2023; 898: 165446. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165446>
28. Piemonti A., Conforti A., Cominoli L., etc. Exploring the Potential for Steel Slags Valorisation in an Industrial Symbiosis Perspective at Meso-Scale Level. *Waste and Biomass Valorization*. 2023; 14(10): 3355–3375. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12649-022-01940-5>
29. Qifeng S., Guo M.-Z., Wang L., Ling T.-C. Use of Steel Slag as Sustainable Construction Materials: A Review of Accelerated Carbonation Treatment. *Resources, Conservation and Recycling*. 2021; 173: 105740. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105740>
30. Radić S., Crnojević H., Sandev D., etc. Effect of Electric Arc Furnace Slag on Growth and Physiology of Maize (*Zea Mays L.*). *Acta Biologica Hungarica*. 2013; 64(4): 490–499. DOI: <https://doi.org/10.1556/ABiol.64.2013.4.8>
31. Repo E., Warchoń J.K., Westholm L.J., Sillanpää M. Steel Slag as a Low-Cost Sorbent for Metal Removal in the Presence of Chelating Agents. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2015; 27: 115–125. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2014.12.025>
32. Rout G.R., Sahoo S. Role of Iron in Plant Growth and Metabolism. *Reviews in Agricultural Science*. 2015; 3: 1–24. DOI: <https://doi.org/10.7831/ras.3.1>
33. Sun X., Li Z., Wu L., etc. Root-Induced Soil Acidification and Cadmium Mobilization in the Rhizosphere of *Sedum Plumbizincicola*: Evidence from a High-Resolution Imaging Study. *Plant and Soil*. 2019; 436(1): 267–282. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-018-03930-w>
34. Wang G.C. In: *The Utilization of Slag in Civil Infrastructure Construction. 2 - Ferrous Metal Production and Ferrous Slags*. Woodhead Publishing. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2014-0-03995-0>
35. Wellburn A.R. The Spectral Determination of Chlorophylls a and B, as Well as Total Carotenoids, Using Various Solvents with Spectrophotometers of Different Resolution. *Journal of Plant Physiology*. 1994; 144(3): 307–313. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(11\)81192-2](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(11)81192-2)
36. World Steel Association. *World Steel in Figures*. 2024. URL: <https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures/world-steel-in-figures-2024/#major-steel-producing-countries%3Cbr%3E2022-and-2023>
37. Yi H., Xu G., Cheng H., etc. An Overview of Utilization of Steel Slag. *Procedia Environmental Sciences*. 2012; 16: 791–801. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.10.108>
38. Zakharova O.V., Baranchikov P.A., Chebotaryova S.P., etc. Metallurgical Waste for Sustainable Agriculture: Converter Slag and Blast-Furnace Sludge Increase Oat Yield in Acidic Soils. *Agronomy*. 2024; 14(11): 2642. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy14112642>
39. Zargar S.M., Mahajan R., Bhat J.A., Nazir M., Deshmukh R. Role of Silicon in Plant Stress Tolerance: Opportunities to Achieve a Sustainable Cropping System. *Biotech*. 2019; 9(3): 73. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13205-019-1613-z>
40. Zhang Y., Ying Y., Xing L., etc. Carbon Dioxide Reduction through Mineral Carbonation by Steel Slag. *Journal of Environmental Sciences*. 2025; 152: 664–684. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2024.06.016>
41. Zhang Y., Zhou J., Chen H. Global Trajectories of Forest Soil Acidification: A Scientometric Synthesis of Drivers, Impacts and Sustainable Solutions. *Forests*. 2025; 16(5): 733. DOI: <https://doi.org/10.3390/f16050733>
42. Zhang Y., Zhou J., Ren H., Chen H. Characterization of Forest Soil Acidification in Wenzhou Daluoshan and Zhejiang Wuyanling National Nature Reserve. *Sustainability*. 2024; 16(16): 7051. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16167051>

## Сведения об авторах

✉ *Захарова Ольга Владимировна* – кандидат биологических наук, директор НОЦ Экологии и биотехнологий, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина», ул. Интернациональная, 33, г. Тамбов, Российская Федерация, 392000, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8590-2529>, e-mail: [olgazakharova1@mail.ru](mailto:olgazakharova1@mail.ru).

*Федорова Ольга Анатольевна* – кандидат биологических наук, научный сотрудник Лаборатории анализа полимеразной цепной реакции, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7581-6141>, e-mail: [fed-olga78@mail.ru](mailto:fed-olga78@mail.ru).

*Григорьев Григорий Викторович* – младший научный сотрудник НОЦ Экологии и биотехнологий, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина», ул. Интернациональная, 33, г. Тамбов, Российская Федерация, 392000, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1236-3960>, e-mail: [bboykick@outlook.com](mailto:bboykick@outlook.com).

*Гусев Александр Анатольевич* – доктор биологических наук, проректор по научной работе, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина», ул. Интернациональная, 33, г. Тамбов, Российская Федерация, 392000, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8699-9112>, e-mail: [nanosecurity@mail.ru](mailto:nanosecurity@mail.ru).

## Information about the authors

✉ *Olga V. Zakharova* – PhD, Director of the Research and Education Center for Ecology and Biotechnology, Derzhavin Tambov State University, 33 Internatsionalnaya Street, Tambov, Russian Federation, 392000, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8590-2529>, e-mail: [olgazakharova1@mail.ru](mailto:olgazakharova1@mail.ru).

*Olga A. Fedorova* – PhD, Researcher of the Polymerase Chain Reaction Analysis Laboratory, Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozov, 8 Timiryazeva Street, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7581-6141>, e-mail: [fed-olga78@mail.ru](mailto:fed-olga78@mail.ru).

*Grigory V. Grigoriev* – Junior Researcher of the Research and Education Center for Ecology and Biotechnology, Derzhavin Tambov State University, 33 Internatsionalnaya Street, Tambov, Russian Federation, 392000, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1236-3960>, e-mail: [bboykick@outlook.com](mailto:bboykick@outlook.com).

*Alexander A. Gusev* – Doctor of Sciences, Vice-Rector for Research, Derzhavin Tambov State University, 33 Internatsionalnaya Street, Tambov, Russian Federation, 392000, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8699-9112>, e-mail: [nanosecurity@mail.ru](mailto:nanosecurity@mail.ru).

✉ Для контактов | Corresponding author