

ОТВЕТНЫЕ РЕАКЦИИ РАСТЕНИЙ НА ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОДИСПЕРСНЫХ КОМПОНЕНТОВ ОТХОДОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА РАЗНОГО СОСТАВА

© 2024 г. В. В. Чурилова¹, Г. И. Чурилов², С. Д. Полищук^{1,*}, Д. Г. Чурилов¹, А. В. Шемякин¹

¹Рязанский государственный агротехнологический университет, Рязань, Россия

²Рязанский государственный медицинский университет, Рязань, Россия

*E-mail: svpolishuk@mail.ru

Поступила в редакцию 01.04.2024 г.

После доработки 21.05.2024 г.

Принята к публикации 21.05.2024 г.

Отходы металлургического производства (шлак, шлам) содержат достаточное количество элементов, необходимых для питания растений. Имея разный состав, высокодисперсные отходы, содержащие в своем составе макро- и микронаночастицы, могут влиять на кислотность их суспензий и, следовательно, почвы. Изучены изменения физиологических, биохимических и молекулярно-генетических показателей в клетках и тканях растений при воздействии высокодисперсных частиц различной интенсивности. Добавка 2 т на га шлама повышает урожайность пшеницы на 12.9%. Для шлака характерно положительное влияние при содержании его в почве до 1 т на га. Исследования воздействия шлака, шлама разной интенсивности, проведенные на одном и том же объекте в строго контролируемых условиях внешней среды, позволяют понять механизмы взаимодействия высокодисперсных соединений и живых систем.

DOI: 10.56304/S1992722324601617

ВВЕДЕНИЕ

К высокоэффективным ресурсосберегающим технологиям можно отнести переработку и использование техногенного сырья металлургического производства. В процессе обогащения и выплавки металлов образуются миллионы тонн технологических отходов (шлаков, шламов и др.).

Ежегодно в отвалах скапливается ~5–7 млн т шлаков [1–3]. Одним из способов утилизации шлака служит его применение в области строительства, где он совместно с цементом используется для изготовления бетона. Шлаки – это основной побочный продукт производства черных металлов, на их долю приходится ~70–85% всех отходов при выплавке чугуна и стали. Переработка конвертерных шлаков является обязательным элементом безотходной технологии, так как позволяет перерабатывать накопившиеся старые отвалы, исключить образование новых отвалов и, соответственно, предотвратить отчуждение сельскохозяйственных угодий. Основные пути утилизации конвертерных шлаков – извлечение из них металла и использование его в агломерационном и доменном производствах. Решающую роль в процессе переработки шлаков играет полнота извлечения железа. Шлаки содержат до 22–24% железа, в том числе до 11–15% в виде королек.

Первичные конвертерные шлаки с массовой долей общего железа 17–21% вообще не перерабатываются и вывозятся в выработанное пространство. Вторичные конвертерные шлаки, содержащие до 55–65% железа, представлены частицами размером менее 10–15 мм. Извлечение железа в магнитные продукты составляет лишь 33–34%. Качество получаемых магнитных фракций низкое, массовая доля железа в частицах магнитной фракции до 10 мм составляет 35–37%. Поэтому разработка высокоэффективных технологий переработки первичных и вторичных конвертерных шлаков является актуальной научной задачей [4].

Отходы в виде шлама могут использоваться в различных отраслях народного хозяйства, в настоящее время наблюдается спрос в растениеводческом комплексе сельскохозяйственного производства. Большинство технологических отходов (шлам, шлак) являются многокомпонентными, причем элементы в их составе обладают биологической активностью, что повышает сродство отходов к веществу почвы [5–9]. Напрямую они не могут использоваться как удобрения, но при определенных технологических способах подготовки возможно создание новых форм микроудобрений или элементов биоконверсии.

Таблица 1. Химический состав образцов шлака и шлака из ПАО “Северсталь” (г. Череповец, РФ)

Наименование определяемого компонента	*Содержание компонента в шламе, %	*Содержание компонента в шлаке, %
Железо общее	38.40	51.90
Марганец	0.09	
Медь	<0.03	3.00
Никель	<0.05	
Оксид алюминия	1.38	10.29
Оксид железа(II)	3.44	0.13
Оксид кальция	4.08	37.41
Оксид кремния(IV)	5.87	37.28
Оксид магния	1.67	12.3
Сера	0.42	0.31
Оксид фосфора	0.04	0.02
Хром(III)	0.12	
Цинк	8.30	2.00

*Остальное приходится на прочие элементы и соединения.

Описаны положительные эффекты действия высокодисперсных металлов и их соединений [10–13], которые не накапливаются при оптимальных концентрациях ни в растениях, ни в

почве [14]. Перевод отходов в высокодисперсное состояние позволяет получить их в виде соединений, способных усваиваться элементами живой природы, почвой и растениями.

Цель данной работы – изучить изменения физиологических, биохимических и молекулярно-генетических показателей пшеницы, а также урожайность и качество зерна при воздействиях высокодисперсных частиц шлака и шлака.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В зависимости от исходного сырья при производстве металлов доменный шлак и шлак могут иметь переменный химический и фазовый составы.

В данной работе приведены результаты исследования свойств доменного шлака ПАО “Северсталь” (г. Череповец, РФ) и шлака. Данные химического анализа образцов шлака и шлака представлены в табл. 1. Сухие шлак и шлак гомогенизировали в механической ступке (Fritsch Pulverisette 2). Влажность образцов не превышала 0.8%. Шлак и шлак не содержали крупных включений и представляли собой порошки черного и серого цвета соответственно (рис. 1).

Для приготовления суспензий высокодисперсных шлака и шлака использовали дистиллированную воду. Навески порошков взвешивали при помощи аналитических весов ViBRA HT (Shinko Denshi, Япония, точность ± 0.0001 г) и помещали в колбу с водой объемом 1 л при переме-

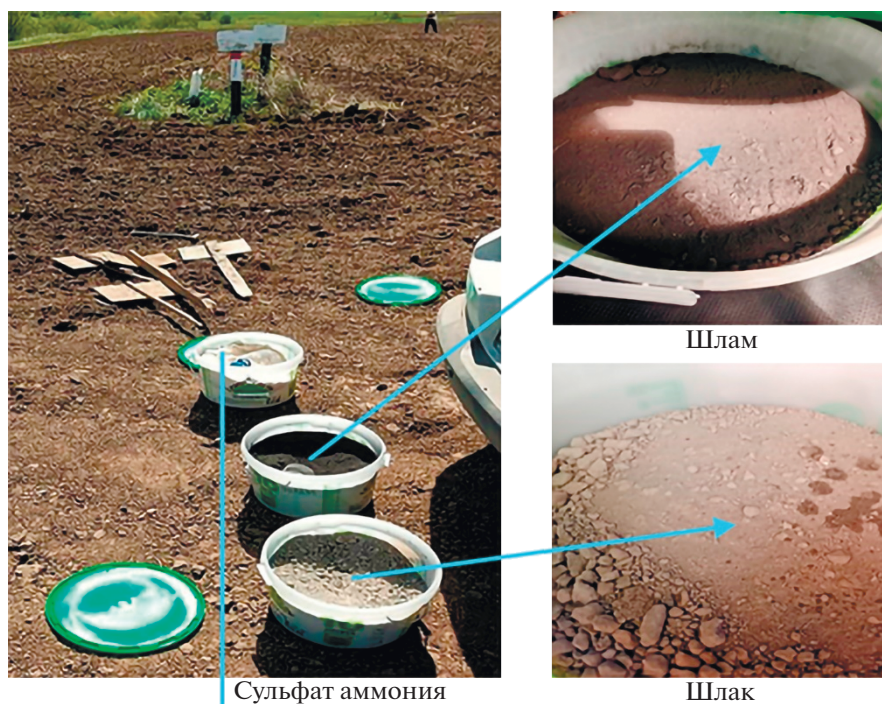


Рис. 1. Вид высокодисперсных шлака и шлака и хлорида аммония.

шивании в течение 10 с. Диспергирование проводили при помощи ультразвука в течение 7 мин (мощность 300 Вт, частота 23.74 кГц). Размер частиц не превышал 10 мкм. Водородный показатель среды (рН) суспензии шлака оказался более щелочным (рН 8.0) по сравнению со шламом (рН 7.5) [16].

Морфологию частиц шлама и шлака определяли с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) HITACHI TM-1000 (Япония). Разрешение прибора – не менее 50 нм, глубина резкости – не менее 0.5 мм. Ускоряющее напряжение составляет 15 кВ [15].

Полевые опыты проводили по методике [17–21] на агротехнологической станции РГАТУ (п. Стенькино, Рязанская область), почва – светло-серая лесная. Растения и почву контролировали по действующим ГОСТам. Содержание гумуса в почве определяли по ГОСТ 26213-91. рН и гидролитическую кислотность определяли по методикам [17, 23], подвижные формы микроэлементов – по ГОСТ Р 54650-2011 [24].

В пахотном слое содержание гумуса составило от 2.4 до 3.8%. Реакция почвенного раствора была средне- и слабокислой со значениями рН от 4.8 до 5.4. Обеспеченность подвижным фосфором составляла 13.5–15.1 мг/100 г почвы, калием – 12.1–12.9 мг/100 г почвы. Плотность почвы составляла 1.1–1.2 г/см³, водопрочные агрегаты – 50–60%. Погодные условия в целом были благоприятными для роста и развития опытных сельскохозяйственных культур. Исследуемые шлам и шлак в высокодисперсном состоянии, хлорид аммония, а также смеси шлам/хлорид аммония и шлак/хлорид аммония вносили в почву с последующим поливом.

Исследуемая культура – пшеница сорта Рима мягкая яровая (*Triticum aestivum* L.) из реестра Госсорткомиссии РФ, допущенного в 2017. Общая площадь опыта составила 280 м², площадь одной делянки – 10 м², учетная площадь – 5 м². Все эксперименты повторяли трижды. Опыт мелко деляночный, однофакторный. Норма высева семян соответствовала средней рекомендованной – 200 кг на 1 га. Схема опыта представлена в табл. 2.

В лабораторных и полевых исследованиях определяли полевую всхожесть, длительность межфазных периодов и продолжительность вегетации, морфометрические показатели растений пшеницы, урожайность и ее структуру, качество зерна пшеницы после обработки участков шламом, шлаком, сульфатом аммония, смесями сульфат аммония/шлак и сульфат аммония/шлам, т.е. при разных условиях посадки.

Для изучения активности влияния добавок была определена активность фитогормонов и ферментов методами высокоэффективной жидкостной хроматографии (Biotronic, Германия) и

Таблица 2. Схема полевого опыта

Участки		
1	2	3
Сульфат аммония, шлак, шлам	Контроль	Сульфат аммония, шлак, шлам
Сульфат аммония	Шлам	Сульфат аммония
Шлак	Шлак	Шлак
Шлам	Сульфат аммония	Шлам
Контроль	Сульфат аммония, шлак, шлам	Контроль

Примечание. Посев – 12 мая 2023 г., внесение компонентов в почву и полив – 13 мая 2023 г.; шлам и шлак – по 2 кг на одну делянку, сульфат аммония – 1 кг на одну делянку; смесь: сульфат аммония 400 гр + 1 кг шлака + 2 кг шлама.

фотометрически при помощи спектрофотометра СФ-2000 (ЗАО “ОКБ СПЕКТР”, Россия). Для установления содержания абсцизовой, индолилуксусной и гибберелловой кислот (АБК, ИУК и ГК соответственно) после экстракции гомогената сухой растительной массы смешивали этилацетатные вытяжки и упаривали их до сухого остатка. рН водного слоя доводили до 8, добавляя 20%-ный раствор гидроксида калия после экстракции. Затем несколько раз проводили экстракцию бутанолом, который предварительно был насыщен водой, в течение 40 мин при 200 об./мин. Полученную бутанольную фракцию упаривали до полного высыхания и определяли содержание цитонинов в остатке. Для анализа использовали жидкостную хроматографию со скоростью потока 0.5 мл/мин и временем удерживания 12 мин. В качестве подвижной фазы был выбран 40%-ный раствор метанола.

Выделение полисахаридов и определение их основных характеристик из зеленой массы опытных растений проводили по методу Е.В. Сапожникова [25, 26]. Для этого сухую зеленую массу растений подвергали двукратной водной экстракции при температуре от 40 до 100°C и времени от 30 мин до 2 ч. В рамках третьей экстракции использовали буферный раствор, состоящий из 0.25% оксалата аммония в 0.25%-ном растворе щавелевой кислоты (рН 7.5). После предварительного упаривания полученного экстракта до объема 130–150 мл полисахариды, перешедшие в раствор, осаждали с помощью 96%-ного раствора этилового спирта. Для определения полноты накопления и выделения полисахаридов использовали весовой метод. В результате исследований выявлена зависимость накопления полисахаридов от фазы вегетации и исследуемых добавок в

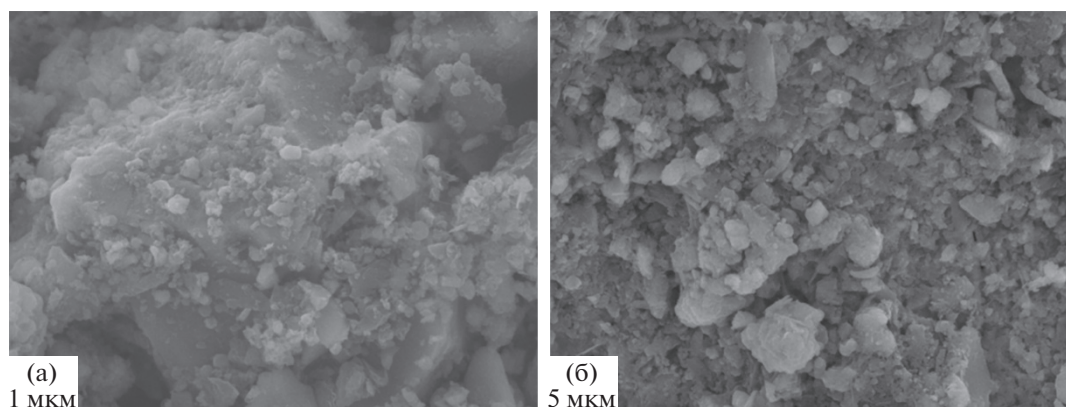


Рис. 2. СЭМ-изображение образцов шлама (а) и шлака (б) (увеличение $\times 100$).

почве. Статистическую обработку данных осуществляли с использованием программы Microsoft Excel 2010 (пакет “Описательная статистика”) и программы StatTech. с применением однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA), t -критерия Стьюдента, точного F -критерия Фишера. Различия считали статистически значимыми при $p < 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Утилизация шлама и шлака должна предвзаться исследованием их состава, позволяющим оценить не только свойства данных отходов, но и их устойчивость к распаду. Химический состав изучаемых шлама и шлака приведен в табл. 2. Остальное содержание компонентов приходится на прочие элементы и соединения.

Морфология агрегатов частиц исследуемых шлама и шлака представлена на рис. 2.

В лабораторных условиях провели предварительные испытания. В почву из опытных полевых участков (площадь одной делянки — 10 м^2) внесли исследуемые компоненты из расчета на гектар $400 \text{ кг NH}_4\text{Cl}$, $1\text{--}2 \text{ т}$ шлака или шлама и смеси $400 \text{ кг NH}_4\text{Cl} + 1\text{--}2 \text{ т}$ шлака или шлама. В емкость для испытаний добавили по 100 г подготовленных почв, куда поместили по 30 зерен пшеницы.

Всхожесть семян и энергия прорастания незначительно различались под действием различных добавок (рис. 3). При добавлении только хлорида аммония в почву показатели и энергии прорастания, и всхожести были ниже контроля на $2\text{--}3\%$. Сульфат аммония широко используется в растениеводстве, он является высокоэффективным азотным удобрением с высоким содержанием серы. Азот в сульфате аммония представлен в аммонийной форме и высокоэффективен в системах пролонгированного азотного питания. Лучше всего сульфат аммония работает на нейтральных и щелочных почвах, повышает эффек-

тивность применения других удобрений: азотных, фосфорных и калийных. Универсальная норма внесения сульфата аммония составляет $20\text{--}40 \text{ г}$ на 1 м^2 . Однако дозировки могут различаться в зависимости от культуры и ее потребностей в азоте в разные фазы роста.

Более высокие значения энергии прорастания до 100% получены при внесении в почву шлама. Внесение шлака дало более низкие значения показателей ($57\text{--}80\%$), причем чем выше содержание шлака, тем ниже показатели. Однако при добавлении к шлаку хлорида аммония показатели увеличились до 95% независимо от содержания шлака в смеси. Суспензия шлака имеет щелочную реакцию среды, и добавление к ней NH_4Cl с кислой реакцией среды улучшило условия как для питания при прорастании, так и для роста семян пшеницы.

Для полевых испытаний были определены оптимальные концентрации, указанные выше.

Результаты полевой всхожести яровой пшеницы показали, что при использовании каждой добавки различия достоверны и превышают контроль: в случае сульфата аммония — на 3.2% , смесей сульфата аммония/шлака и сульфата аммония — на 5.6 и 7.5% соответственно, шлака — на 4.6% , шлама — на 10.6% .

Проведенный анализ возможного влияния добавок на длину межфазных и вегетационных периодов для яровой пшеницы сорта “Рима” показал, что изменений не происходит. Однако изучаемые условия подготовки почвы участков продемонстрировали положительное достоверное влияние на всхожесть, энергию прорастания семян и показатели роста (табл. 3), причем лучший результат наблюдался после внесения в почву в первую очередь шлама и смеси сульфат аммония/шлак.

По литературным данным в некоторые годы потери урожая от полегания достигают $30\text{--}40\%$. Устойчивость пшеницы к полеганию зависит от

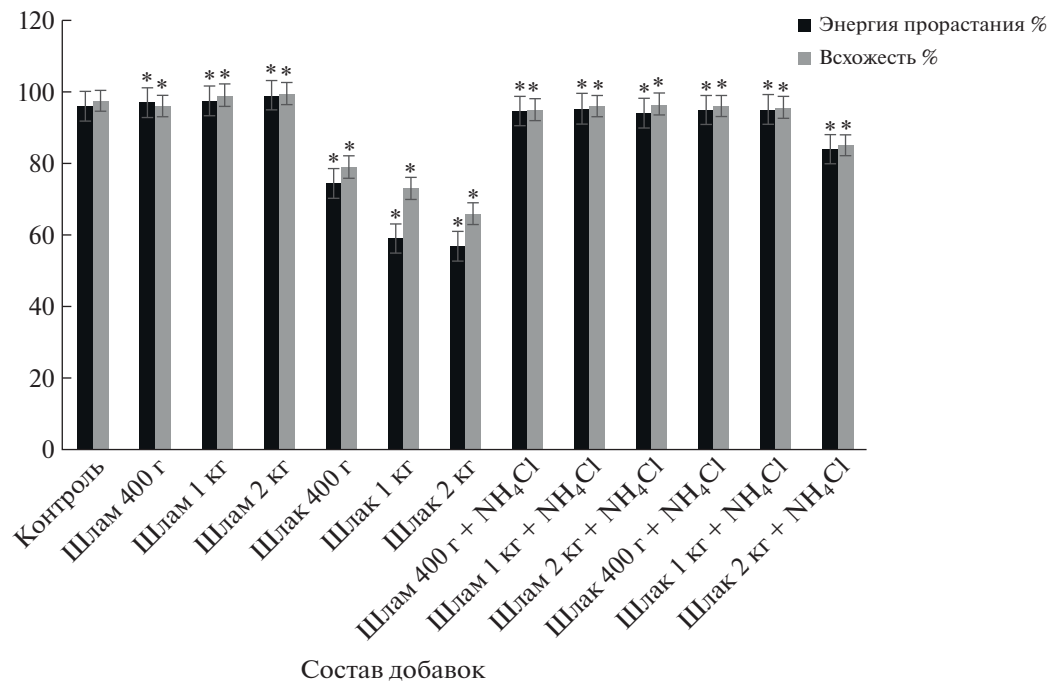


Рис. 3. Энергия прорастания и всхожесть семян пшеницы при проращивании на почве с исследуемыми добавками.
* Достоверные различия по сравнению с контролем ($p < 0.05$).

комплекса хозяйственно-морфологических показателей: продуктивности колоса, высоты растений, толщины стенок соломины, количества узловых корней и их связи с почвой. В основном ее устойчивость к полеганию связывают с высотой растений и прочностью соломины [20]. С увеличением высоты растений до определенных пределов урожайность пшеницы повышается. Высота вегетативной части растений при обработке изучаемыми добавками была сопоставима с контролем. Это положительный факт, так как избыток зеленой массы для пшеницы отрицательно влияет на устойчивость и морозостойкость культуры. Кроме того, разница между сырой массой контрольных и опытных растений (табл. 3) незна-

чительна, а объем сырой массы пшеницы влияет на выживаемость и способность растений к восстановлению. Растения оптимального размера обладают более высокой урожайностью, чем развитее или очень мелкие растения.

Длина корней опытных растений оказалась выше контроля при использовании всех исследуемых добавок, но максимально (на 22.8%) – при добавлении шлама, что свидетельствует о высокой потребности в элементах питания. Это подтверждается повышением массы сухого вещества растений опытной пшеницы по сравнению с контролем: при добавлении сульфата аммония или

Таблица 3. Морфофизиологические показатели растений яровой пшеницы в стадии кущения

Вариант добавок	Высота растений, см	Длина корней, см	Сырая масса растения, г	Сухая масса растения, г
Контроль	18.3 ± 0.40	10.1 ± 0.11	2.58 ± 0.22	0.90 ± 0.30
Сульфат аммония	18.8 ± 0.30*	10.0 ± 0.20*	2.62 ± 0.21*	0.95 ± 0.15*
Сульфат аммония/шлак	19.0 ± 0.50*	11.3 ± 0.70*	2.63 ± 0.30*	0.99 ± 0.10*
Сульфат аммония/шлам	19.0 ± 0.23*	11.6 ± 0.18*	2.65 ± 0.34*	0.98 ± 0.20*
Шлак	19.0 ± 0.35*	12.0 ± 0.36*	2.66 ± 0.42*	0.97 ± 0.22*
Шлам	19.5 ± 0.38*	12.4 ± 0.33*	2.65 ± 0.34*	0.98 ± 0.30*

Примечание. Приведены значения, усредненные по трем участкам.
* Значения, достоверно отличные от контроля при $p < 0.05$.

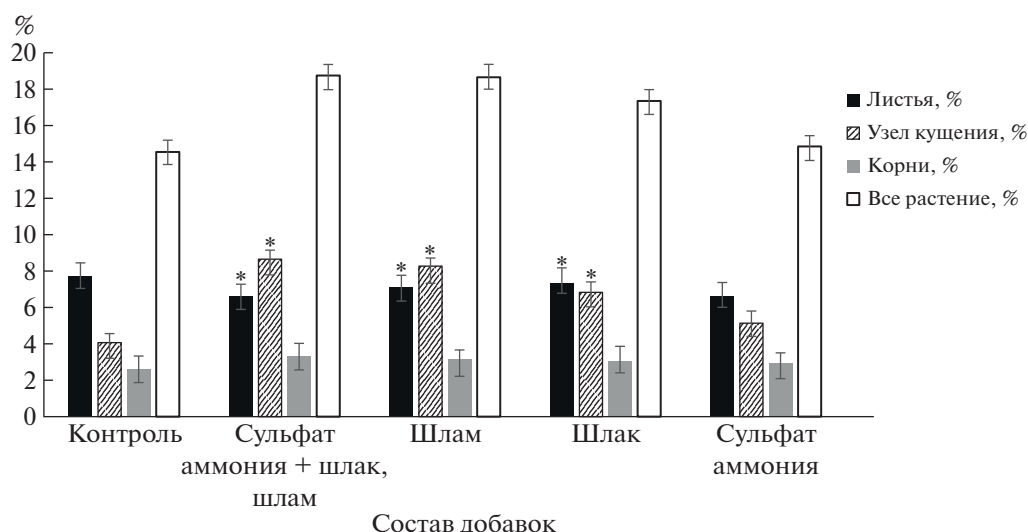


Рис. 4. Содержание водорастворимых полисахаридов в растениях озимой пшеницы (усредненные данные) после введения исследуемых добавок. * Достоверные различия по сравнению с контролем ($p < 0.05$).

его смеси — на 5.6%, под действием шлама и шлака — на 10 и 8.9% соответственно (табл. 3).

Выживаемость растений — это один из факторов, определяющий урожайность пшеницы в регионах с холодным климатом. Благополучное формирование растений при похолодании и высокую урожайность можно оценить по биохимическим показателям в узле кущения [27]. Имеется корреляция между устойчивостью массы сухого вещества и количеством накопленных углеводов [28]. В узле кущения озимой пшеницы сахара накапливаются при воздействии отрицательных температурных значений. Если влияние моносахаридов на условия произрастания пшеницы известно, то определение водорастворимых полисахаридов и их значение под действием условий произрастания не проводилось, хотя стимулирующее действие микроэлементов на накопление растворимых полисахаридов является одним из факторов их положительного влияния на устойчивость к полеганию [29]. Поэтому в работе определено содержание водорастворимых полисахаридов в различных частях пшеницы (рис. 3).

Для получения максимального выхода водорастворимых полисахаридов перечисленные действия совершали при разных значениях температуры и различном времени экстракции. Согласно полученным результатам максимальный выход полисахаридов был достигнут при двукратной обработке сырья на кипящей водяной бане в течение 120 мин.

Если в контрольных растениях полисахариды концентрировались в листьях, то в опытных растениях — в узле кущения (рис. 4).

Указанные биохимические изменения отразились как на урожайности пшеницы, так и на ее

структуре (табл. 4) [30]. Средняя озерненность колоса у сортов яровой пшеницы колеблется от 15 до 25, в то время как масса 1000 зерен значительно превышает 30 г: в среднем она составляет 33–35 г и достигает 38–42 г у отдельных сортов. Характер формирования элементов структуры урожая яровой пшеницы различного географического происхождения при норме высева семян 6 млн шт/га показал, что у всех групп сортов процент выживания продуктивных растений к числу высеванных семян составляет всего 55–70%, а в годы с сильной весенне-летней засухой снижается до 35–50%. Это говорит о необходимости улучшения указанного элемента структуры урожая как селекционными, так и агротехническими методами, к которым относится добавка высокодисперсных соединений, содержащих микроэлементы, например шлама или шлака в кислой среде.

В работе наблюдалось повышение урожайности пшеницы на опытных участках, но лучший рост был замечен с применением шлама — на 12.9%. Относительно контроля увеличились число колосков в колосе (на 10.6%) и масса 1000 зерен (на 10.8%), число зерен в колоске по всем вариантам отличалось от контроля незначительно. Такие изменения можно объяснить стимулирующим действием металлов — микроэлементов в шламе — на обмен веществ растений и предупреждение стрессовых ситуаций.

В табл. 5 представлены качественные показатели зерна изучаемой культуры после уборки.

После уборки урожая был проведен анализ химического состава зерна в лабораторных условиях, а также доли сырой клейковины и ее качества (табл. 5). Высокое содержание клейковинных белков с их хорошими физико-химическими

Таблица 4. Качество зерна яровой пшеницы сорта “Рима”

Варианты	Зольность зерна, %	Массовая доля сырой клейковины, %	Показатель качества клейковины	Группа качества
Контроль	2.14	26.13	83.4	II
Сульфат аммония	2.10*	26.86*	83.8*	II
Шлак	2.05*	27.21*	84.1*	II группа качества
Сульфат аммония/шлак или шлам	2.06*	29.28*	84.4*	II
Шлам	2.06*	27.21*	84.5*	II
НСР05	0.11*	0.96*		

* Значения, достоверно отличные от контроля при $p < 0.05$.

Таблица 5. Содержание фитогормонов в опытных образцах пшеницы под действием добавок ($n = 10$). Содержание NH_4Cl составило 400 г

Добавки	ИУК, нг/г сырой массы	ЦК, нг/г сырой массы	ГК, нг/г сырой массы	АБК, нг/г сырой массы	% к контролю
Контроль	4.7 ± 0.31	654.20 ± 2.37	24.14 ± 0.07	70.36 ± 1.58	
Шлам 400 г	5.04 ± 0.38	641.55 ± 5.22	$25.15 \pm 1.52^*$	$69.03 \pm 1.49^*$	–4.56
Шлам 1 кг	$5.11 \pm 0.45^*$	$649.44 \pm 6.13^*$	$25.43 \pm 0.22^*$	$67.52 \pm 1.26^*$	–6.70
Шлам 2 кг	$5.24 \pm 0.36^*$	650.38 ± 8.31	25.19 ± 0.17	71.93 ± 2.31	–0.61
Шлак 400 г/ NH_4Cl	5.10 ± 0.38	643.55 ± 5.18	25.15 ± 1.52	69.03 ± 1.49	–4.56
Шлак 1 кг/ NH_4Cl	$5.27 \pm 0.81^*$	$660.64 \pm 3.28^*$	$25.45 \pm 0.28^*$	72.61 ± 1.67	0.41
Шлак 2 кг/ NH_4Cl	$5.19 \pm 0.45^*$	651.26 ± 4.18	25.08 ± 0.16	70.44 ± 2.29	–2.58

*Достоверные различия по сравнению с контролем ($p < 0.05$).

свойствами повышает питательную ценность и служит основным условием высоких хлебопекарных качеств муки [31, 32]. При определении качественного показателя клейковины видно, что пшеница для всех опытных вариантов и контроля относится ко II группе качества, а зерно яровой пшеницы сорта “Рима” — к 3 классу.

Урожайность пшеницы с хорошими параметрами качества определяется как генотипом, так и условиями окружающей среды, включая погодные условия и методы ведения сельского хозяйства. Результаты проведенного опыта показали, что изменение качественных и количественных характеристик зерна пшеницы под влиянием приведенных условий с использованием шлама позволит реализовать генетический потенциал хороших сортов и широко распространить данный элемент технологии.

Растение подвергается воздействию введенных в почву компонентов, что может вызвать значительные изменения в его биохимических показателях. Проведенная работа основывалась на

следующем: если наблюдается изменение биохимических показателей более чем на 30%, это указывает на наличие негативного токсического эффекта, вызванного воздействием исследуемых компонентов. Было обнаружено, что активность фермента пероксидазы в корнях проростков выше контроля во всех вариантах опыта, особенно при добавке шлама (на 18.8% выше контроля). Активность фермента супероксиддисмутазы также была выше контроля как в корнях, так и в ростках при взаимодействии с добавками, за исключением сульфата аммония и шлака. Максимальное значение активности супероксиддисмутазы наблюдалось при наличии шлама в почве.

Измерение активности ферментов-антиоксидантов, таких как супероксиддисмутаза и пероксидаза, при введении различных добавок позволило установить, что при высоких морфофизиологических показателях активность пероксидазы была достоверно выше контроля, а активность супероксиддисмутазы — ниже. Это свидетельствует о малом содержании активных форм кис-

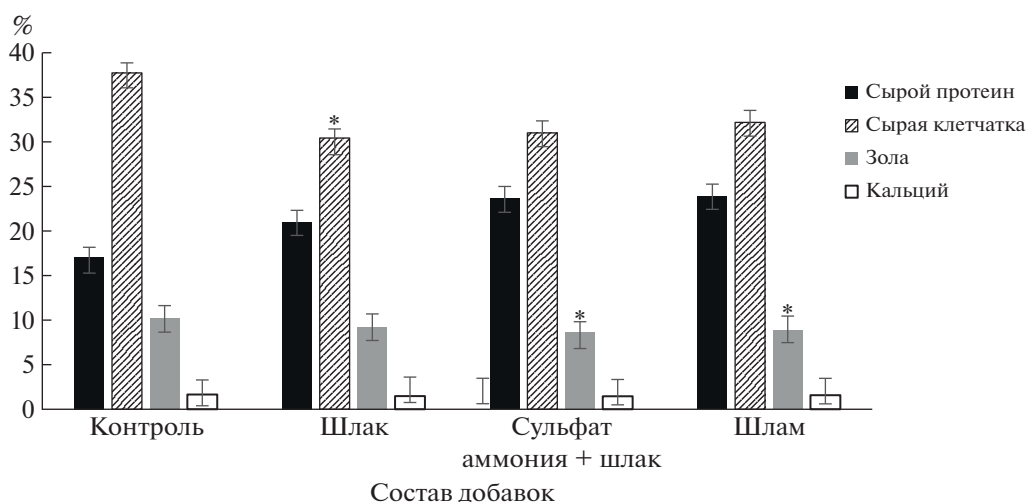


Рис. 5. Действие предпосевной обработки почвы на химический состав зеленой массы пшеницы. * Достоверные различия по сравнению с контролем ($p < 0.05$).

лорода, отсутствии стресса у растений, контактирующих с введенными в состав почвы добавками [33, 34].

Сульфат аммония создает кислую среду и в условиях исследуемой почвы не влияет на морфофизиологические показатели проростков пшеницы: изменение их характеристик относительно контроля незначительно или отрицательно. Для пшеницы оптимальным значением pH для роста и высокого урожая является значение от 5.5 и 7.5. Уровень снижения урожая при увеличении кислотности почвы зависит от сорта пшеницы, типа почвы и погодных условий в данном регионе. Снижение величины pH почвы до ≤ 3 приводит к тому, что медь, цинк и бор становятся токсичными, а растения проявляют симптомы дефицита питательных веществ [35].

Влияние протонов кислой среды для шлама и шлака различно. Суспензия шлама имеет более кислую реакцию среды по сравнению со шлаком. Если использовать смесь шлама и хлорида аммония, то в почве создается достаточно кислая среда, что неблагоприятно для роста пшеницы. Физиологические аспекты кислотного стресса у растений — ризотоксичности или стресса при низком pH (H^{+}) — являются предметом исследований, в частности, в отношении кислых почв. Сравнение данных, полученных в результате количественного анализа признаков и глобального профилирования транскриптома растений в ответ на высокие концентрации протонов, выявило двухэтапный генетический ответ растущих растений на стресс при низком уровне pH [36].

В краткосрочной перспективе H^{+} аденозинтрифосфатазы (АТФ) протонного насоса представляют собой первый барьер в клетках корня, выделяя избыток H^{+} либо в апопласт, либо в ва-

куоль; последующая система защитной сигнализации включает в себя ауксин, салициловую кислоту и метилжасмонат, которые впоследствии инициируют экспрессию факторов транскрипции.

Долгосрочный ответ включает в себя другие гены, такие как альтернативную оксидазу и NAD(P)H-дегидрогеназу II типа, которые действуют для детоксикации опасных активных форм кислорода в митохондриях и помогают растениям лучше справляться со стрессом. Ряд металлов, особенно в высокодисперсном состоянии, часто активируются ризотоксичностью H^{+} . При этом гены, связанные с клеточной стенкой, а также биохимические гены отражают изменения клеточного метаболизма и биохимии в кислых условиях, снимая стресс. Таким образом, смесь хлорида аммония со шлаком не снижает более высокие показатели роста, характерные только для шлама.

Смесь шлака и сульфата аммония создает более кислую среду по сравнению с чистым шлаком и способствует высвобождению дополнительных питательных веществ для растений. Присутствие шлака и хлорида аммония в почве способствует накоплению фосфора (+0.2%), магния (+0.09%), калия (+0.28%) и натрия, а также проявляет антагонизм к натрию и кальцию, хотя динамика и взаимодействие химических элементов могут изменяться в различных органах растений, как показано в [37].

В зависимости от добавки обработка почвы перед посевом семян пшеницы привела к увеличению содержания протеина в среднем на 38%. Активный рост растений под воздействием добавок способствовал повышению протеина и снижению клетчатки в зеленой массе, что является закономерным результатом активных ростовых

процессов, сопровождающихся образованием новых тканей. Содержания кальция в разных группах существенно не различались (рис. 5). Количество фосфора изменялось незначительно и составляло для контроля 0.16 ± 0.03 , в присутствии шлака — 0.14 ± 0.01 , смеси сульфат аммония/шлак — 0.20 ± 0.03 , шлама — 0.19 ± 0.05 .

Вариации морфологических показателей подтверждают изменение проницаемости мембран, что, по-видимому, обусловлено изменением pH среды за счет изменения кислотности почвы при внесении добавок, а также высвобождением и накоплением высокодисперсных частиц, обладающих характерной для наночастиц высокой восстановительной способностью.

Различные этапы развития растения связаны с изменением соотношения фитогормонов в корневой и надземной частях проростков под действием внешней среды. Механизм “гормоны—ферменты—другие гормоны” играет важную роль в регулировании скорости и направления роста растения, его развития, усиливая гормональный сигнал и определяя процесс развития растения. Разные этапы развития организма при взаимодействии с внешней средой связаны с различными соотношениями фитогормонов в корневой и надземной частях проростков. Этот процесс управляется каскадным эффектом “гормоны—ферменты—другие гормоны”, который усиливает гормональный сигнал и моделирует весь процесс развития растения [38–40].

Для изучения влияния используемых добавок на содержание фитогормонов в проростках пшеницы был проведен эксперимент, заключающийся в проращивании семян в песчаном субстрате. Через тридцать дней была измерена активность ИУК, ГК, АБК и цитокининов (табл. 5).

Добавки шлама в количестве до 2 кг и комбинации шлака (1 кг) с хлоридом аммония (400 г) привели к увеличению содержания ИУК в проростках пшеницы, что, в свою очередь, способствовало повышению содержания АТФ, улучшению транспорта катионов водорода, стимуляции роста и размножения клеток. Также было отмечено увеличение активности различных ферментативных реакций и содержания ГК и цитокининов. Эти добавки активизировали процессы передвижения фитогормонов и оказали положительное влияние на развитие растения.

Однако необходимы исследования для каждого конкретного состава и концентрации шлама и шлака, а также для каждой конкретной почвы.

ВЫВОДЫ

Урожайность пшеницы определяется как генотипом, так и факторами окружающей среды, включая погодные условия и методы ведения

сельского хозяйства. Установлено, что добавки в почву высокодисперсного шлама в количестве 2 т на га при выращивании пшеницы не приводит к появлению стрессовых показателей у растений, но значительно повышает урожайность и устойчивость зеленой массы пшеницы к полеганию. Этот вывод также подтверждают биохимические показатели: анализ данных ферментов оксидантов и фитогормонов в зависимости от количества введенных добавок в почву. Для шлака характерно положительное влияние при более низком содержании его в почве (до 1 т на га) и в условиях создания кислой реакции, например, в присутствии хлорида аммония. Кислая среда (pH от 4.5 до 6, значение pKa 9.24) способствует высвобождению микроэлементов из шлака и переводу их в усвояемое состояние. Результаты проведенного опыта показали, что изменение качественных и количественных характеристик зерна пшеницы под влиянием приведенных условий с использованием шлама позволит реализовать генетический потенциал хороших сортов и широко распространить данный элемент технологии.

Применение хлорида аммония не повышает урожайность и показатели роста пшеницы. Аммонийный азот (NH_4^+), внесенный в почву или полученный в результате разложения почвальных остатков и органического вещества почвенными бактериями, переходит в нитрат азота (соль азотной кислоты NO_3^+). В результате такой реакции высвобождаются два иона водорода H^+ , что приводит к повышению кислотности почвы. Кроме того, ионы аммония, смешанные в концентрированной форме с поверхностным слоем почвы, могут быть замещены другими основными ионами, такими как кальций и калий, которые впоследствии постепенно опускаются вниз по профилю почвы в процессе выщелачивания. В течение последних нескольких десятилетий этот процесс считается причиной увеличения кислотности почвы в тех местах, где почвы изначально были нейтральными или слегка щелочными.

На этапах прорастания семян и роста проростков под воздействием добавок изменились количество и соотношение фитогормонов, регулирующих развитие проростков. Установлено изменение активности ферментов-антиоксидантов: пероксидазы и супероксиддисмутазы. Добавки шлама, смеси шлак/хлорид аммония и в меньшей степени шлака способствовали повышению содержания фосфора, серы, калия, натрия и магния в проростках и корнях пшеницы. Изменение соотношения макро- и микроэлементов в исследуемых образцах приводило к увеличению биометрических показателей. Накопления тяжелых металлов в составе растений не обнаружено. При работе с металлургическими отходами основная экологическая опасность — это загрязнение поч-

вы тяжелыми металлами, поэтому при их использовании необходимо соблюдать следующие условия: высокодисперсное состояние, оптимальные нормы внесения, кислотность почвы.

Введение в почву исследуемых добавок повысило урожайность пшеницы, кроме того, в ней увеличилось содержание протеинов и полисахаридов. Таким образом, применение шлама и шлака в растениеводстве возможно, но необходимо соблюдение технологии их обработки, анализ состояния и кислотности почв, а также контроль глубины внесения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кондаков С.Э., Кузнецов Д.В., Чурилов Г.И. и др. // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 5. С. 30.
2. Давыдова С.Л., Тагасова В.И. Тяжелые металлы как супертоксиканты XXI века. М.: РУДН, 2002. 140 с.
3. Деринг А. // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов: обзор. информ. ВИНТИ. 2007. № 4. С. 54.
4. Абдеев М.А., Юсупова А.И., Пискунов В.М., Колесников А.В. Извлечение ценных компонентов из отвалных продуктов производства тяжелых цветных металлов. М.: Цветметинформация, 1980. 48 с.
5. Белюченко И.С., Муравьев Е.И. // Экологический вестник Северного Кавказа. 2009. Т. 5. № 1. С. 84.
6. Костенко М.Ю., Безносюк Р.В., Чурилов Д.Г. и др. Тез. докл. Национал. науч.-практ. конф. "Приоритетные направления научно-технологического развития агропромышленного комплекса России", Рязань, 22 ноября 2018. С. 228.
7. Степанова Л.П., Писарева А.В., Циканавичуте В.Э. // Экология и промышленность России. 2020. Т. 24. № 6. С. 54.
8. Полищук С.Д., Чурилов Д.Г., Чурилова В.В., Арапов И.С. Тез. докл. 69-й Междунар. науч.-практ. конф. "Инновационное научно-образовательное обеспечение агропромышленного комплекса", Рязань, 25 апреля 2018. С. 302.
9. Чурилов Д.Г. Тез. докл. Национал. науч.-практ. конф. "Инновационное развитие современного агропромышленного комплекса России", Рязань, 12 декабря 2016. Ч. 1. С. 233.
10. Чурилов Д.Г., Полищук С.Д., Чурилова В.В. Тез. докл. междунар. науч.-практ. конф. "Комплексный подход к научно-техническому обеспечению сельского хозяйства (Международные Бочкаревские чтения)", Рязань, 6–9 декабря 2018. С. 396.
11. Полищук С.Д., Чурилов Г.И., Чурилова В.В. и др. // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. 2019. Т. 4. № 44. С. 45.
12. Дзидзигури Э.Л., Сидорова Е.Н. // Методы исследования характеристик и свойств металлов: исследование металлов на рентгеновском дифрактометре "Дифрей": лаб. практикум. М.: Изд. Дом МИСиС, 2013. С. 138.
13. Lupova E., Vinogradov D., Zaharova O., Kucher D. // BIO Web Conf. 2020. V. 27. P. 00014. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20202700014>
14. Chernikova O., Mazhaysky Y., Seregina T., Buryak S. // E3S Web Conf. 2020. V. 212. P. 01002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021201002>
15. Churilov G.I., Polischuk S.D., Churilov D.G. et al. // Int. J. Nanotechnol. 2018. V. 15. № 4–5. P. 258. <https://doi.org/10.1504/IJNT.2019.102400>
16. Голубева Н.И., Назарова А.А., Полищук С.Д. и др. Определение воздействия наноматериалов на растительные объекты пищевого и кормового назначения по витальным и морфофизиологическим показателям. Рязань: Изд-во РГТУ, 2013. 54 с.
17. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований) 5 изд. доп. и перераб. М.: Агропромиздат, 1985. С. 351.
18. Teterin V., Terentyev V., Andreev K. et al. // E3S Web Conf. 2020. V. 203. P. 02011. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020302011>
19. Antoshina O., Odnodushnova J., Fadkin G. et al. // BIO Web Conf. 2020. V. 17. P. 00084. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20201700084>
20. Musayev F., Danilin S., Zakharova O., Rodikov S. // E3S Web Conf. 2020. V. 210. P. 04003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021004003>
21. Thomas G.W. // Methods of Soil Analysis: Part 3 Chemical Methods, 5.3. 1996. P. 475. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c16>
22. Bargrizan S., Smernik R.J., Mosley L.M. // Soil Sci. Soc. Am. J. 2017. V. 81. № 6. P. 1350. <https://doi.org/10.2136/sssaj2017.04.0119>
23. Чурилов Г.И., Амлеева Л.Е. Биологическое действие наноразмерных металлов на различные группы растений: монография. Рязань: Изд-во РГТУ, 2010. 150 с.
24. Константинова В.И., Андреева В.И., Чиннова Л.Б. // Сб. Тр. НИУИФ. М. 1989. Вып. 256. С. 46.
25. Сапожникова Е.В. Акад. наук СССР. Ин-т биохимии А.Н. Баха. М.: Наука, 1965. 182 с.
26. Полищук С.Д., Чурилов Д.Г., Чурилова В.В. и др. // Тез. докл. 70-й Междунар. науч.-практ. конф. "Вклад университетской аграрной науки в инновационное развитие агропромышленного комплекса", Рязань, 23 мая 2019. С. 102.
27. Костин В.И. // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2014. № 2 (26). С. 55.
28. Hassan M.A., Xiang C., Farooq M. et al. // Front. Plant Sci. 2021. V. 12. P. 676. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.676884>
29. Торицов В.Е., Мельникова О.В., Богомаз Р.А. // Нива Поволжья. 2015. № 2 (35). С. 69.
30. Бебякин В.М., Старичкова А.А., Дорогобед Н.И. // Зерновое хозяйство. 2003. № 3. С. 22.
31. Vinogradov D.V., Evsenina M.V., Lupova E.I. // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2022. V. 1069. № 1. P. 012029. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1069/1/012029>

32. *Виноградов, Д.В., Зубкова Т.В.* // Серия конференций ВГД: Наука о земле и окружающей среде. 2022. Т. 981. № 2. С. 022058.
33. *Андреева В.А.* Фермент пероксидаза: Участие в защитном механизме растений. М.: Наука, 1988. 128 с.
34. *Романовский Ю.М., Тихонов А.Н.* // Успехи физ. наук. 2010. Т. 180. № 9. С. 932.
35. *Neina D.* // Appl. Environ. Soil Sci. 2019. V. 2019. № 1. P. 5794869.
<https://doi.org/10.1155/2019/5794869>
36. *Шавруков Ю., Хираи Ю.* // Журнал экспериментальной ботаники. 2016. Т. 67. №. 1. С. 15.
<https://doi.org/10.1093/jxb/erv437>
37. *Мухоморов В.К., Аникина Л.М.* // Агрофизика. 2011. № 2. С. 26.
38. *Кулаева О.Н.* Гормональная регуляция физиологических процессов у растений на уровне РНК и белка. М.: Наука, 1982. 351 с.
39. *Курапов П.Б.* “Гормональный баланс. Методы его изучения и регулирования” Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. М.: Моск. сельхоз. академия. 1996. 47 с.
40. *Курсанов А.Л.* Внутренняя организация физиологических процессов у растений. М.: Наука, 1982. 272 с.