

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.96>

ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФОСФОГИПСА В КАЧЕСТВЕ УДОБРЕНИЯ ИЛИ
КОМПОНЕНТА КОМПЛЕКСНОГО УДОБРЕНИЯ

Научная статья

Монастырский Д.^{1,*}, Куликова М.А.², Шихов А.Р.³, Санаев А.И.⁴

²ORCID : 0000-0003-4000-0040;

^{1,2,3,4} Южно-Российский государственный политехнический университет имени М.И. Платова, Новочеркасск,
Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (danya.monastyrskij.95[at]mail.ru)

Аннотация

В работе обсуждается использование фосфогипса (ФГ), получаемого при производстве фосфорной кислоты, в сельском хозяйстве, в частности, при производстве удобрений и улучшении почвы. В нем подчеркивается значительное содержание питательных веществ в фосфогипсе, особенно фосфора и серы, которые полезны для роста растений. Изучаются проблемы и потенциал использования фосфогипса в качестве удобрения, включая его влияние на структуру почвы, обмен питательных веществ и усвоение растениями. Приводятся ссылки на различные исследования, указывающие как на преимущества, так и на потенциальные недостатки применения фосфогипса, такие как его кислая природа, потенциальное выделение вредных соединений и его взаимодействие с другими компонентами почвы. Кроме того, в тексте обсуждается сочетание фосфогипса с известью для повышения кислотности почвы и доступности питательных веществ для растений, а также его роль в снижении потерь азота и улучшении его усвоения в сельскохозяйственных системах. Исследование подчеркивает продолжающиеся усилия по оптимизации применения фосфогипса в сельском хозяйстве, направленные на совершенствование методов ведения сельского хозяйства, повышение урожайности сельскохозяйственных культур и обеспечение экологической устойчивости.

Ключевые слова: фосфогипс, сельское хозяйство, удобрения, почва, растения, фосфор, сера, структура почвы, обмен питательных веществ, известь, кислотность почвы, азот, урожайность, экологическая устойчивость.

A STUDY OF WAYS TO USE PHOSPHOGYPSUM AS A FERTILIZER OR AS A COMPONENT OF A COMPLEX
FERTILIZER

Research article

Monastirskii D.^{1,*}, Kulikova M.A.², Shikhov A.R.³, Sanaev A.I.⁴

²ORCID : 0000-0003-4000-0040;

^{1,2,3,4} South Russian State Polytechnic University named after M.I. Platov, Novocherkassk, Russian Federation

* Corresponding author (danya.monastyrskij.95[at]mail.ru)

Abstract

The work discusses the use of phosphogypsum (PG), derived from phosphoric acid production, in agriculture, particularly in fertilizer production and soil improvement. It emphasizes the significant nutrient content of phosphogypsum, especially phosphorus and sulphur, which are beneficial for plant growth. The problems and potential of using phosphogypsum as a fertilizer are explored, including its effects on soil structure, nutrient metabolism and plant uptake. References are given to various studies indicating both the advantages and potential disadvantages of phosphogypsum application, such as its acidic nature, potential release of harmful compounds, and its interaction with other soil components. In addition, the text discusses the combination of phosphogypsum with lime to increase soil acidity and plant nutrient availability, as well as its role in reducing nitrogen losses and improving nitrogen uptake in agricultural systems. The study highlights ongoing efforts to optimize the use of phosphogypsum in agriculture to improve farming practices, crop yields and environmental sustainability.

Keywords: phosphogypsum, agriculture, fertilizer, soil, plants, phosphorus, sulphur, soil structure, nutrient exchange, lime, soil acidity, nitrogen, yield, environmental sustainability.

Введение

При производстве фосфорной кислоты (H₃PO₄) методом мокрой кислотной обработки с использованием природных фосфатных пород в качестве сырья образуются крупные твердые отходы – фосфогипс (ФГ), содержащие значительное количество полезных для почвы и растений элементов питания, особенно фосфора и серы. На промышленном производстве фосфорных удобрений образуется около 4-6 т ФГ на тонну производимой фосфорной кислоты. Удобрения, содержащие фосфогипс, восполняют дефицит и обеспечивают оптимальные условия для растений. Фосфор является одним из основных питательных элементов, необходимых для роста растений. Фосфогипс при первоначальном хранении высококислый (рН=1) из-за остаточной серной кислоты и состоит в основном из дегидратированного сульфата кальция, но также содержит большое количество примесей, включая фториды, сульфаты, природные радионуклиды, металлы и другие микроэлементы. По мере обезвоживания и выветривания фосфогипса в хранилищах кислотность постепенно снижается. Фосфогипсовые отвалы также могут выделять в атмосферу газообразный радон и соединения фтора (SiF₄, HF) в значительных количествах. Одной из основных

проблем отвалов ФГ является выделение ^{222}Rn в результате альфа-распада ^{226}Ra . В более ветреных районах также нельзя игнорировать распространение мелких частиц фосфогипса. Сегодня использование фосфогипса в удобрениях является распространенной практикой. Однако, все еще проводятся исследования для оптимизации его применения и определения новых возможностей использования. Ученые и сельскохозяйственные специалисты продолжают исследовать влияние фосфогипса на состояние почвы, питательный обмен и усвоение фосфора растениями. Изучаются возможности использования фосфогипса в сочетании с другими удобрениями или добавками для достижения оптимальных результатов. В целом, исследования по использованию фосфогипса в удобрениях ведутся непрерывно для улучшения практик сельского хозяйства и увеличения урожайности [1]. Добавление фосфогипса в почву помогает бороться с уплотнением почвы и улучшает ее структуру. В результате улучшается водопроницаемость почвы и доступность воздуха для корней растений, способствует улучшению водонепроницаемости почвы и способности почвы удерживать влагу. Это особенно полезно в засушливых регионах, где доступ к воде ограничен. ФГ способствует повышению обмена газов между атмосферой и корнями растений. Это может улучшить дыхание растений и обмен кислорода. Содержащийся сульфат кальция является важным питательным элементом для растений. Добавление в почву улучшает доступность для растений и способствует их росту и развитию. Фосфогипс способен связывать алюминий и другие токсичные ионы в почве, что позволяет растениям лучше расти и развиваться. Содержащийся фосфор в виде гидроксиапатита, делает его менее доступным для растений по сравнению с традиционными фосфорными удобрениями. Это означает, что растения хуже усваивают этот фосфор и его эффективность ниже. Содержит кальций и серу, которые оказывают положительное влияние на структуру почвы и подавляют развитие некоторых болезней и вредителей. Однако, если фосфогипс используется в больших количествах, происходит избыточное накопление кальция в почве, негативно сказывающиеся на росте растений. Неконтролируемое распространение фосфогипса приведет к загрязнению почвы и воды. Фосфогипс совмещается с другими удобрениями или веществами, такими как: аммиачная селитра (NH_4NO_3); калийные удобрения; органические удобрения; микроэлементы – железо, цинк, медь или марганец.

Классическим источником фосфора в удобрениях были фосфориты, но использование фосфогипса стало интересным альтернативным решением. ФГ широко используется для снижения выбросов газов при компостировании. Хотя химический состав фосфогипса варьируется в зависимости от разных источников, в основном он состоит из дегидрата сульфата кальция ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) (> 90%) с незначительным количеством фосфата, кремнезема, глины и других микроэлементов. Фосфогипс может снизить выбросы метана при компостировании навоза крупного рогатого скота за счет увеличения содержания сульфатов, но существенно не влияет на содержание общего углерода, и минерального азота в продукте компостирования. Добавление фосфогипса не влияло на выбросы NH_3 , но увеличивало содержание минерального азота в компосте, возможно, из-за ингибирования процесса нитрификации для производства закиси азота (N_2O). Фосфогипс является кислым и может увеличивать содержание аммония (NH_4^+) в компосте за счет снижения выбросов NH_3 при компостировании свиного навоза. Добавление фосфогипса в количестве 10% от сырья (сырой массы) снижает выбросы NH_3 на 23,5% и, таким образом, увеличивает минеральный азота компоста, хотя выбросы N_2O были увеличены на 17,4% [2]. Применение фосфогипса в сельском хозяйстве угрожает агроэкологическим системам и безопасности пищевых продуктов из-за большого количества экологически и биологически доступных потенциально токсичных элементов (ПТЭ) в ФГ. Недавно было обнаружено, что биоуголь сильно иммобилизует и адсорбирует ПТЭ, а также подавляет фитодоступность ПТЭ. Следовательно, в этом контексте были проведены лабораторные эксперименты с использованием партий и колонок для проверки наличия ПТЭ в ФГ при различных температурах пиролиза и различном процентном содержании биоугля в рисовой шелухе. Впоследствии были проведены горшечные эксперименты для проверки влияния добавления рисовой шелухе на концентрации ПТЭ в сельскохозяйственных культурах при добавлении ФГ в различные типы почв, и было определено влияние комбинации рисовой шелухе и ФГ на урожайность сельскохозяйственных культур. Результаты экспериментов с партиями и колонками показали, что температура пиролиза и доза биоугля значительно снижает ПТЭ концентрации в ФГ. Температура приготовления (600 °C) и вносимая доза (60% по массе) рисовой шелухе были оптимизированы с помощью модели смешанного эффекта. По сравнению с контролем применение комбинации на суглинистой почве или песке значительно увеличилось урожайность сельскохозяйственных культур. Комбинация значительно снизила концентрации ПТЭ (As, F, Cd и Pb на 39, 41, 75 и 86% соответственно в водяном шпинате и на 100%, 64%, 75% и 88% соответственно в спаржевом салате) в съедобных частях сельскохозяйственных культур по сравнению только с обработкой ФГ [3].

Фосфогипс лучше используется только на почвах с pH выше 5. Если почва имеет низкий pH (кислотную среду), то в результате реакции с кислотностью может высвободиться токсический алюминий. Добавление щелочных веществ или регуляторов pH может помочь нейтрализовать любые кислые вещества, присутствующие в фосфогипсе. Низкий уровень pH почвы вызывает негативное воздействие на биогеохимию почвы. Эти пагубные эффекты могут ухудшить заглубление корней, поглощение питательных веществ и воды и, как следствие, снизить урожайность. На протяжении сотен лет доломитовая известь ($\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$) применялась для улучшения кислотности почвы. Внесение извести повышает pH почвы и насыщенность почвы основаниями, тем самым повышая плодородие почвы и образуя комплексы с обменным алюминием (Al^{3+}), который токсичен для растений. Обычной практикой является внесение извести в качестве основного материала путем вспашки и боронования при обычной обработке почвы. Однако в системах без обработки почвы основным методом является отсутствие заделки, когда известь наносится на поверхность почвы. Действие этого продукта ограничивается небольшим слоем почвы вокруг самих частиц извести, ограничивая его эффективность в коррекции кислотности верхнего слоя почвы. Воздействие известкования в подпочве может иметь место, но зависит от текстуры почвы, нормы известкования, внесения с течением времени и управления системой. Новой стратегией повышения эффективности поверхностного известкования является сочетание извести с фосфогипсом. Сульфат связывает Al^{3+} , делая его недоступным для поглощения растениями и

способствуя заглоблению корней. Разложение этих более глубоких корней создает биопоры, которые увеличивают подвижность извести по всем слоям почвы. Таким образом, фосфогипс дополняет известь обоими важными действиями в профиле почвы. Помимо улучшения химических свойств почвы, сочетание извести и фосфогипса значительно улучшает физические и биологические свойства, такие как структура почвы, состав и функции микробных сообществ. Известь и фосфогипс также могут изменять эффективность N-удобрения, поскольку внесение удобрений в почву влияет на микробиологически опосредованные N-реакции и N-динамику во взаимодействии системы почва-растение. Повышение рН почвы после известкования также вызывает каскадную реакцию N-цикла.

Реакция удобрений на основе аммония может привести к подкислению почвы в результате нитрификации. Одним из способов нейтрализовать подкисляющий эффект удобрений на основе аммония является внесение извести и фосфогипса, стимулирующих нитрификацию в кислых почвах и улучшающих усвоение азотных удобрений сельскохозяйственными культурами. Чтобы уменьшить потери азота в результате выщелачивания, улетучивания и выбросов N_2O из сельскохозяйственной системы, извлечение азота растениями должно быть максимальным. Внесение извести и фосфогипса усиливает рост корней в более глубоких слоях, где азот, полученный из удобрений, может быть перемещен вертикально. После сбора урожая растительные остатки становятся временным хранилищем азота, к которому могут получить доступ последующие культуры в результате разложения остатков и минерализации, тем самым уменьшая потери N при удобрении [4], [5], [6].

По сравнению с известняком, фосфогипс был изучен несколькими исследователями как возможное дополнение к известкованию для снижения токсичности Al и увеличения доступности Ca в подповерхностных слоях почвы. Было показано, что это химическое улучшение почвы способствует большему распространению и развитию корней. Из-за высокой подвижности сульфатов добавление фосфогипса к внесению извести более эффективно для увеличения количества и стабилизации гуминовых соединений в подпочве, чем индивидуальное внесение извести и внесение почвенных добавок увеличивает хранение ОУ. Таким образом, целью данного исследования было оценить поступление сухого вещества и изменения общего, дисперсного и связанного с минералами органического углерода, общего и дисперсного азота и содержания гуминовых веществ в профиле под влиянием поверхностного внесения извести и фосфогипса в рамках долгосрочного эксперимента по выращиванию культур в условиях отсутствия обработки почвы [7].

В процессе компостирования животноводческого навоза образуются биохимически стабильные органические материалы, способные к легкой обработке и равномерному нанесению на почву. Однако происходят значительные потери азота (N) по сравнению с другими питательными веществами, такими как фосфор (P), что может вызвать дисбаланс питательных веществ, такой как снижение соотношения N к P (N / P), а также экологические проблемы, такие как загрязнение атмосферы. Улетучивание NH_3 и, соответственно, потери азота могут быть снижены путем совместного внесения ферментированной жидкости и цеолита или смеси ферментированной жидкости и цеолита с опилками вместо рисовой шелухи. Использование опилок в качестве наполнителя может привести к уменьшению улетучивания NH_3 и, следовательно, потере азота из-за более высокой способности удерживать NH_4^+ в опилках по сравнению с рисовой шелухой. Так как содержание углерода (C) и общее количество сухого вещества (а также концентрации питательных веществ) в готовом компосте являются важными параметрами при его использовании на полях, были проведены исследования потерь углерода и сухого вещества в компостной смеси. Смешивание наполнителей (рисовой шелухи и сосновых опилок) с навозом приводило к увеличению общей концентрации углерода, однако снижало общую концентрацию азота и фосфора в компостирующей смеси из-за более высокого содержания углерода и более низких концентраций азота и фосфора в наполнителях по сравнению с исходным навозом [8], [9].

Методы и принципы исследования

Существуют различные методы применения фосфогипса в сельском хозяйстве. Во-первых, его можно вносить в почву в виде гранул или порошка, используя как источник фосфора и серы для растений, а также как средство для снижения кислотности и обеспечения долгосрочного питания. Во-вторых, фосфогипс способен улучшать структуру почвы, разрыхляя её и обеспечивая лучшее дренирование, что уменьшает плотность и повышает влагоемкость. Третий метод заключается в использовании фосфогипса для защиты от эрозии путем создания барьеров, предотвращающих потерю плодородного слоя. И, наконец, он может быть применен в качестве препарата для защиты растений от болезней, таких как мучнистая роса или черная ножка [10].

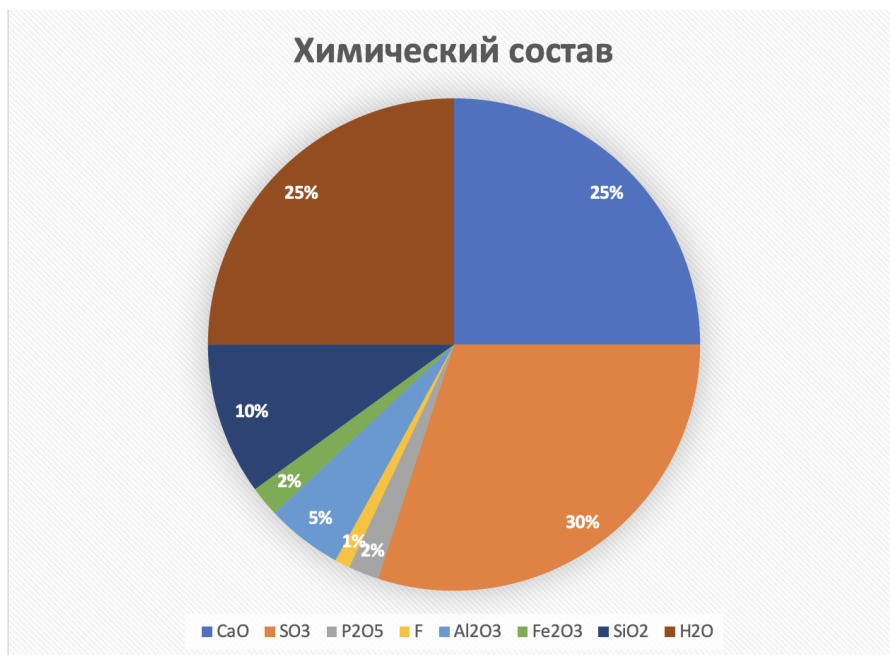


Рисунок 1 - Состав фосфогипса
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.96.1>

Фосфогипс обычно содержит около 12-16% фосфора (P_2O_5), 20-30% гипса ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) и некоторое количество других минералов и примесей. Его химический состав может варьироваться и включает CaO (30-42%), SO_3 (44-52%), P_2O_5 (1-2%), F (0,1-1%), Al_2O_3 (0,3-5%), Fe_2O_3 (0,2-2%), SiO_2 (0,3-10%) и H_2O (25-40%). Этот состав определяет применимость фосфогипса в производстве удобрений и строительных материалов, а также его потенциальную полезность как источника серы и других элементов. Анализ химического состава фосфогипса существенен для оценки его качества и применимости в различных сферах. Исследования показали его эффективность как источника фосфора для многих растений.

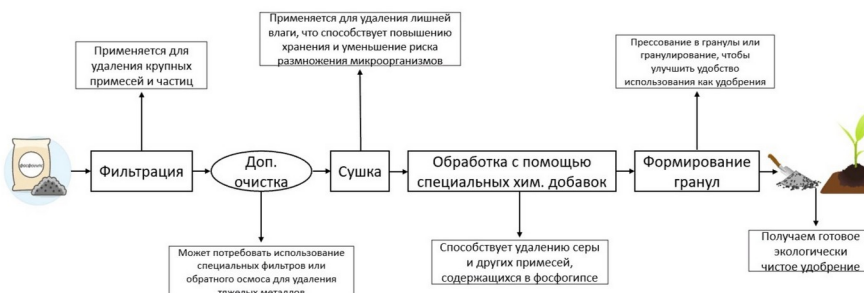


Рисунок 2 - Процесс обработки фосфогипса
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.96.2>

Процесс обработки фосфогипса включает несколько этапов. Сначала фосфогипс подвергается фильтрации для удаления крупных примесей и частиц, после чего происходит сушка с целью удаления лишней влаги, что способствует повышению его хранения и уменьшению риска размножения микроорганизмов. Затем фосфогипс обрабатывается с использованием специальных химических добавок, направленных на удаление серы и других примесей, при этом важно, чтобы эти добавки не оказывали токсичного воздействия на почву и окружающую среду. Наконец, обработанный фосфогипс может быть прессован в гранулы или гранулирован для улучшения его удобства использования в качестве удобрения. Для обеспечения экологической безопасности состава фосфогипса могут применяться методы фильтрации и очистки, включая использование специальных фильтров или обратного осмоса для удаления мелких примесей и тяжелых металлов. После обработки фосфогипс представляет собой экологически безопасный состав, который может быть использован в качестве удобрения. Однако следует помнить, что необходимо соблюдать рекомендации по дозировке при использовании фосфогипса.

Обсуждение

Фосфогипс может представлять опасность в качестве удобрения в следующих случаях: в случае высокого содержания тяжелых металлов, включая свинец, мышьяк, кадмий и другие, а также при наличии радиоактивных веществ, которые могут попадать в пищевую цепочку через растения. Кроме того, его использование может привести к увеличению кислотности почвы и неправильному балансу элементов питания, если он применяется в неподходящих дозах или условиях. Перед применением фосфогипса необходимо провести анализ его состава и происхождения, а также оценить его воздействие на почву и растения.

Фосфогипс становится безопасным для использования в качестве удобрения при соблюдении определенных условий: отсутствие сильной кислотности почвы, нормальный уровень солей в почве, соблюдение рекомендуемой дозировки, предотвращение пересыхания почвы и аккуратное хранение и использование для предотвращения потери его химических свойств.

Евростандарты по использованию фосфогипса в качестве удобрения устанавливают следующие требования. Сначала, содержание гипса ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) должно составлять не менее 90% от общей массы фосфогипса. Влажность фосфогипса не должна превышать 5% от общей массы. Размер частиц должен соответствовать определенным требованиям для обеспечения равномерного распределения и легкости внесения на почву. Кроме того, фосфогипс должен быть свободен от посторонних примесей, таких как камни, пыль, металлические предметы и т.д. Должны быть соблюдены определенные требования по содержанию вредных элементов, таких как свинец, кадмий и тяжелые металлы. Также должно быть снижено содержание фтора, чтобы избежать негативного влияния на растения. Фосфогипс должен обладать определенной растворимостью гипса для обеспечения эффективного усвоения растениями. Наконец, упаковка и маркировка должны соответствовать требованиям в отношении идентификации продукта и безопасности.

В Российской Федерации использование фосфогипса в качестве удобрения подчиняется разнообразным факторам, таким как тип почвы, климатические условия, и потребности в урожайности. Обычно рекомендуется следующее: оптимальная концентрация фосфогипса в почве составляет примерно 300-500 кг/га, что означает, что на одну сотку земли приходится примерно 3-5 кг фосфогипса. Кроме того, к фосфогипсу могут применяться и другие удобрения для полноценного питания растений, такие как аммиачная селитра или удобрения с содержанием калия, в зависимости от требований культурных растений и рекомендаций. Цена фосфогипса варьируется от 1 000 до 2 000 рублей за тонну, но может достигать 6 000-8 000 рублей за тонну. Количество фосфогипса, безопасное для внесения в почву, зависит от нескольких факторов, включая pH почвы и содержание других элементов. Обычно рекомендуется вносить не более 20-30 кг на гектар в год. Однако для точного расчета следует провести анализ почвы и учесть ее особенности.

Заключение

Всеобщее изучение и использование фосфогипса в удобрениях представляют широкие перспективы для улучшения производительности сельского хозяйства, оптимизации ресурсов и снижения негативного экологического воздействия. Эта проблематика привлекает внимание исследователей, агрономов и сельскохозяйственных производителей, стремящихся найти новые подходы и решения для повышения эффективности сельскохозяйственного производства. Учитывая разнообразие и противоречивость результатов, полученных в существующих исследованиях, требуются дополнительные научные изыскания, направленные на более глубокое понимание влияния фосфогипса на сохранение азота в процессе компостирования. Это необходимо для оценки потенциала этой доступной добавки в промышленном компостировании.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Hentati O. Caetano Phosphogypsum as a soil fertilizer: Ecotoxicity of amended soil and elutriates to bacteria, invertebrates, algae and plants / O. Hentati, N. Abrantes, A.L. Caetano [et al.] // *Journal of Hazardous Materials*. — 2015. — Vol. 294. — P. 80-89.
2. Li Y. Performance of phosphogypsum and calcium magnesium phosphate fertilizer for nitrogen conservation in pig manure composting / Y. Li, W. Luo, G. Li [et al.] // *Bioresource Technology*. — 2018. — Vol. 250. — P. 53-59
3. Peng X. The addition of biochar as a fertilizer supplement for the attenuation of potentially toxic elements in phosphogypsum-amended soil / X. Peng, Y. Deng, L. Liu [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. — 2020. — Vol. 277. — 124052
4. Blum J. Soil properties in a sugarcane plantation after the application of treated sewage effluent and phosphogypsum in Brazil / J. Blum, U. Herpin, A.J. Melfi [et al.] // *Agricultural Water Management*. — 2012. — Vol. 115. — P. 203-216
5. Degirmenci N. Application of phosphogypsum in soil stabilization / N. Degirmenci, A. Okucu, A. Turabi // *Building and Environment*. — 2007. — Vol. 42. — Iss. 9. — P. 3393-3398.

6. Bossolani J.W. Long term co-application of lime and phosphogypsum increases 15 N recovery and reduces 15 N losses by modulating soil nutrient availability, crop growth and N cycle genes / J.W. Bossolani, C.A. Costa Crusciol, E. Mariano [et al.] // *European Journal of Agronomy*. — 2023. — Vol. 149. — 126907
7. Attallah M.F. Environmental impact assessment of phosphate fertilizers and phosphogypsum waste: Elemental and radiological effects / M.F. Attallah, S.S. Metwally, S.I. Moussa [et al.] // *Microchemical Journal*. — 2019. — Vol. 146. — P. 789-797
8. Lim S.-S. Nitrogen, carbon, and dry matter losses during composting of livestock manure with two bulking agents as affected by co-amendments of phosphogypsum and zeolite / S.-S. Lim, H.-J. Park, X. Hao [et al.] // *Ecological Engineering*. — 2017. — Vol. 102. — P. 280-290
9. Монастырский Д.И. Изучение возможности использования фосфогипса как реагента для обработки отходов свиноплощадок / Д.И. Монастырский, О.А. Меденников, М.А. Куликова // *Известия Вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. — 2023. — №2. — DOI: 10.17213/1560-3644-2023-2-106-111
10. Carmeis Filho A.C.A. Lime and phosphogypsum impacts on soil organic matter pools in a tropical Oxisol under long-term no-till conditions / A.C.A. Carmeis Filho, C.J. Penn, C.A.C. Crusciol [et al.] // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. — 2017. — Vol. 241. — P. 11-23

Список литературы на английском языке / References in English

1. Hentati O. Caetano Phosphogypsum as a soil fertilizer: Ecotoxicity of amended soil and elutriates to bacteria, invertebrates, algae and plants / O. Hentati, N. Abrantes, A.L. Caetano [et al.] // *Journal of Hazardous Materials*. — 2015. — Vol. 294. — P. 80-89.
2. Li Y. Performance of phosphogypsum and calcium magnesium phosphate fertilizer for nitrogen conservation in pig manure composting / Y. Li, W. Luo, G. Li [et al.] // *Bioresource Technology*. — 2018. — Vol. 250. — P. 53-59
3. Peng X. The addition of biochar as a fertilizer supplement for the attenuation of potentially toxic elements in phosphogypsum-amended soil / X. Peng, Y. Deng, L. Liu [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. — 2020. — Vol. 277. — 124052
4. Blum J. Soil properties in a sugarcane plantation after the application of treated sewage effluent and phosphogypsum in Brazil / J. Blum, U. Herpin, A.J. Melfi [et al.] // *Agricultural Water Management*. — 2012. — Vol. 115. — P. 203-216
5. Degirmenci N. Application of phosphogypsum in soil stabilization / N. Degirmenci, A. Okucu, A. Turabi // *Building and Environment*. — 2007. — Vol. 42. — Iss. 9. — P. 3393-3398.
6. Bossolani J.W. Long term co-application of lime and phosphogypsum increases 15 N recovery and reduces 15 N losses by modulating soil nutrient availability, crop growth and N cycle genes / J.W. Bossolani, C.A. Costa Crusciol, E. Mariano [et al.] // *European Journal of Agronomy*. — 2023. — Vol. 149. — 126907
7. Attallah M.F. Environmental impact assessment of phosphate fertilizers and phosphogypsum waste: Elemental and radiological effects / M.F. Attallah, S.S. Metwally, S.I. Moussa [et al.] // *Microchemical Journal*. — 2019. — Vol. 146. — P. 789-797
8. Lim S.-S. Nitrogen, carbon, and dry matter losses during composting of livestock manure with two bulking agents as affected by co-amendments of phosphogypsum and zeolite / S.-S. Lim, H.-J. Park, X. Hao [et al.] // *Ecological Engineering*. — 2017. — Vol. 102. — P. 280-290
9. Монастырский Д.И. Изучение возможности использования фосфогипса как реагента для обработки отходов свиноплощадок [Study of the possibility of using phosphogypsum as a reagent for treatment of wastes of pig farms] / Д.И. Монастырский, О.А. Меденников, М.А. Куликова // *Известия Вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки* [Proceedings of the Universities. North Caucasian region. Technical sciences]. — 2023. — №2. — DOI: 10.17213/1560-3644-2023-2-106-111 [in Russian]
10. Carmeis Filho A.C.A. Lime and phosphogypsum impacts on soil organic matter pools in a tropical Oxisol under long-term no-till conditions / A.C.A. Carmeis Filho, C.J. Penn, C.A.C. Crusciol [et al.] // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. — 2017. — Vol. 241. — P. 11-23