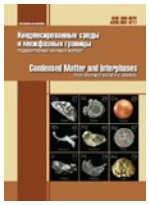

ISSN 1606-867X (Print)
ISSN 2687-0711 (Online)
Конденсированные среды и межфазные границы
https://journals.vsu.ru/kcmf/

Краткие сообщения

Краткое сообщение
УДК 538.9
https://doi.org/10.17308/kcmf.2026.28/13601
Научная специальность ВАК – 1.3.8. Физика конденсированного состояния

Кремний в карбоксиметилированной рисовой шелухе: исследование методами электронной микроскопии и фотоэлектронной спектроскопии

С. Ю. Турищев[1]✉, О. А. Чувенкова[1], С. С. Титова[1], К. А. Фатеев[1], С. Ю. Требунских[1], П. А. Черноносова[1], Д. З. Куреши[1], С. И. Сальков[1], С. В. Канныкин[1], Р. Г. Чумаков[2], Е. А. Шрамков[2], П. К. Пенской[3], М. С. Лавлинская[1], А. В. Сорокин[1], М. Г. Холявка[1]

[1]ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Университетская пл., 1, Воронеж 394018, Российская Федерация

[2]Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», пл. Академика Курчатова, 1, Москва 123182, Российская Федерация

[3]ФКОУ ВО «Воронежский институт Федеральной службы исполнения наказаний», ул. Иркутская, 1а, Воронеж 394072, Российская Федерация

Аннотация

Цель работы: Работа посвящена исследованиям морфологии и состава частиц, полученных из отходов рисового производства – карбоксиметилированной шелухи рисовых зерен, которая содержит в своем составе значительное для продуктов растениеводства количество кремния. Переработка отходов рисового производства, как правило, сопряжена с различными технологическими процессами, результатом которых могут быть изменения в составе конечного продукта, вплоть до полного удаления кремния. Актуальным вопросом для исследований и последующего промышленного использования является установление присутствия кремния в составе переработанной рисовой шелухи.

Экспериментальная часть: Предварительно измельченная рисовая шелуха подвергалась ультразвуковой обработке с последующим карбоксиметилированием. Материалы изучались методами растровой электронной микроскопии и энергодисперсионного микроанализа, а также рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Получены данные о морфологии частиц, формирующихся в результате переработки рисовой шелухи. Исследовано присутствие атомов кремния на поверхности и в объемной частиц продукта измельчения рисовой шелухи, а также после ее переработки.

Выводы: Растровая электронная микроскопия, энергодисперсионный микроанализ и рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия успешно применены для изучения продуктов переработки рисовой шелухи. Обработка включала измельчение, воздействие ультразвуком и карбоксиметилирование. Изучена морфология обработанных частиц с размерами до единиц и десятков микрометров. Установлено, что кремний входит в состав изученных объектов до и после обработки. На поверхности и в объемной части изученных материалов атомы кремния находятся в зарядовых состояниях от Si^0 до Si^{4+}. Обработка ультразвуком и последующее карбоксиметилирование не оказывают заметного влияния на наличие атомов кремния и их зарядовые состояния.

Ключевые слова: шелуха рисовых зерен, ультразвук, карбоксиметилирование, растровая электронная микроскопия, энергодисперсионный микроанализ, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, морфология и состав

Источник финансирования: Работа выполнена при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FZGU-2026-0009). Работа выполнена при поддержке Министерства науки и выс-

✉ Турищев Сергей Юрьевич, e-mail: tsu@phys.vsu.ru

© Турищев С. Ю., Чувенкова О. А., Титова С. С., Фатеев К. А., Требунских С. Ю., Черноносова П. А., Куреши Д. З., Сальков С. И., Канныкин С. В., Чумаков Р. Г., Шрамков Е. А., Пенской П. К., Лавлинская М. С., Сорокин А. В., Холявка М. Г., 2026

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

шего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2025-455) в части исследований методом РФЭС. Авторы благодарны поддержке Центра коллективного пользования научным оборудованием Воронежского государственного университета.

Для цитирования: Турищев С. Ю., Чувенкова О. А., Титова С. С., Фатеев К. А., Требунских С. Ю., Черноносова П. А., Куреши Д. З., Сальков С. И., Канныкин С. В., Чумаков Р. Г., Шрамков Е. А., Пенской П. К., Лавлинская М. С., Сорокин А. В., Холявка М. Г. Кремний в карбоксиметилированной рисовой шелухе: исследование методами электронной микроскопии и фотоэлектронной спектроскопии. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2026;28(3): 457–464. https://doi.org/10.17308/kcmf.2026.28/14224

Short communication

Short communication
https://doi.org/10.17308/kcmf.2026.28/13601

Silicon in carboxymethylated rice husk: electron microscopy and photoelectron spectroscopy studies

S. Yu. Turishchev[1]✉, O. A. Chuvenkova[1], S. S. Titova[1], K. A. Fateev[1], S. Yu. Trebunskikh[1], P. A. Chernonosova[1], D. Z. Kureshi[1], S. I. Salkov[1], S. V. Kannykin[1], R. G. Chumakov[2], E. A. Shramkov[2], P. K. Penskoy[3], M. S. Lavlinskaya[1], A. V. Sorokin[1], M. G. Holyavka[1]

[1]*Voronezh State University,*
1, Universitetskaya pl., Voronezh 394018, Russian Federation

[2]*National Research Center «Kurchatov Institute»,*
1, Akademika Kurchatova pl., Moscow 123182, Russian Federation

[3]*Voronezh institute of the Russian Federal Penitentiary Service,*
1a, Irkutskaya st., Voronezh 394072, Russian Federation

Abstract

Objectives: The work is dedicated to studies of the morphology and composition of particles obtained from rice production waste – carboxymethylated husk of rice grains, which contains a significant amount of silicon for crop products. The processing of rice production waste, as a rule, involves various technological processes, which may result in the composition changes of the final product up to the complete removal of silicon. An important task for research and subsequent industrial use is to establish the presence of silicon in the composition of processed rice husks.

Experimental: The preliminary milled rice husk was subjected to ultrasonic treatment followed by carboxymethylation. The materials were studied using scanning electron microscopy and energy dispersive microanalysis as well as X-ray photoelectron spectroscopy. Data on the morphology of particles formed as a result of processing rice husks have been obtained. The presence of silicon atoms on the particle's surface and in the bulk of the rice husk milling product, as well as after its processing, has been investigated.

Conclusions: Scanning electron microscopy, energy dispersion microanalysis and X-ray photoelectron spectroscopy have been successfully applied to study rice husk processing products. The treatment included milling, ultrasound exposure and carboxymethylation. The morphology of the treated particles with sizes up to units and tens of micrometers has been studied. Silicon was detected in the studied objects both before and after processing. On the surface and within the bulk of the materials, silicon atoms were found in charge states ranging from Si^0 to Si^{4+}. Neither ultrasonic treatment nor subsequent carboxymethylation had any noticeable effect on the presence of silicon atoms or their charge states.

Keywords: Rice grain husks, Ultrasound, carboxymethylation, Scanning electron microscopy, energy dispersion microanalysis, X-ray photoelectron spectroscopy, Morphology and composition

Funding: The study was supported by the grant of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project FZGU-2026-0009). The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (agreement 075-15-2025-455) in part of XPS studies. Authors acknowledge the support of the Center for the Collective Use of Scientific Equipment of Voronezh State University.

For citation: Turishchev S. Yu., Chuvenkova O. A., Titova S. S., Fateev K. A., Trebunskikh S. Yu., Chernonosova P. A., Kureshi D. Z., Salkov S. I., Kannykin S. V., Chumakov R. G., Shramkov E. A., Penskoy P. K., Lavlinskaya M. S., Sorokin A. V., Holyavka M. G. Silicon in carboxymethylated rice husk: electron microscopy and photoelectron spectroscopy studies. *Condensed Matter and Interphases*. 2026;28(3): 457–464. https://doi.org/10.17308/kcmf.2026.28/14224

✉ Sergey Yu. Turishchev, e-mail: tsu@phys.vsu.ru

© Turishchev S. Yu., Chuvenkova O. A., Titova S. S., Fateev K. A., Trebunskikh S. Yu., Chernonosova P. A., Kureshi D. Z., Salkov S. I., Kannykin S. V., Chumakov R. G., Shramkov E. A., Penskoy P. K., Lavlinskaya M. S., Sorokin A. V., Holyavka M. G., 2026

Введение

Отходы сельскохозяйственного растениеводства находят применение в различных современных технологиях, и производство риса не является исключением. Известно, что шелуха рисовых зерен, которая является одним из основных компонентов отходов возделывания риса, богата кремнием [1–2]. В научной литературе представлены многочисленные исследования, которые посвящены физико-химической природе кремния в рисовой шелухе, а также разнообразным способам ее применения [1–5]. Одними из наиболее перспективных направлений применения рисовой шелухи и продуктов ее переработки является синтез композиционных суперабсорбентов [6] – гидрофильных полимерных материалов, способных поглощать и удерживать воду в количествах, в сотни раз превосходящих собственную массу полимера, а также выделение кремния для нужд микроэлектронной промышленности [7].

Сегодня в основе различных подходов переработки рисовой шелухи лежат физические или химические способы ее модификации, а также их различные сочетания. Эти подходы, как правило, приводят к изменению морфологии, структуры и состава этого сырья. Например, при механическом измельчении или гидрофилизации путем введения карбоксиметильных групп в состав полисахаридной фракции мелкодисперсного сырья, получаемого из рисовой шелухи. В связи с этим, актуальным вопросом остается анализ содержания кремния в модифицированном материале, возможных физико-химических изменений в окружении его атомов в процессе переработки.

Растровая электронная микроскопия (РЭМ) в комбинации с энергодисперсионным микроанализом (МА) является одним из наиболее универсальных подходов к изучению морфологии и элементного состава микроструктур, в том числе природного происхождения [5, 8–10]. Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС) является высокоточным методом установления физико-химического состояния поверхности материалов, чувствительным к локальному окружению атомов заданного сорта [11–13].

В настоящей работе представлены результаты исследований морфологии частиц, формирующихся в результате измельчения и карбоксиметилирования рисовой шелухи. Исследовано присутствие атомов кремния на поверхности и в объеме частиц продукта измельчения рисовой шелухи, а также после ее карбоксиметилирования.

Экспериментальная часть

В работе использована рисовая шелуха, измельченная в шаровой мельнице до размера частиц не более 1000 мкм (образец «Init»). Образец карбоксиметилированной шелухи («Treat») получали по следующей методике: 3 г рисовой шелухи диспергировали в 20 мл 10 % водного раствора NaOH в течение часа, далее вносили 40 мл 20 % раствора натриевой соли монохлоруксусной кислоты (>98 %) в этиловом спирте. Полученную смесь подвергали воздействию ультразвука в течение 40 минут с использованием диспергатора УЗГ13-0.1/22 при заявляемой мощности 0.1 кВт. После обработки в ультразвуке реакционную массу выдерживали при комнатной температуре в течение 8 часов. Целевой продукт выделяли центрифугированием (5000 об/мин, 5 минут), промывали водно-спиртовым раствором до нейтрального значения pH и сушили в вакуумном сушильном шкафу при 45 °C до постоянной массы.

Использовался растровый электронный микроскоп JEOL JSM-6510LV, оснащенный приставкой для энергодисперсионного микроанализа. Применялся режим регистрации вторичных электронов. Для оценки размеров частиц после измельчения использовался программный пакет Image J. Были получены данные энергодисперсионного микроанализа от характерных участков изученных материалов диаметром ~ 10 мкм при оценке глубины зондируемого слоя не менее 1 мкм.

Данные РФЭС были получены на модуле ЭСХА сверхвысоковакуумной экспериментальной станции НАНОФЭС синхротрона «Курчатов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (Москва), оснащенном полусферическим анализатором энергий электронов SPECS Phoibos 150 и монохроматизированным источником рентгеновского излучения (Al Ka, 1486.61 эВ) [14]. Глубина информативного слоя составила ~ 2–3 нм [15]. Были зарегистрированы обзорные спектры в диапазоне энергий связи 0–1000 эВ. Для нормализации и калибровки данных был использован стандартный подход, основанный на независимой регистрации сигнала чистой золотой фольги (Au 4*f*). Для идентификации особенностей обзорных спектров использовались известные базы данных, из которых были выбраны наиболее актуальные данные [15–17]. Для оценки подобранных компонент зарегистрированных РФЭС спектров высокого разрешения (разложение на составляю-

щие было выполнено с помощью функций Лоренца и Гаусса) использовали стандартную процедуру удаления спектрального фона Ширли [11]. В экспериментах РФЭС для *in situ* удаления верхних слоев поверхности изучаемых материалов использовался фокусированный источник травления ионами аргона, который применялся в принятом для образцов природного происхождения «мягком» режиме. Ускоряющее ионы напряжение составляло 1 кВ с аккумулируемой длительностью травления 35 минут, что привело к удалению слоя поверхности с толщиной не менее 50 нм. Площадь участка травления выбиралась с превышением области поверхности, от которой регистрировались данные РФЭС.

Результаты и обсуждение

Изображение поверхности фрагмента нативной измельчаемой шелухи рисового зерна приведено на рис. 1a, а результат измельчения на рис. 1b. Итогом измельчения является фрагментирование элементов исходного биосырья на отдельные частицы, размером ~ 100 мкм и составляющие образец «Init». Поверхность таких частиц не сохраняет присущую исходному материалу упорядоченную макроструктуру в виде регулярных последовательностей в форме «наростов» размером ~50 мкм, разделенных бороздами в 10–25 мкм. Элементы морфологии поверхности частиц после измельчения (рис. 1b, образец «Init») хаотичны и размыты.

Результаты РЭМ для материала после обработки в ультразвуке и введения карбоксиметильных групп приведены на рис. 1c (образец «Treat»). Заметно, что выбранный способ обработки приводит к еще более заметной и существенной фрагментации, формированию частиц с размерами существенно меньшими, чем в исходном материале. Многочисленные частицы имеют размеры менее 10 мкм и могут собираться в агломерации. Оценка количества частиц, составляющих обработанный материал («Treat») и их размеров (максимальная длина), приведена на рис. 1d и подтверждает измельчение обрабатываемого материала с образованием значительного количества микрочастиц размерами 10-20 мкм, и, возможно, менее. В элементном составе (ат. %) исходного и обработанного материала (рис. 1e) установлено одинаковое содержание атомов кремния. Присутствие атомов натрия (и в малой степени хлора) является результатом химической модификации – образования натриевой соли продукта карбоксиметилирования рисовой шелухи, а также наличия остаточных количеств модифицирующего агента – натрий хлорацетата.

Таким образом, карбоксиметилирование не приводит к значительному удалению атомов кремния из образующихся частиц. В то же вре-

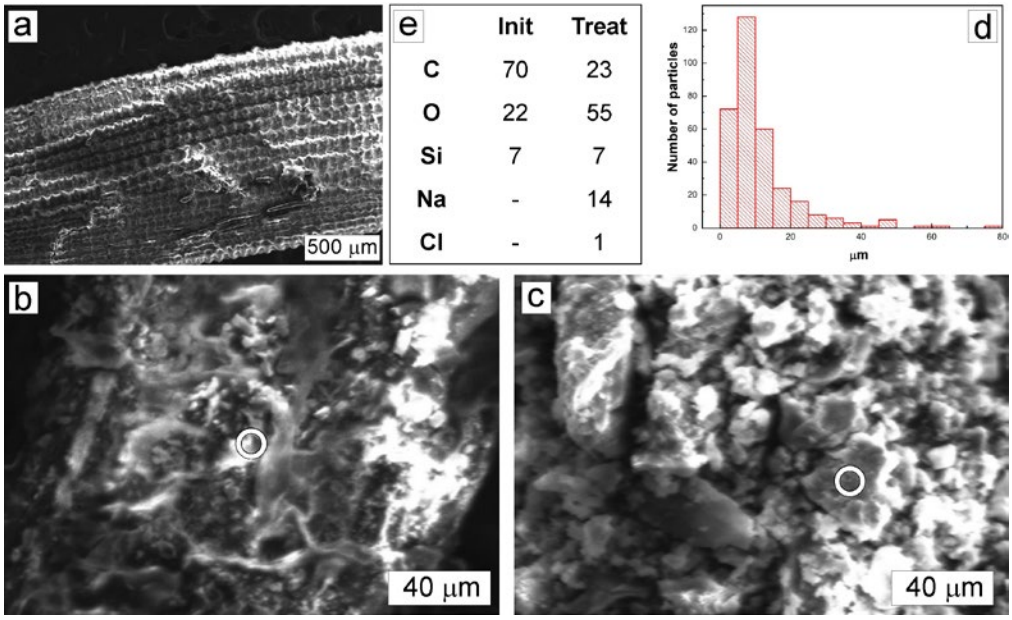

Рис. 1. Морфология частиц, сформированных из рисовой шелухи в результате измельчения и карбоксиметилирования. a: фрагмент нативной рисовой шелухи; b: измельченная рисовая шелуха («Init»); c: карбоксиметилированная рисовая шелуха («Treat»); d: оценка количества и размеров частиц образца «Treat» после карбоксиметилирования; e: состав изученных частиц по данным МА (ат. %), область получения данных МА выделена окружностью

мя очевидно, что специфика локального окружения атомов кремния в слоях поверхности и в «объемной» части изучаемого материала могут отличаться. Более того, показанная степень фрагментации материала при обработке говорит о заметном увеличении вклада поверхности в свойства получаемого материала. Для установления физико-химического состояния поверхности и приповерхностных слоев изучаемых материалов, установления характера локального окружения атомов кремния, влияющего на их зарядовое состояние, использовался метод РФЭС.

На рис. 2а приведены обзорные спектры РФЭС образцов «Init» и «Treat», содержащие все

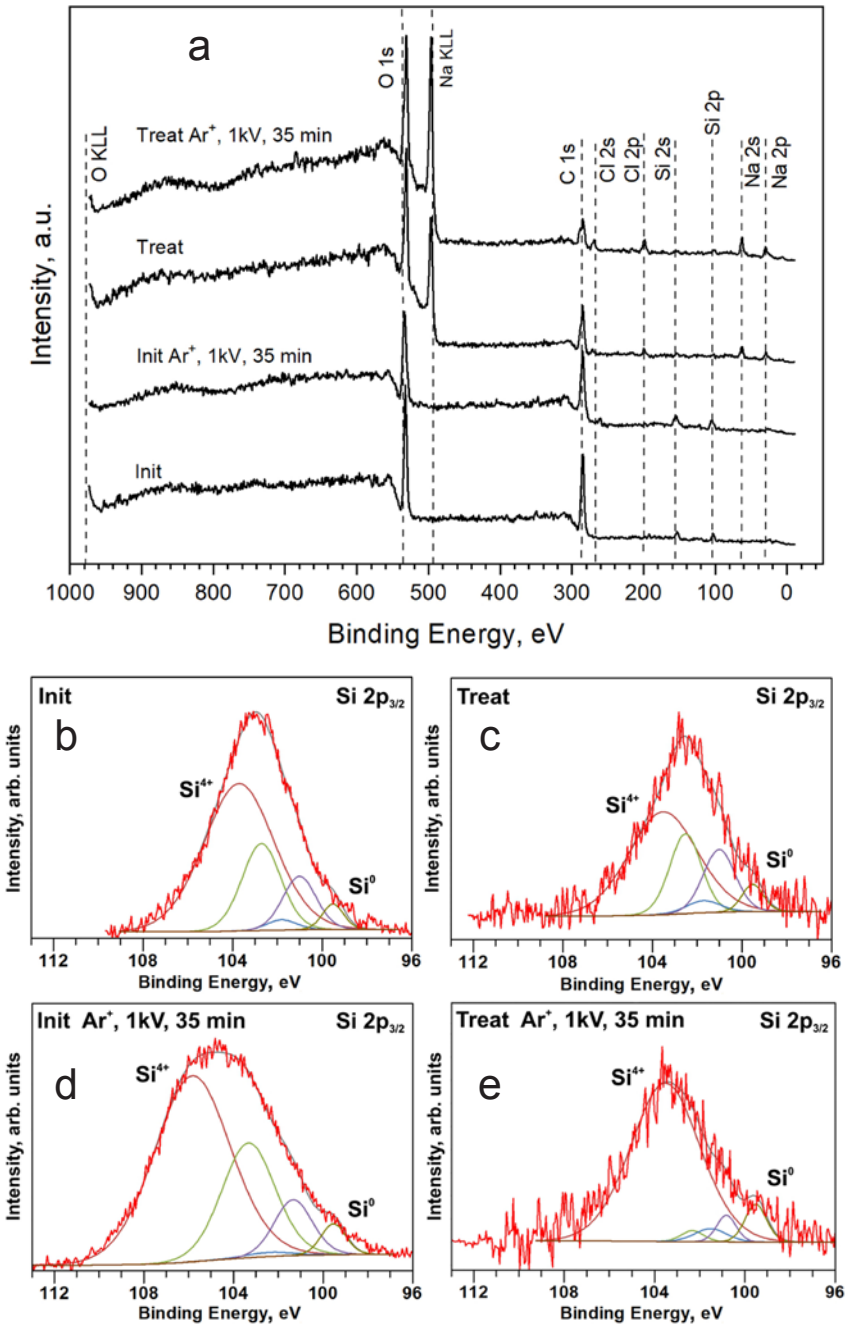

Рис. 2. РФЭС частиц, сформированных из рисовой шелухи в результате измельчения и карбоксиметилирования. a: обзорные спектры; b и d: Si 2*p* спектры и их моделирование для частиц после измельчения, до и после ионного травления соответственно; c и e: Si 2*p* спектры и их моделирование для частиц после измельчения и карбоксиметилирования, до и после ионного травления соответственно

характерные особенности, в том числе после удаления слоя поверхности в результате *in situ* обработки (травления) ионным пучком. К характерным относятся линии «легких» атомов кислорода и углерода, как результат природного происхождения изучаемых объектов. А характерные линии натрия и хлора являются результатом химической модификации измельченных частиц. Исходный материал (образец «Init») также содержит сигнал от атомов кремния. Наблюдение линий Si 2*s* и Si 2*p* при энергиях связи ~150 эВ и ~100 эВ соответственно (рис. 2), независимо от метода МА, подтверждает заметное наличие атомов кремния в составе поверхности изученного объекта. Для образца «Treat» сигнал в области указанных линий атомов кремния наблюдался на крайне низких интенсивностях в обзорных спектрах, что говорит, вероятно, о дополнительном покрытии поверхности в результате выбранного способа обработки. Тем не менее, для обоих изученных материалов была предпринята попытка регистрации спектров линии Si 2*p* с высоким разрешением для установления тех зарядовых состояний, в которых находятся атомы кремния. Малое количество атомов кремния привело к значительному уширению регистрируемых спектральных линий. Для разложения спектров на компоненты, соответствующие атомам кремния в зарядовых состояниях от Si^0 до Si^{4+}, нами использовалась методика учета спин-орбитального расщепления основного уровня Si 2*p*, описанная ранее и продемонстрировавшая свое применение [18, 19]. Данная методика подразумевает выделение Si 2*p*3/2-части экспериментального спектра для уточнения энергетических положений составляющих сложной РФЭС линии при ее разложении на компоненты. На рис. 2 b-е приведены спектры высокого разрешения и результаты их моделирования. Несмотря на существенное уширение спектральных линий, представляется возможным, на качественном уровне, выделить характерные особенности тонкой структуры 2*p* спектров кремния, соответствующие атомам в зарядовых состояниях Si^0 и Si^{4+}. Именно эти состояния считаются наиболее стабильными, в том числе при длительном хранении в лабораторных условиях продуктов обработки рисовой шелухи [4, 5]. Основной вклад в состав изученных материалов вносят атомы кремния в состоянии Si^{4+} вне зависимости от условий обработки. Наиболее заметное уширение спектральной Si 2*p* линии для образца «Init» после ионного травления связано с дополнительной зарядкой поверхности в результате подобного воздействия на объект со сложной морфологией. Наконец, набор компонент разложения зарегистрированных спектров позволяет говорить и о возможном наличии атомов кремния в «промежуточных» зарядовых состояниях Si^{1+}, Si^{2+} и Si^{3+}, также ранее наблюдавшихся [4] при различных способах обработки шелухи рисовых зерен.

Выводы

Комбинация методов растровой электронной микроскопии, энергодисперсионного микроанализа и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии продемонстрировала эффективность в применении к продуктам переработки рисовой шелухи в том числе, после воздействия ультразвуком и карбоксиметилирования. Предложенный способ обработки позволяет получить размеры частиц до единиц и десятков микрометров. Показан вклад атомов кремния в состав изученных объектов. Установлено, что атомы кремния находятся на поверхности и в объемной части изученных материалов в зарядовых состояниях от Si^0 до Si^{4+}. Обработка ультразвуком и последующее карбоксиметилирование не оказывают заметного влияния на наличие атомов кремния и их зарядовые состояния в целом, что может быть использовано в рамках предложенного подхода к переработке отходов рисового производства для получения функциональных материалов на основе сырья природного происхождения – рисовой шелухи.

Заявленный вклад авторов

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Список литературы

1. Yoshida S., Onishi, Y., Kitagishi, K. The chemical nature of silicon in rice plant. *Soil Science and Plant Nutrition*. 1959;5(1): 23-27. https://doi.org/10.1080/00380768.1959.10430890

2. Ma J. F., Yamaji N., Mitani N., ... Yano M. An efflux transporter of silicon in rice. *Nature*. 2007;488:209-212. https://doi.org/10.1038/nature05964

3. Krishnarao R. V., Godkhindi M. M. Distribution of silica in rice husks and its effect on the formation of silicon carbide. *Ceramics International*. 1992;18(4): 243–249. https://doi.org/10.1016/0272-8842(92)90102-J

4. Sun M., Xu Z., Liu K., …, Chen L. Construction of rice husk-derived SiO_x nanoparticles encapsulated with graphene aerogel hybrid for high-performance lithium ion batteries. *Electrochimica Acta*. 2022;422: 140572. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2022.140572

5. Trinh T. Q., Mai L. T., Le D. H., Bon V., …, Cuniberti G. Morphological characteristics of silica nanoparticles derived from rice husk for expected agricultural application. *Ceramics International*. 2024;50(21): 42072–42080. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.08.050

6. Сорокин А. В., Скорлуханова А. В., Циммер Е. М., Лавлинская М. С. Перспективы применения продуктов переработки рисовой шелухи в синтезе композиционных суперабсорбирующих материалов. *Химия растительного сырья*. 2025;4: 121–131. https://doi.org/10.14258/jcprm.20250416512

7. Hamidu I., Afotey B., Kwakye-Awuah B., Anang D. A. Synthesis of silica and silicon from rice husk feedstock: a review. *Heliyon*. 2025;11(4): e42491. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42491

8. Perrett S., Buell A. K., Knowles T. P. J. (ed.). *Biological and bio-inspired nanomaterials. properties and assembly mechanisms*. Singapore: Springer. 2019. 440 p. https://doi.org/10.1007/978-981-13-9791-2

9. Turishchev S. Yu., Marchenko D., Sivakov V., …, Antipov S. S. On the possibility of photoemission electron microscopy for E. coli advanced studies. *Results in Physics*. 2020;16: 102821 -1 -3. https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.102821

10. Турищев С. Ю., Беликов Е. А., Паринова Е. В., …, Антипов С. С. Клетки E. coli как источник биогибридного материала: исследование методами электронной микроскопии и микроанализа. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2026;28(1): 153–158. https://doi.org/10.17308/kcmf.2026.28/13601

11. Hufner S. Very *High resolution photoelectron spectroscopy lect. Notes Phys.* Berlin: Springer; 2007. 410 p.

12. Shchukarev A., Ramstedt M. Cryo-XPS: probing intact interfaces in nature and life. *Surface and Interface Analysis*. 2017;49: 349–356. https://doi.org/10.1002/sia.6025

13. Паринова Е. В., Антипов С. С., Беликов Е. А., …, Турищев С. Ю. Исследования био-наногибридного материала на основе бактериального ферритин-подобного белка Dps методами ПЭМ и РФЭС. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2022;24(2): 265–272. https://doi.org/10.17308/kcmf.2022.24/9267

14. Lebedev A. M., Menshikov K. A., Nazin, V. G., …, Chumakov R. G. NanoPES photoelectron beamline of the Kurchatov Synchrotron Radiation Source. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2021;15(5): 1039–1044. https://doi.org/10.1134/S1027451021050335

15. Moulder J. F., Stickle W. F., Sobol P. E., Bomben K. D. *Handbook of X-ray photoelectron spectroscopy*. Chastain J. (ed). Minnesota: Perkin-Elmer Corporation Physical Electronics Division; 1992. 261 p.

16. NIST X-ray photoelectron spectroscopy database. URL: https://srdata.nist.gov/xps

17. Crist B. V. *Handbooks of monochromatic XPS Spectra*. *Vol. 1: The Elements and Native Oxide*. XPS International, Inc.; 1999.

18. Himpsel F. J., McFeely F. R., Taleb-Ibrahimi A., Yarmoff J. A. Microscopic structure of the SiO_2/Si interface. *Physical Review B*. 1988; 38: 6084. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.38.6084

19. Бойков Н. И., Чувенкова О. А., Паринова Е. В., …, Турищев С. Ю. Электронное строение и субструктура эпитаксиальных нанослоев олова на кремнии по данным синхротронных исследований. *Поверхность. Рентгеновские синхротронные и нейтронные исследования*. 2025;8: 109-124. https://doi.org/10.7868/S3034573125080124

Информация об авторах

Турищев Сергей Юрьевич, д. ф.-м. н., доцент, заведующий кафедрой общей физики и физического материаловедения, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

https://orcid.org/0000-0003-3320-1979

tsu@phys.vsu.ru

Чувенкова Ольга Александровна, к.ф.-м.н., с.н.с., совместная научно-образовательная лаборатория «Атомное и электронное строение функциональных материалов» Воронежского государственного университета и Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

https://orcid.org/0000-0001-5701-6909

chuvenkova@phys.vsu.ru

Титова София Сергеевна, преподаватель кафедры общей физики и физического материаловедения, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

https://orcid.org/0000-0001-6860-401X

titova@phys.vsu.ru

Фатеев Кирилл Александрович, м.н.с., совместная научно-образовательная лаборатория «Атомное и электронное строение функциональных материалов» Воронежского государственного университета и Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

https://orcid.org/0009-0005-5352-9594

fateev@phys.vsu.ru

Требунских Сергей Юрьевич, к. ф.-м. н., доцент кафедры общей физики и физического материаловедения, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

trebunskikh@phys.vsu.ru

Черноносова Полина Андреевна, студент кафедры общей физики и физического материаловедения, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

chernonosova@phys.vsu.ru

Куреши Дэниэль Зафарович, студент кафедры общей физики и физического материаловедения, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

kureshi@phys.vsu.ru

Сальков Семен Игоревич, студент кафедры общей физики и физического материаловедения, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

salkov@phys.vsu.ru

Канныкин Сергей Владимирович, к. ф.-м. н., доцент кафедры материаловедения и индустрии наносистем, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

https://orcid.org/0000-0001-8756-5722

svkannykin@gmail.com

Чумаков Ратибор Григорьевич, к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (Москва, Российская Федерация).

https://orcid.org/0000-0002-3737-5012

ratibor.chumakov@gmail.com

Шрамков Егор Александрович, м.н.с., Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (Москва, Российская Федерация).

https://orcid.org/0009-0000-5241-4932

egor@shramkov.ru

Пенской Петр Константинович, к. х. н., начальник организационно-научного и редакционного отдела, Воронежский институт Федеральной службы исполнения наказаний (Воронеж, Российская Федерация).

https://orcid.org/0009-0007-5696-3083

print2prn@yandex.ru

Лавлинская Мария Сергеевна, к.х.н., с.н.с. кафедры биофизики и биотехнологии, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

https://orcid.org/0000-0001-9058-027X

maria.lavlinskaya@gmail.com

Сорокин Андрей Викторович, к.б.н., с.н.с. кафедры биофизики и биотехнологии, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

https://orcid.org/0000-0001-5268-9557

andrew.v.sorokin@gmail.com

Холявка Марина Геннадьевна, д.б.н., профессор кафедры биофизики и биотехнологии, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

https://orcid.org/0000-0002-1390-4119

holyavka@rambler.ru

Поступила в редакцию 20.03.2026; одобрена после рецензирования 10.04.2026; принята к публикации 17.04.2026; опубликована онлайн 25.09.2026.