

## DEVELOPMENT OF A METHOD FOR OBTAINING SODIUM ALUMINOSILICATE FROM RICE HUSK AND INVESTIGATION OF ITS SORPTION PROPERTIES

*M.Tolegenkyzy*<sup>1</sup>, *R.A.Narmanova*<sup>1</sup>, *A.Serikkul*<sup>2</sup>, *G.S.Dairbekova*<sup>2</sup>, *N.A.Akhatayev*<sup>1</sup>,  
*K.Kh.Darmagambet*<sup>1</sup>, *B.A.Abzhalelov*<sup>1</sup>, *E.A.Nazarov*<sup>1</sup>, *N.O.Appazov*<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>*Korkyt Ata Kyzylorda University, Kyzylorda, Kazakhstan*

<sup>2</sup>*Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan*

\*Corresponding author e-mail: [nurasar.82@korkyt.kz](mailto:nurasar.82@korkyt.kz)

**Abstract.** This study focuses on increasing the value of large-scale agricultural waste – rice husk – considered a silicon-rich renewable resource for the production of functional materials. Special attention is given to the synthesis of sodium aluminosilicate, which serves as an efficient sorbent for the purification of natural and industrial wastewater from heavy metal ions and organic pollutants. The proposed method begins with the preparation of sodium silicate by microwave treatment of a mixture containing 10 g of ground, washed, and air-dried rice husk and 130 mL of 1 M NaOH solution. The obtained sodium silicate solution is then mixed with 50 mL of saturated aluminum sulfate solution under continuous stirring. As a result, sodium aluminosilicate is formed and precipitates out of the solution. Filtration, washing, and thermal treatment of the precipitate at various temperatures yield sorbents with high specific surface area and a well-developed porous structure. This approach not only ensures the efficient utilization of difficult-to-recycle agricultural waste but is also environmentally friendly and resource-efficient. The synthesized aluminosilicates demonstrate excellent sorption capacity, making them promising for use in water treatment systems, industrial emission control, and the development of selective adsorbents.

**Keywords:** rice husk, sodium silicate, sodium aluminosilicate, adsorption, adsorbent

<i>Tolegenkyzy Meruyert</i>	<i>Master of Technical Sciences; E-mail: meruert.tolegenkyzy22@gmail.com</i>
<i>Narmanova Roza Abdibekovna</i>	<i>Candidate of technical sciences, Associate Professor; E-mail: roza_an@mail.ru</i>
<i>Serikkul Anel</i>	<i>Doctoral student; E-mail: nelliness@mail.ru</i>
<i>Dairbekova Guldana Siyundikovna</i>	<i>PhD; E-mail: guldina.shudabay@mail.ru</i>
<i>Akhatayev Nurlybek Akarystanuly</i>	<i>Candidate of Chemical Sciences; E-mail: nurlibek.83@mail.ru</i>
<i>Darmagambet Klara Khairullova</i>	<i>Candidate of Chemical Sciences; E-mail: darmklara@mail.ru</i>
<i>Abzhalelov Bakhytbek Baidosovich</i>	<i>Candidate of Biological Sciences; E-mail: bakhytbek@korkyt.kz</i>

**Citation:** Tolegenkyzy M., Narmanova R.A., Serikkul A., Dairbekova G.S., Akhatayev N.A., Darmagambet K.Kh., Abzhalelov B.A., Nazarov E.A., Appazov N.O. Development of a method for obtaining sodium aluminosilicate from rice husk and investigation of its sorption properties. *Chem. J. Kaz.*, 2025, 4(92), 107-116. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.51580/2025-4.2710-1185.54>

<i>Nazarov Esenzhol Asylbekuly</i>	<i>Candidate of Technical Sciences; E-mail: nazarov_e@korkyt.kz</i>
<i>Appazov Nurbol Orynbasaruly</i>	<i>Candidate of Chemical sciences, professor; E-mail: nurasar.82@korkyt.kz</i>

## РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПОЛУЧЕНИЯ АЛМОСИЛИКАТА НАТРИЯ ИЗ РИСОВОЙ ШЕЛУХИ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕГО СОРБЦИОННЫХ СВОЙСТВ

*М.Толегенкызы*<sup>2</sup>, *Р.А.Нарманова*<sup>1</sup>, *А.Сериккул*<sup>2</sup>, *Г.С.Даирбекова*<sup>2</sup>, *Н.А.Ахатаев*<sup>1</sup>,  
*К.Х.Дармагамбет*<sup>1</sup>, *Б.А.Абжалелов*<sup>1</sup>, *Е.А.Назаров*<sup>1</sup>, *Н.О.Аппазов*<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> НАО «Кызылординский университет имени Коркыт Ата», Кызылорда, Казахстан

<sup>2</sup> Карагандинский Индустриальный Университет, Темиртау, Казахстан

**Резюме.** Данное исследование направлено на повышение ценности крупномасштабных сельскохозяйственных отходов – рисовой шелухи, которая рассматривается как богатое кремнием возобновляемое сырьё для получения функциональных материалов. Особое внимание уделено синтезу алюмосиликата натрия, применяемого в качестве эффективного сорбента для очистки природных и промышленных сточных вод от ионов тяжёлых металлов и органических загрязнителей. Предложенный способ включает получение силиката натрия путём микроволновой обработки смеси, содержащей 10 г измельчённой, промытой и высушенной рисовой шелухи и 130 мл 1 М раствора NaOH. Полученный раствор силиката натрия смешивают с 50 мл насыщенного раствора сульфата алюминия при постоянном перемешивании. В результате протекает реакция образования алюмосиликата натрия с выпадением осадка. Последующая фильтрация, промывка и термообработка осадка при различных температурах позволяют получить сорбенты с высокой удельной поверхностью и развитой пористой структурой. Разработанный метод не только обеспечивает эффективное использование трудноутилизируемых отходов, но и является экологически безопасным и ресурсосберегающим. Полученные алюмосиликаты демонстрируют высокую сорбционную способность, что открывает возможности их применения в системах водоподготовки, очистке промышленных выбросов и создании селективных адсорбентов.

**Ключевые слова:** рисовая шелуха, силикат натрия, алюмосиликат натрия, адсорбция, адсорбент

<i>Толегенкызы Меруерт</i>	<i>магистр технических наук</i>
<i>Нарманова Роза Абдибековна</i>	<i>кандидат технических наук, доцент</i>
<i>Сериккул Анель</i>	<i>докторант</i>
<i>Даирбекова Гулдана Сиюндыковна</i>	<i>PhD</i>
<i>Ахатаев Нурлыбек Акарыстанулы</i>	<i>кандидат химических наук</i>
<i>Дармагамбет Клара Хайроллакызы</i>	<i>кандидат химических наук</i>
<i>Абжалелов Бакытбек Байдосулы</i>	<i>кандидат биологических наук</i>
<i>Назаров Есенжол Асылбекулы</i>	<i>кандидат технических наук</i>
<i>Аппазов Нурбол Орынбасарулы</i>	<i>кандидат химических наук, профессор</i>

## 1. Введение

Рис – важнейшая продовольственная культура и основной источник углеводов. При его переработке образуется до 20 % побочного продукта – рисовой шелухи, мировой объём которой достигает 200 млн т в год [1,2]. Благодаря содержанию 20 % SiO<sub>2</sub> и 30–50 % органического углерода [3]

шелуха устойчива к биодegradации и перспективна как сырьё для адсорбентов.

Использование шелухи как топлива ограничено низкой теплотворной способностью и затратами на сбор. В производстве шин и цемента востребован кремнезём, а органическая фракция остаётся неиспользованной. Сжигание шелухи выделяет CO, ЛОС и канцерогенные ПАУ, нанося вред экологии и здоровью [4,5]. Эффективная утилизация этой биомассы – актуальная задача стран-производителей риса.

Разрабатываются «зелёные» методы переработки шелухи для получения ценных продуктов: кремнезёма, активированного угля, биочара, целлюлозы [6–9]. Особый интерес представляют алюмосиликаты – пористые соединения алюминатов и силикатов, применяемые в адсорбции, катализе, пиролизе. Их свойства зависят от метода синтеза [10], а синтетические образцы стабильнее и чище природных аналогов [12,13].

Сельхозотходы кремнийнакапливающих культур, включая рис, рассматриваются как сырьё для синтеза алюмосиликатов. Основной способ утилизации отходов – сжигание, при котором образуется зола, богатая SiO<sub>2</sub> [19,20]. Получение алюмосиликатов из растительного сырья пока малоизучено, хотя они могут служить селективными сорбентами [12,15].

Алюмосиликаты используются как сорбенты, носители катализаторов, ионообменники, применяются при разделении газов и детоксикации кормов [10,16–18]. Композиты на их основе служат сенсорами CO<sub>2</sub> [10]. Их кислотно-основные свойства определяют реакционную способность и сорбционную ёмкость по отношению к тяжёлым металлам и красителям [12].

Показано, что наноструктурированный аморфный алюмосиликат натрия с удельной поверхностью 364 м<sup>2</sup>/г можно получить щелочным гидролизом рисовой соломы [2]. Описан синтез алюмосиликатов с Si/Al = 1–5 в многокомпонентной системе и их высокая сорбция Cs<sup>+</sup> [24].

## 2. Экспериментальная часть

Целью данного исследования являлась разработка способа получения адсорбента на основе алюмосиликата натрия для очистки природных и сточных вод. Метод заключался в смешивании 50 мл насыщенного раствора сульфата алюминия с раствором силиката натрия, полученным микроволновой обработкой смеси 130 мл 1 М NaOH и 10 г измельчённой, промытой и высушенной рисовой шелухи. В результате образовывался осадок, который после термической обработки при различных температурах превращался в сорбент с разными адсорбционными характеристиками.

Рисовую шелуху промывали дистиллированной водой, сушили при 105 °С 2 ч и измельчали в порошок. Навеску 10 г смешивали со 130 мл 1 М NaOH и обрабатывали в микроволновке при 900 Вт 10 мин с перемешиванием. После охлаждения смесь фильтровали под вакуумом,

фильтрат с силикатом натрия обрабатывали 50 мл раствора сульфата алюминия, образуя светло-коричневый осадок.

Осадок фильтровали, промывали до нейтральной реакции и сушили. Для подбора оптимальных условий проводили прокалку при 150–800 °С в течение 1 ч (скорость нагрева 10 °С/мин) в муфельной печи. Полученные образцы отличались цветом и сорбционными свойствами (рисунок 1).



**Рисунок 1** – Образцы сорбентов алюмосиликата натрия, полученных из рисовой шелухи

Адсорбционную активность полученного адсорбента на основе алюмосиликата натрия из рисовой шелухи оценивали по ёмкости адсорбции йода. Адсорбционную активность образцов сорбентов по йоду определяли в соответствии с ГОСТ 6217-74.

Рентгенофазовый анализ (РФА) синтезированных сорбентов проводили на дифрактометре Rigaku SmartLab SE с Cu K $\alpha$ -излучением ( $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$ ) при напряжении 40 кВ и силе тока 50 мА. Дифрактограммы регистрировали в диапазоне углов  $2\theta$  от 5° до 80° с шагом сканирования 0,001° и скоростью сканирования 2°/мин.

Элементный анализ проводили на рентгенофлуоресцентном спектрометре Rigaku NEX GG (Япония). Данный метод позволяет точно определить содержание различных элементов в адсорбенте, что необходимо для оценки его структуры и свойств.

ИК-спектры с преобразованием Фурье (Фурье) регистрировали на спектрометре Shimadzu IR-Prestige 21 (Япония) в диапазоне длин волн 400–4000 см<sup>-1</sup> без специальной подготовки образцов с использованием приставки нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) Smiths DuraSample II с призмой однократного отражения из алмаза/ZnSe (США).

Морфологию поверхности сорбента исследовали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с использованием микроскопа JEOL JSM-6390LV.

### 3. Результаты и обсуждение.

Исследование показало, что натрийалюмосиликатный адсорбент из рисовой шелухи эффективно поглощает йод из растворов. При 150–700 °С адсорбционная активность достигает 81,2%, но при 750–800 °С снижается. Эти результаты подтверждают его перспективность для очистки природных и сточных вод от загрязнителей. Данные по адсорбции йода приведены в таблице 1.

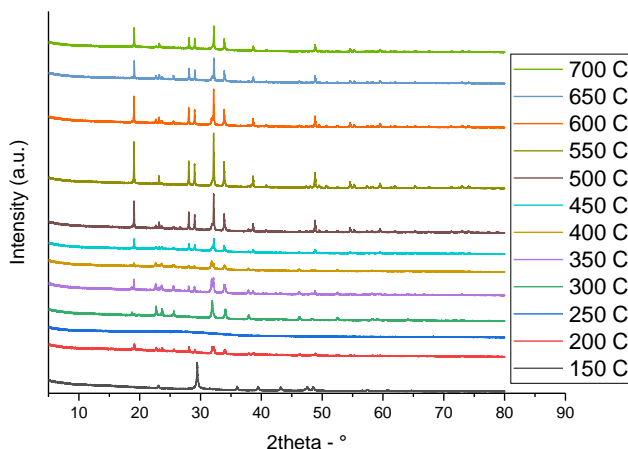
**Таблица 1** – Адсорбционная активность полученных образцов сорбента по йоду

Температура, °С	Адсорбционная активность, %
150	20.0
200	22.7
250	18.0
300	18.2
350	21.0
400	22.6
450	23.0
500	25.7
550	30.0
600	41.1
650	66.3
<b>700</b>	<b>81.2</b>
750	56.7
800	32.0

Для изучения кристаллической структуры сорбентов использовали рентгеновскую дифракцию (Rigaku SmartLab SE, Cu K $\alpha$ ). Установлено, что при разных температурах формируются различные фазы силиката алюминия (рисунок 2).

Силикат алюминия: 150°C, 200°C, 250°C, 300°C, 350°C, 400°C, 450°C, 500°C, 550°C, 600°C, 650°C и 700°C (12 образцов). Рентгеновские дифрактограммы показали наличие кальцита (CaCO<sub>3</sub>) только при температуре образца 150 °С. Для всех остальных образцов на рентгенограммах преобладают аморфные пики (при 2 $\theta$  около 20-30 °С при низких температурах) и слабые кристаллические пики (при высоких температурах), соответствующие аморфному и слабокристаллическому алюмосиликатному гелю. В аморфных фазах отсутствуют четко выраженные кристаллографические плоскости (т.е. отсутствует дальняя периодичность, только ближний порядок), удовлетворяющие закону Брэгга, поэтому острые дифракционные пики отсутствуют. Однако из-за ближнего порядка сохраняются предпочтительные межатомные расстояния. Они приводят к появлению широких диффузных максимумов рассеяния на рентгенограммах, часто называемых аморфными пиками или гало.

Остальные пики на рентгенограммах соответствуют слабокристаллическим цеолитовым фазам: анальциму, цеолиту X (каркас типа FAU) и цеолиту A (каркас типа LTA), соответствующим номерам карт ICDD: 00-041-1478, 00-038-0237 и 00-043-0142 соответственно, которые образуются в процессе осаждения. Интенсивность этих фаз неравномерна с повышением температуры, что обусловлено их термической нестабильностью. Также наблюдались следы кварца ( $\text{SiO}_2$ ) и альбита ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ).



**Рисунок 2** – Фазовый анализ образцов, проведённый методом рентгеновской дифракции с использованием установки Rigaku SmartLab SE

**Таблица 2** – Элементный анализ полученного адсорбента на основе алюмосиликата натрия

Температура, °C	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{CaO}$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$
150	56.80	10.60	1.45	0.255	0.154	0.022
200	57.20	10.90	1.38	0.284	0.157	0.027
250	59.40	11.50	4.63	0.918	0.363	0.069
300	56.00	9.75	8.40	0.166	0.125	0.014
350	57.20	15.00	1.01	0.235	0.184	0.033
400	57.30	8.82	2.38	0.449	0.249	0.013
450	55.70	9.60	7.17	0.471	0.201	0.035
500	56.20	11.60	6.76	0.133	0.051	0.022
550	55.90	12.30	4.15	0.268	0.029	0.047
600	56.10	14.80	2.92	0.287	0.223	0.054
650	56.10	19.60	2.19	0.218	0.188	0.063
700	58.20	18.90	2.14	0.219	0.198	0.062
750	56.20	17.50	2.17	0.213	0.189	0.056
800	55.40	9.50	7.15	0.456	0.201	0.035

Элементный состав адсорбентов на основе алюмосиликата натрия, полученных при разных температурах, определяли методом рентгенофлуоресцентного анализа на спектрометре NEX GG (Rigaku, Япония). Метод позволил точно установить содержание элементов, необходимое для оценки структуры и свойств материалов. Результаты приведены в таблице 2.

Температурные изменения состава неравномерны:

- до 300 °С происходит выгорание органики и рост  $\text{Na}_2\text{O}$ ;
- при 350–650 °С активизируются переходы алюмосиликатов, повышается  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ;
- выше 650 °С стабилизируются  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , формируются устойчивые фазы.

Оптимальный диапазон стабилизации структуры зола – 600–700 °С, где содержание  $\text{SiO}_2$  достигает 56–58 %, а  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 15–19 %, что обеспечивает более упорядоченную алюмосиликатную матрицу.

В ИК-спектрах полученных алюмосиликатных сорбентов наблюдаются полосы поглощения деформационных колебаний  $\text{Si-O-Si}$  в области  $432\text{ см}^{-1}$ , валентное симметричное колебание иона  $\text{SiO}_4$  в области  $578\text{ см}^{-1}$ , колебания связи  $\text{Al-O-Si}$  в области  $694\text{ см}^{-1}$  и валентные колебания  $\text{Si-O}$  в связях  $\text{Si-O-Al}$  при  $968\text{ см}^{-1}$  (во всех продуктах ИК-спектры идентичны). ИК-спектр адсорбента, полученного при температуре 700°С является оптимальным и приведен на рисунке 3.

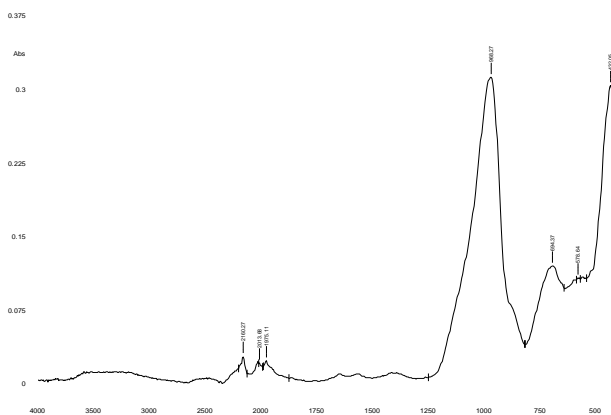
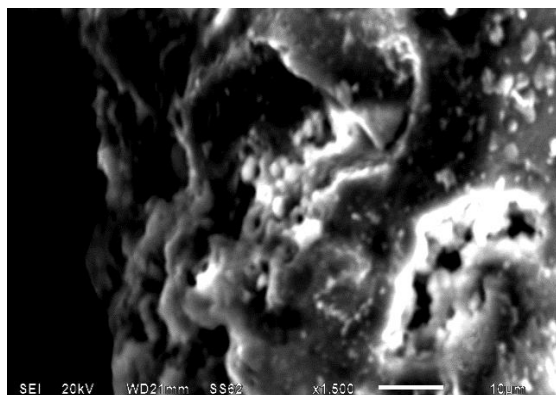


Рисунок 3 – ИК-Фурье спектр алюмосиликата натрия, полученного в оптимальных условиях

Микрофотография, полученная методом SEM на микроскопе JSM-6510 (JEOL, Япония), использовалась для анализа морфологии и состава адсорбента. Установлено, что алюмосиликатный адсорбент из рисовой шелухи имеет поры диаметром 0,1–1 мкм (Рисунок 4).



**Рисунок 4** – Микрофотография измельченного адсорбента на основе алюмосиликата натрия из рисовой шелухи x1500 кратное увеличение, полученное при 700°C

#### 4. Заключение.

Предложенный нами метод получения алюмосиликата натрия из рисовой шелухи является эффективным и экологически устойчивым. Он позволяет утилизировать отходы сельского хозяйства и получать ценные адсорбенты с высокими характеристиками. Метод прост в реализации и может быть оптимизирован для получения продукта с заданными свойствами. Исследование адсорбционной активности по йоду полученного адсорбента на основе алюмосиликата натрия из рисовой шелухи показало, что материал обладает значительной способностью поглощать йод из растворов. При 700°C адсорбционной активности по йоду увеличивается до 81,2%, это свойство делает его потенциально эффективным для очистки природных и сточных вод и других жидких сред от йодсодержащих загрязнений.

**Благодарность.** Авторы благодарят Лабораторию инженерного профиля НАО «Кызылординский университет им. Коркыт Ата» за техническую поддержку проведенных исследований.

**Финансирование.** Исследование профинансировано Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (ПЦФ No. BR21882415).

**Конфликт интересов:** Конфликт интересов между авторами отсутствует.

#### КҮРІШ ҚАЗЫЗЫНАН НАТРИЙ АЛЮМОСИЛИКАТЫН АЛУ ӘДІСІН ӘЗІРЛЕУ ЖӘНЕ ОНЫҢ СОРБЦИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ

*М. Төлегенқызы*<sup>2</sup>, *Р.А.Нарманова*<sup>1</sup>, *А. Серікқұл*<sup>2</sup>, *Г.С.Даирбекова*<sup>2</sup>, *Н.А.Ахатаев*<sup>1</sup>,  
*К.Х.Дармагамбет*<sup>1</sup>, *Б.А.Абжасалов*<sup>1</sup>, *Е.А.Назаров*<sup>1</sup>, *Н.О.Аппазов*<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>"Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университеті" КеАҚ, Қызылорда, Қазақстан

<sup>2</sup>Қарағанды Индустриялық Университеті, Теміртау, Қазақстан



**Түйіндеме.** Бұл зерттеу көлемді ауыл шаруашылығы қалдығы – күріш қауызының құндылығын арттыруға бағытталған. Күріш қауызы кремнийге бай жаңартылатын шикізат ретінде қарастырылып, функционалды материалдар алуға қолданылады. Ерекше назар натрий алюмосиликатын синтездеуге аударылды, ол табиғи және өнеркәсіптік ағын суларды ауыр металл иондарынан және органикалық ластағыштардан тазартуға арналған тиімді сорбент ретінде пайдаланылады. Ұсынылған әдіс натрий силикатын алудан басталады: ол 10 г ұнтақталған, сумен жуылған және кептірілген күріш қауызы мен 130 мл 1 М NaOH ерітіндісінің қоспасын микротолқынды сәулемен өңдеу арқылы алынады. Алынған натрий силикат ерітіндісін 50 мл қаныққан алюминий сульфаты ерітіндісімен араластырады. Нәтижесінде натрий алюмосиликаты түзіледі, ол тұнба түрінде бөлінеді. Тұнбаны сүзу, жуу және әртүрлі температурада термиялық өңдеу арқылы жоғары меншікті беті мен дамыған кеуекті құрылымы бар сорбенттер алынады. Бұл әдіс қайта өңдеуге қиын қалдықтарды тиімді пайдалануды қамтамасыз етіп қана қоймай, экологиялық қауіпсіз әрі ресурсты үнемдеуші болып табылады. Алынған алюмосиликаттар жоғары сорбциялық қабілет көрсетіп, оларды су тазарту жүйелерінде, өнеркәсіптік шығарындыларды залалсыздандыруда және селективті адсорбенттер жасауда қолдануға мүмкіндік береді.

**Түйін сөздер:** күріш қауызы, натрий силикаты, натрий алюмосиликаты, адсорбция, адсорбент

<b>Төлегенқызы Меруерт</b>	<i>Техника ғылымдарының магистрі</i>
<b>Нарманова Роза Абдибековна</b>	<i>Техника ғылымдарының кандидаты, доцент</i>
<b>Серікқұл Анель</b>	<i>Докторант</i>
<b>Даирбекова Гулдана Сиюндыковна</b>	<i>PhD</i>
<b>Ахатаев Нурлыбек Ақарыстанұлы</b>	<i>Химия ғылымдарының кандидаты</i>
<b>Дармагамбет Клара Хайроллаевна</b>	<i>Химия ғылымдарының кандидаты</i>
<b>Абжалелов Бакытбек Байдосұлы</b>	<i>Биология ғылымдарының кандидаты</i>
<b>Назаров Есенжол Асылбекұлы</b>	<i>Техника ғылымдарының кандидаты</i>
<b>Аппазов Нурбол Орынбасарұлы</b>	<i>Химия ғылымдарының кандидаты, профессор</i>

## References

1. Rice Market Monitor. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2017, 20(2), 36. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.24108.95368>
2. P.N. Babaso, H. Sharanagouda, Rice husk and its applications: Review, *Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci.*, **2017**, 6(10), 1144–1156. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.610.138>
3. S.S. Shukla, R. Chava, S. Appari, A. B., B.V.R. Kuncharam, Sustainable use of rice husk for the cleaner production of value-added products. *J. Environ. Chem. Eng.*, **2022**, 10(1), 106899. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106899>
4. V.I. Kuprianov, R. Kaewklum, K. Sirisomboon, P. Arromdee, S. Chakrithakul, Combustion and emission characteristics of a swirling fluidized-bed combustor burning moisturized rice husk. *Appl. Energy*, **2010**, 87, 2899–2906. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.09.009>
5. M. Fang, L. Yang, G. Chen, Z. Shi, Z. Luo, K. Cen, Experimental study on rice husk combustion in a circulating fluidized bed, *Fuel Process. Technol.*, **2004**, 85, 1273–1282. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2003.08.002>
6. S. Ijaz, A. Kausar, M. Iqbal, N. el Messaoudi, Y. Miyah, S. Knani, B. Graba, Advances in extraction of silica from rice husk and its modification for friendly environmental wastewater treatment via adsorption technology, *J. Water Process Eng.*, **2025**, 71, 107187. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.107187>
7. M.A. Taiye, W. Hafida, F. Kong, C. Zhou, A review of the use of rice husk silica as a sustainable alternative to traditional silica sources in various applications. *Environ. Prog. Sustain. Energy*, **2024**, 43(6), 14451. <https://doi.org/10.1002/ep.14451>

8. Jandosov J, Alavijeh M, Sultakhan S, Baimenov A, Bernardo M, Sakipova Z, Azat S, Lyubchik S, Zhylybayeva N, Naurzbayeva G, et al. Activated Carbon/Pectin Composite Enterosorbent for Human Protection from Intoxication with Xenobiotics Pb(II) and Sodium Diclofenac. *Molecules*, **2022**, 27(7), 2296. <https://doi.org/10.3390/molecules27072296>
9. S.B. Lyubchik, A.I. Lyubchik, E.S. Lygina, S.I. Lyubchik, T.L. Makarova, J. Vital, A.M.B.d. Rego, I.M. Fonseca, Simultaneous removal of 3d transition metals from multi-component solutions by activated carbons from co-mingled wastes. *Sep. Purif. Technol.*, **2008**, 60(3), 264-271. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2007.08.020>
10. Sibani M., Jyostnarani S., Barsha D. Synthesis and characterizations of different aluminosilicate nano matrices. *Materials Today: Proceedings*, **2021**, 35(2), 186-192. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.224>
11. Panasenko A.E., Borisova P.D., Arefyeva O.D., Zemnukhova L.A. Aluminosilicates from rice straw: synthesis and sorption properties. *Chemistry of Plant Raw Material*, **2019**, 3, 291-298. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2019034278>
12. Hussin F. N. N. M., Wahab R. A., Attan N. Nanocellulose and nanoclay as reinforcement materials in polymer composites: A review. *Malaysian J. Fundam. Appl. Sci.*, **2020**, 16(2), 145-153. <https://doi.org/10.1113/mjfas.v16n2.1430>
13. Satlewal A., Agrawal R., Bhagia S., Das P., Ragauskas A.J. Rice straw as a feedstock for biofuels: Availability, recalcitrance, and chemical properties. *Boifuels, Bioproducts and Biorefining*, **2017**, 12(9), 83-107. <https://doi.org/10.1002/bbb.1818>
14. Borai E., Harjula R., Malinen L., Paajanen A. Efficient removal of cesium from low-level radioactive liquid waste using natural and impregnated zeolite minerals. *Journal of Hazardous Materials*, **2009**, 172(1), 416-422. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.07.033>
15. N. E. Gordina, R. N. Rumyantsev, T. N. Borisova, A. E. Kolobkova, E. V. Tsvetova, E. E. Afanas'eva, E. S. Severgina, V. Yu. Prokof. Use of Combinations of Ultrasonic Processing and Microwave Crystallization to Intensify the Synthesis of LTA Zeolite Membranes. *Petroleum Chemistry*, **2020**, 60(4), 550-556. <https://doi.org/10.1134/S0965544120040155>
16. Abha D., Deepti G., Anuradha M. Zeolites in Wastewater Treatment. eBook: *RSC Green Chemistry*, **2013**, 82-104. <https://doi.org/10.1039/9781849735001-00082>
17. A.J. Ramos, E. Hernández Prevention of aflatoxicosis in farm animals by Means of hydrated sodium calcium aluminosilicate addition to feedstuffs: A review. *Animal Feed Science and Technology*, **1997**, 65(1-4), 197-206. [https://doi.org/10.1016/S0377-8401\(96\)01084-X](https://doi.org/10.1016/S0377-8401(96)01084-X)
18. S. Nakayama and Y. Sadaoka, J. Preparation of Na<sub>3</sub>Zr<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>PO<sub>12</sub>-sodium aluminosilicate composite and its application as a solid-state electrochemical CO<sub>2</sub> gas sensor. *Mater. Chem.*, **1994**, 4(5), 663-668. <https://doi.org/10.1039/JM9940400663>
19. Yarusova, S.B., Panasenko, A.E., Gordienko, P.S. et al. Synthesis of Nanostructured Sodium Aluminosilicate from Rice Straw and Its Sorption Properties. *Inorg. Mater*, **2019**, 55, 308-314. <https://doi.org/10.1134/S0020168519030166>
20. Azat S., Korobeinyk, A. V., Moustakas, K., & Inglezakis, V. J. Sustainable production of pure silica from rice husk waste in Kazakhstan. *Journal of Cleaner Production*, **2019**, 217, 352-359. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.142>
21. Azat S., Sartova Zh., Bekseitova K., Askaruly K. Extraction of high-purity silica from rice husk via hydrochloric acid leaching treatment. *Turkish Journal of Chemistry*, **2019**, 43(5), 1258-1269. <https://doi.org/10.3906/kim-1903-53>
22. Kydyr A., Mukhtar Y., Azamat T., Bibigul S., Aidos T., Nurzhamal Zh., Seitkhan A., Alisher A.r, Chingis D., A facile synthesis of graphite-coated amorphous SiO<sub>2</sub> from biosources as anode material for libs. *Materials Today Communications*, **2023**, 34, 105136. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.105136>
23. Yergaziyeva, G., Mambetova, M., Makayeva, N., Diyarova, B., Appazov, N., Lithium-containing sorbents based on rice waste for high-temperature carbon dioxide capture. *Journal of Composites Science*, **2024**, 8(9), 376. <https://doi.org/10.3390/jcs8090376>
24. Nekhliudova, E.A., Ivanov, N.P., Yarusova, S.B. et al. Synthesis and Sorption Properties of Nanostructured Sodium Aluminosilicates Differing in Si/Al Ratio. *Inorg Mater*, **2023**, 59, 1303-1312. <https://doi.org/10.1134/S0020168523120075>