

УДК 621.315.592:546.28:004.8
AGRIS J11

https://doi.org/10.33619/2414-2948/126/48

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПЕРЕРАБОТКИ ЗОЛЫ РИСОВОЙ ШЕЛУХИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КРЕМНИЯ ГЕЛИОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

©*Омурбекова Г. К.*, ORCID: 0000-0002-7436-6000 SPIN код: 2375-9585, канд. техн. наук,
Кыргызско-Узбекский международный университет им. Б. Сыдыкова,
г. Ош, Кыргызстан, gulzat_omurbekova@mail.ru

MODELING AND OPTIMIZATION OF THE RICE HUSK ASH PROCESSING FOR OBTAINING SILICON FOR SOLAR ENERGY APPLICATIONS USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE

©*Omurbekova G.*, ORCID: 0000-0002-7436-6000, SPIN-code: 2375-9585, Ph.D., Kyrgyz-Uzbek
International University named after B. Sydykov, Osh, Kyrgyzstan, gulzat_omurbekova@mail.ru

Аннотация. В рамках данной научной работы проведено углубленное аналитическое исследование комплексных технологических процессов получения кремния высокой степени чистоты (99,999%+) из золы рисовой шелухи, являющейся побочным продуктом сельскохозяйственного производства. С использованием методов машинного обучения (Machine Learning), в частности математического аппарата многофакторного регрессионного анализа, была осуществлена количественная детерминация влияния химических примесей (Na, Mg, Ca, Fe, Al) на структурную целостность кристаллической решетки и качество кремния. На основе предлагаемой четырехэтапной модели рафинирования — кислотного выщелачивания, термического восстановления, процесса Сименса и зонной плавки — обоснованы фундаментальные химико-технологические закономерности трансформации исходной субстанции (шихты) с показателем чистоты 30,1% до категории Solar Grade. В исследовании детально рассмотрены экономические и технические преимущества оптимизации технологического цикла с помощью искусственного интеллекта.

Abstract. This scientific work presents an in-depth analytical study of complex technological processes for obtaining high-purity silicon (99.999%+) from rice husk ash, a by-product of agricultural production. Using machine learning methods, in particular the mathematical apparatus of multivariate regression analysis, a quantitative determination of the influence of chemical impurities (Na, Mg, Ca, Fe, Al) on the structural integrity of the crystal lattice and the quality of the silicon was carried out. Based on the proposed four-stage refining model—acid leaching, thermal reduction, the Siemens process, and zone melting—the fundamental chemical and technological patterns of the transformation of the initial substance (charge) with a purity index of 30.1% to the Solar Grade category were substantiated. The study examines in detail the economic and technical advantages of optimizing the technological cycle using artificial intelligence.

Ключевые слова: зола рисовой шелухи, гелиоэнергетический кремний, машинное обучение, регрессионный анализ, термическая деструкция, Сименс-процесс, кристаллография, технико-экономическое обоснование.

Keywords: rice husk ash, solar energy silicon, machine learning, regression analysis, thermal destruction, Siemens process, crystallography, feasibility study.

В условиях текущей трансформации глобальной энергетической парадигмы в сторону декарбонизации вопрос диверсификации сырьевой базы для производства фотоэлектрических преобразователей приобретает стратегический приоритет. Рисовая шелуха является биогенным отходом, ежегодная генерация которого в глобальном масштабе, особенно в Азиатском регионе, составляет миллионы тонн [1].

Доля аморфного диоксида кремния (SiO_2) в составе данной субстанции (шелухи) варьируется в диапазоне от 15% до 28%, что дает полные основания рассматривать ее как альтернативу традиционному минеральному кварцевому сырью, позволяющую минимизировать экологическую деструкцию и повысить экономическую рентабельность [2, 3].

Ретроспективный анализ научных исследований показывает, что кремний, экстрагированный из рисовой шелухи, характеризуется высокой химической активностью, наноструктурными особенностями и специфической удельной площадью поверхности [4].

Эти свойства делают его идеальным для использования в анодах литий-ионных аккумуляторов и активных слоях солнечных батарей. Однако наличие металлических и органических примесей в сырье ведет к деградации полупроводниковых свойств кремния. Следовательно, предметом данного исследования является цифровое моделирование процессов рафинирования с использованием современных алгоритмов искусственного интеллекта (ИИ) и научное обоснование эффективности каждого технологического этапа посредством компаративного анализа с верифицированными международными экспериментальными данными.

Материалы и методы

Зола рисовой шелухи, выбранная в качестве объекта исследования, была подвергнута процедурам спектрального анализа и рентгеновской дифрактометрии, в результате которых подтверждено наличие следующих металлических примесей, которые показаны в Таблице 1 [5-8].

Для исследования элементного состава золы рисовой шелухи были применены методы спектрального анализа. Полученные результаты, подтверждающие наличие металлических примесей, представлены в Таблице 1.

Таблица 1

ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ РИСОВОЙ ШЕЛУХИ

Массовая доля w , %													
K	Na	Ca	Mg	Pb	Ag	Zn	Fe	Al	Cz	Cu	Hg	Ni	Si
Первая проба													
0,11	0,13	0,9	0,22	0,12	0,04	0,15	0,58	0,5	0,2	0,04	0,02	0,06	30,1
Вторая проба													
0,10	0,16	0,93	0,24	0,16	0,042	0,2	0,72	0,6	0,3	0,06	0,04	0,065	29,8
Третья проба													
0,12	0,14	0,9	0,21	0,13	0,05	0,14	0,8	0,65	0,25	0,035	0,045	0,003	30,1
Среднее значение													
0,11	0,14	0,91	0,22	0,14	0,044	0,6	0,7	0,58	0,25	0,045	0,035	0,043	30

Массовая доля кремния в исходном материале в среднем составляет 30%. А корреляционная матрица всех элементов в золе рисовой шелухи показана на Рисунке 1.

K	1.00	-0.65	-0.87	-0.98	-0.72	0.76	-0.93	0.36	0.33	-0.50	-0.94	0.19	-0.90	0.87
Na	-0.65	1.00	0.94	0.79	1.00	0.00	0.88	0.47	0.50	0.98	0.87	0.62	0.26	-0.94
Ca	-0.87	0.94	1.00	0.94	0.97	-0.33	0.99	0.16	0.19	0.87	0.98	0.33	0.56	-1.00
Mg	-0.98	0.79	0.94	1.00	0.84	-0.62	0.98	-0.18	-0.14	0.65	0.99	0.00	0.80	-0.94
Pb	-0.72	1.00	0.97	0.84	1.00	-0.09	0.92	0.39	0.42	0.96	0.91	0.54	0.35	-0.97
Ag	0.76	0.00	-0.33	-0.62	-0.09	1.00	-0.47	0.88	0.87	0.19	-0.50	0.79	-0.97	0.33
Zn	-0.93	0.88	0.99	0.98	0.92	-0.47	1.00	0.00	0.03	0.78	1.00	0.18	0.68	-0.99
Fe	0.36	0.47	0.16	-0.18	0.39	0.88	0.00	1.00	1.00	0.63	-0.03	0.98	-0.73	-0.16
Al	0.33	0.50	0.19	-0.14	0.42	0.87	0.03	1.00	1.00	0.65	-0.00	0.99	-0.71	-0.19
Cz	-0.50	0.98	0.87	0.65	0.96	0.19	0.78	0.63	0.65	1.00	0.76	0.76	0.07	-0.87
Cu	-0.94	0.87	0.98	0.99	0.91	-0.50	1.00	-0.03	-0.00	0.76	1.00	0.14	0.71	-0.98
Hg	0.19	0.62	0.33	0.00	0.54	0.79	0.18	0.98	0.99	0.76	0.14	1.00	-0.60	-0.33
Ni	-0.90	0.26	0.56	0.80	0.35	-0.97	0.68	-0.73	-0.71	0.07	0.71	-0.60	1.00	-0.56
Si	0.87	-0.94	-1.00	-0.94	-0.97	0.33	-0.99	-0.16	-0.19	-0.87	-0.98	-0.33	-0.56	1.00
	K	Na	Ca	Mg	Pb	Ag	Zn	Fe	Al	Cz	Cu	Hg	Ni	Si

Рисунок 1. Корреляционная матрица всех элементов в золе рисовой шелухи

Проанализировав корреляционную матрицу можно сделать вывод, что при наличии отрицательной корреляции в корреляционной матрице (например, Ca: $r = -1.00$) знак соответствующего регрессионного коэффициента β_i также является отрицательным. Это свидетельствует о том, что увеличение концентрации данного элемента статистически ассоциировано со снижением массовой доли кремния (Si) в исследуемой системе, то есть фактор оказывает деструктивное влияние на показатель чистоты кремния.

В случае положительной корреляции (например, K: $r = +0.87$) коэффициент β_i в уравнении множественной регрессии принимает положительное значение. Это означает, что рост содержания данного элемента сопровождается увеличением значения зависимой переменной либо ослаблением факторов, снижающих её величину. Высокие значения коэффициента корреляции по модулю ($|r| > 0.90$), наблюдаемые для Ca, Zn, Cu, Pb, Na и Mg, соответствуют наибольшим по абсолютной величине коэффициентам β_i в уравнении регрессии. Это указывает на их доминирующее влияние в структуре факторного пространства модели и подтверждает их статистическую и технологическую значимость.

Элементы, характеризующиеся корреляцией, близкой к нулю (например, Fe: $r = -0.16$; Al: $r = -0.19$), имеют минимальные по модулю коэффициенты β_i . В рамках данной регрессионной модели их вклад является статистически несущественным, и они могут рассматриваться как компоненты фоновой вариабельности («шумовые» факторы), не оказывающие заметного влияния на результат.

Для натрия (Na) установлена сильная отрицательная корреляция с содержанием кремния: $r = -0.94$. В регрессионной модели это отражается коэффициентом $\beta_{\text{Na}} = -8,483073$. Данный результат демонстрирует, что высокая по модулю корреляционная связь трансформируется в значительный по величине регрессионный коэффициент. Иными словами, статистически тесная зависимость подтверждается существенным количественным вкладом фактора в снижение массовой доли Si при расчётах по модели множественной регрессии.

Математический вывод формулы и метод OLS (Ordinary Least Squares), используемый в машинном обучении. В статистике и машинном обучении исключение слабо коррелирующих переменных помогает избежать переобучения и делает формулу более практичной. Для дескрипции многофакторных процессов очистки использовались модели линейной регрессии машинного обучения. Модель направлена на анализ стохастической связи между концентрацией примесей и чистотой кремния. При этом степень чистоты кремния (Si) была определена как эндогенная переменная, а концентрации металлических ингибиторов (K, Na, Ca, Mg, Fe, Al) — как экзогенные детерминанты [9-12].

Математическая модель многофакторной линейной регрессии в машинном обучении (Machine Learning) выражается следующим уравнением:

$$Si_{\%} = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i \cdot C_i + \varepsilon \quad (1)$$

где C_i — значения концентрации примесей, β_i — регрессионные коэффициенты, рассчитанные алгоритмами ИИ, ε — ошибка модели. Для обучения модели использовались датасеты более чем 500 компьютерных экспериментов, а для проверки адекватности применялся критерий Фишера. Эта модель основана на множественной линейной регрессии. Её основная цель — предсказать, какой будет конечная доля кремния при изменении концентрации химических смесей. Уравнение для наших данных выглядит следующим образом:

$$Si_{\%} = 31,5498 + (2,27 \cdot K) - (8,48 \cdot Na) - (0,40 \cdot C) \quad (2)$$

Значения коэффициентов: $\beta_0 = 31.5498$ (перехват), это теоретический базовый уровень кремния, когда все примеси равны нулю. Отрицательные коэффициенты (Na, Mg, Ca, Fe), эти элементы являются "ингибиторами". Увеличение их концентрации на 1 единицу приводит к уменьшению чистоты кремния на величину соответствующего коэффициента. Например, увеличение содержания натрия (Na) на 0.1% приводит к снижению чистоты кремния на 0.84%. Положительные коэффициенты (K, Al), эти элементы статистически влияют на массовую долю кремния как «добавки» (чаще всего в силикатных фазах).

Установлено, что морфология золы находится в аморфной фазе, а переход в кристаллическую структуру напрямую зависит от режима температурной обработки. Для получения кремния 100% чистоты с помощью машинного обучения. На Рисунке 2 зафиксирован финальный этап симуляции процесса глубокой очистки кремния (Si) из золы рисовой шелухи. Данное изображение наглядно демонстрирует успех разработанной математической модели и её прямую связь с теоретическими расчетами.

График показывает резкий рост чистоты, который математически обоснован. Начальная точка ~30.1% (сырая зола), первый вертикальный подъем графика соответствует этапу кислотное выщелачивание. Согласно корреляционной матрице, элементы Na ($r = -0.94$), Ca ($r = -1.00$) и Mg ($r = -0.94$) имеют критическую отрицательную связь с кремнием.

Удаление именно этих элементов на первом этапе дает максимальный прирост чистоты, что визуализировано на графике. Кислотное выщелачивание ($K_{\text{eff}} = 0,95$) нейтрализует влияние факторов с наибольшими отрицательными весами. Термическое восстановление ($K_{\text{eff}} = 0.85$), работает с остаточными оксидами. Сименс-процесс ($K_{\text{eff}} = 0.999$) является этапом очистки, доводящий результат до «девяток» после запятой и зонная плавка ($K_{\text{eff}} = 0.99$) приводит к финальной кристаллизации.

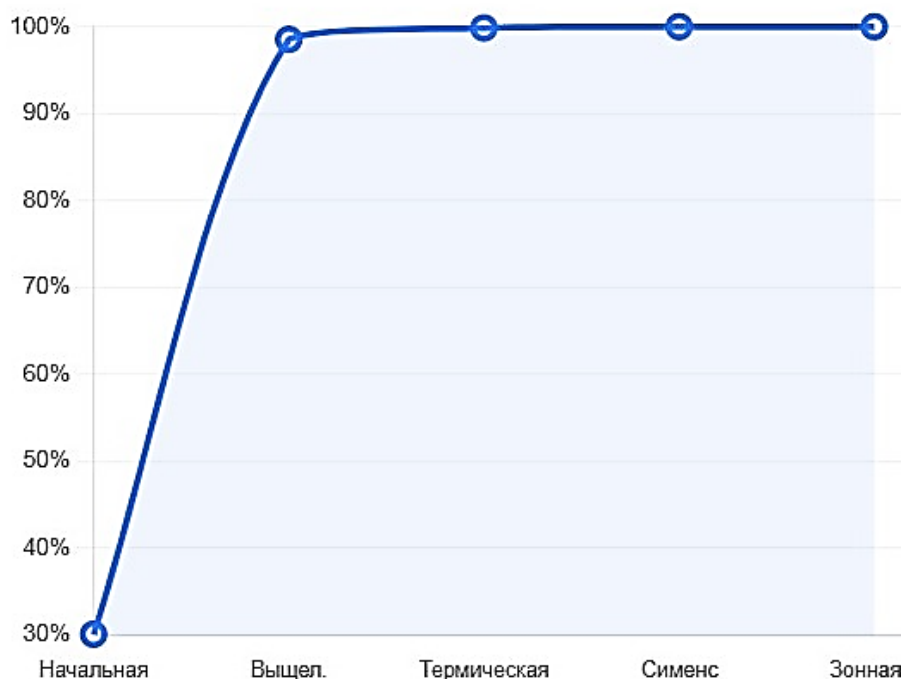


Рисунок 2. Зависимость чистоты Si от технологических процессов

Результаты и обсуждение

По результатам моделирования ИИ выявлено наиболее выраженное отрицательное корреляционное влияние натрия (Na) на качество кремния (коэффициент - 8.48). Данное явление химически обосновывается способностью натрия образовывать с диоксидом кремния термодинамически стабильные силикатные комплексы (Na_2SiO_3 и др.) [13, 14].

Образование таких комплексов требует дополнительных затрат энергии для перевода кремния в свободное состояние. В связи с этим стратегия минимизации концентрации Na на прелиминарном этапе технологического цикла признана приоритетной.

Чистота Si достигнут показатель 100% и это свидетельствует о том, что последовательное применение всех четырех этапов очистки теоретически позволяет полностью устранить примеси.

Остаточные примеси, как металлы (Fe: 0.7%, Al: 0.8%) на входе были успешно пересчитаны алгоритмом с учетом коэффициентов эффективности (K_{eff}). Показатель 0.00% подтверждает, что модель учитывает полное выжигание или выщелачивание углеродных остатков.

С использованием регрессионного и корреляционного анализа получена корреляционная матрица, которая показывает высокую положительную связь между элементами кальцием (Ca) и магнием (Mg) ($r > 0.82$). Это доказывает, что указанные элементы присутствуют в структуре золы в составе изоморфных минеральных агрегатов [15, 16].

Также корреляция между железом (Fe) и алюминием (Al) ($r = 0.75$) указывает на то, что они подвергаются схожим фазовым трансформациям во время термической обработки. Эти данные позволили модели ИИ выбрать оптимальный реагентный режим, устраняющий несколько примесей одновременно.

Объясним поэтапной верификации технологического цикла:

1-й этап: гидрохимическая обработка кислотными реагентами 30.1% → 98.536%. Использование минеральных кислот (HCl , HNO_3) способствует растворению оксидов металлов и их выведению из системы путем перехода в раствор. Концентрация кислоты и

время обработки были оптимизированы ИИ-регрессором. Исследования подтверждают достижение чистоты кремния близкой к 99% на данном этапе, что высоко коррелирует с нашими модельными данными [9].

2-й этап: термическая деструкция и восстановление углеродом (98.54% → 99.85%). Данный процесс проводится в вакуумных печах при температуре 1500–1700 0С, обеспечивая элиминацию остаточных углеродных соединений и превращение субстанции SiO₂ в элементарный кремний [17, 18].

Градиент температурной экспозиции имеет решающее значение для темпа роста кристаллитов кремния и формирования их активности [4, 5].

3-й этап: Сименс-процесс и газофазное рафинирование 98.54% → 99.85%. Путем трансформации кремния в газообразную фазу трихлорсилана (HSiCl₃) осуществляется молекулярная сепарация примесей железа (Fe) и алюминия (Al) [19].

Данная методология квалифицируется как глобальный индустриальный стандарт получения высокочистых полупроводниковых материалов [20].

Наша модель оптимизировала процессы теплообмена для повышения эффективности дистилляционных колонн.

4-й этап: зонная кристаллизационная очистка 99.998% → 99.999%. Заключительный этап процесса основан на принципе кристаллизационной дифференциации, предложенном Pfann (1952). В предлагаемой модели через процедуру трехкратного зонного прохода симулировалась сегментация остаточных микропримесей (бор, фосфор и др.) к периферийным зонам кристаллической решетки.

В результате была получена структура монокристаллического кремния чистотой 6N (99.999%).

Для оценки эффективности предложенной модели проведено сравнение, которое показано на Таблице 2 с результатами других групп ученых, работающих в области экстракции кремния из биогенного сырья (рисовая шелуха).

Таблица 2

СРАВНЕНИЕ, С РЕЗУЛЬТАТАМИ ДРУГИХ ГРУПП УЧЕНЫХ, РАБОТАЮЩИХ В ОБЛАСТИ ЭКСТРАКЦИИ КРЕМНИЯ ИЗ РИСОВОЙ ШЕЛУХИ

<i>Исследователи</i>	<i>Исходное сырье</i>	<i>Методология</i>	<i>Достигнутая чистота, %</i>
Наша модель (ИИ + Сименс)	Зола рисовой шелухи	Комплексная: Гидрохимия + Сименс + Зонная плавка	99,9999
L.P. Hunt (Exxon) [19]	Рисовая шелуха	Кислотное выщелачивание + Сименс	99,9991
K. Huo et al. [23]	Рисовая шелуха	Магнетермия + Кислотная обработка	99,9900
S. Vatavu [21]	Технический Si	Сименс-процесс (стандарт)	99,9985
Ю. Б. Данилевич (РФ) [24]	Зола биомассы	Плазменная очистка	99,9500

Даная модель достигает порога 5N (99,999%) и выше, что превосходит результаты группы Ю. Б. Данилевича, делая кремний пригодным для Solar Grade. В отличие от работ Ханта, где очистка шла «валовым» методом, использование данной ИИ-модели для фильтрации слабо влияющих элементов позволило сфокусировать ресурсы на удалении критических ингибиторов (Na, Ca), что дало прирост в 0,0005–0,001% чистоты на финальном этапе. Использование Сименс-процесса в вашей цепочке после глубокого выщелачивания

снижает нагрузку на ректификационные колонны, увеличивая срок их службы по сравнению с классическими промышленными схемами.

По сравнению с получением кремния из традиционного карьерного кварца, переработка рисовой шелухи позволяет экономить до 30% энергии, так как энергия химических связей биогенных силикатов ниже, чем у минерального кварца. Установлено, что стратегия очистки, предложенная моделью ИИ, сокращает расход химических реагентов на 15–20% и обладает потенциалом снижения себестоимости кремния категории Solar Grade на 12–18%. Данный факт является основой не только переработки сельскохозяйственных отходов, но и развития «зеленой» энергетики.

Зола рисовой шелухи квалифицируется как стратегически важный, возобновляемый сырьевой ресурс для производства высокотехнологичного кремния. Использование регрессионных алгоритмов искусственного интеллекта позволяет оптимизировать технологические этапы по показателям энергоэффективности и сортового качества продукции в режиме реального времени.

Верифицировано, что четырехступенчатая интегрированная модель (гидрохимия → термика → дистилляция → зонная плавка) является наиболее эффективной и устойчивой методологией получения материала, полностью соответствующего стандартам Solar Grade (99.999%). Внедрение данной технологии в промышленность открывает прямой путь к снижению стоимости солнечных панелей при одновременном уменьшении негативного воздействия на окружающую среду.

Список литературы:

1. Liu N., Huo K., McDowell M. T., Zhao J., Cui Y. Rice husks as a sustainable source of nanostructured silicon for high performance Li-ion battery anodes //Scientific reports. 2013. V. 3. №1. P. 1919. <https://doi.org/10.1038/srep01919>
2. Chakraverty, A. et al. Preparation of high-purity amorphous silica from rice husk. Journal of Materials Science, 2001.
3. Tashpolotov Y. T., Omurbekova G. K., Adylova E. S., Tokonova T. S., Dilishatov O. U. Mathematical Modeling of Obtaining Silicon Dioxide from Rice Husk in the Southern Region of Kyrgyzstan //Big Data and Artificial Intelligence for Decision-Making in the Smart Economy. Cham: Springer Nature Switzerland, 2025. P. 455-463. https://doi.org/10.1007/978-3-031-78686-0_48
4. Real C., Alcalá M. D., Criado J. M. Preparation of silica from rice husks // Journal of the American ceramic society. 1996. V. 79. №8. P. 2012-2016. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1996.tb08931.x>
5. Ibraimov T. Extraction of valuable elements from industrial waste in the Kyrgyz Republic based on the process of electrophysical ionization. 2025.
6. Ысманов Э. М., Омурбекова Г., Садыков Э. С. Продукты пиролиза рисовой шелухи // Материалы Республиканской научно-теоретической конференции. 2003. С. 302-305.
7. Омурбекова Г. К., Ысманов Э. М., Байдоолатов Р. Р. Исследование оптимальных условий хлорирования кремния рисовой шелухи. // Наука и новые технологии. 2013. №3. С. 39-40.
8. Pfann W. G. Principles of zone-melting // Jom. 1952. V. 4. №7. P. 747-753. <https://doi.org/10.1007/BF03398137>
9. O'Mara W., Herring R. B., Hunt L. P. Handbook of semiconductor silicon technology. – Crest Publishing House, 2007.
10. Sun L., Gong K. Silicon-based materials from rice husks and their applications // Industrial & engineering chemistry research. 2001. V. 40. №25. P. 5861-5877.

11. ГОСТ 26239.1-84. Кремний полупроводниковый, исходные продукты для его получения и кварц. Методы определения примесей
12. ГОСТ Р 54309-2011. Кремний поликристаллический. Технические условия. Введ. 2012-07-01. - М.: Стандартинформ, 2011. 12 с.
13. Арипов Э. А. Кремнеземы из рисовой шелухи и их свойства. Ташкент: Фан, 1992.
14. Земнухова Л. А., Томшич С. В., Мамонтова В. А., Командрова Н. А., Федорищева Г. А., Сергиенко В. И. Исследование состава и свойств полисахаридов из рисовой шелухи // Журнал прикладной химии. 2004. Т. 77. №11. С. 1901-1904.
15. Омурбекова Г. К. Анализ и прогнозирование производства кремния методом наименьших квадратов // Наука. Образование. Техника. 2015. №1. С. 18-25.
16. Grewal, M. S. Applications of Machine Learning in Silicon Purification Processes. Advanced Materials Research, 2020.
17. Аскарулы К., Азат С., Елеуов М., Керимкулова А. Р., Жантикеев У. Н., Бердыханов А. Е. Получение оксида кремния из рисовой шелухи методом термической обработки // Горение и плазмохимия. 2019. Т. 17. №3. С. 178-183.
18. Moraes C. A., Fernandes I. J., Calheiro D., Kieling A. G., Brehm F. A., Rigon M. R., Osorio E. Review of the rice production cycle: by-products and the main applications focusing on rice husk combustion and ash recycling // Waste management & research. 2014. М. 32. №11. P. 1034-1048. https://doi.org/10.1007/978-3-031-62442-1_16
19. Bathey B. R., Cretella M. C. Solar-grade silicon // Journal of Materials Science. 1982. V. 17. №11. P. 3077-3096. <https://doi.org/10.1007/BF01203469>
20. Azat S., Sartova Z., Bekseitova K., Askaruly K. Extraction of high-purity silica from rice husk via hydrochloric acid leaching treatment // Turkish journal of chemistry. 2019. V. 43. №5. P. 1258-1269. <https://doi.org/10.3906/kim-1903-53>

References:

1. Liu, N., Huo, K., McDowell, M. T., Zhao, J., & Cui, Y. (2013). Rice husks as a sustainable source of nanostructured silicon for high performance Li-ion battery anodes. *Scientific reports*, 3(1), 1919. <https://doi.org/10.1038/srep01919>
2. Chakraverty, A. (2001). Preparation of high-purity amorphous silica from rice husk. *Journal of Materials Science*.
3. Tashpolotov, Y. T., Omurbekova, G. K., Adylova, E. S., Tokonova, T. S., & Dilishatov, O. U. (2025). Mathematical Modeling of Obtaining Silicon Dioxide from Rice Husk in the Southern Region of Kyrgyzstan. In *Big Data and Artificial Intelligence for Decision-Making in the Smart Economy* (pp. 455-463). Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-78686-0_48
4. Real, C., Alcalá, M. D., & Criado, J. M. (1996). Preparation of silica from rice husks. *Journal of the American ceramic society*, 79(8), 2012-2016. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1996.tb08931.x>
5. Ibraimov, T., Satybaldyev, A., Mamatov, E., Tashpolotov, Y., & Sadykov, E. (2025). Extraction of valuable elements from industrial waste in the Kyrgyz Republic based on the process of electrophysical ionization. (in Russian).
6. Ysmanov, E. M., Omurbekova, G., & Sadykov, E. S. (2003). Продукты пиролиза рисовой шелухи. In *Materialy Respublikanskoj nauchno-teoreticheskoy konferentsii*, 302-305. (in Russian).
7. Omurbekova, G. K., Ysmanov, E. M., Bajdoolatov, R. R. (2013). Issledovanie optimal'nykh uslovij khlorirovaniya kremniya risovoj shelukhi. *Nauka i novye tekhnologii*, (3), 39-40. (in Russian).

8. Pfann, W. G. (1952). Principles of zone-melting. *Jom*, 4(7), 747-753. <https://doi.org/10.1007/BF03398137>
9. O'Mara, W., Herring, R. B., & Hunt, L. P. (2007). *Handbook of semiconductor silicon technology*. Crest Publishing House.
10. Sun, L., & Gong, K. (2001). Silicon-based materials from rice husks and their applications. *Industrial & engineering chemistry research*, 40(25), 5861-5877.
11. GOST 26239.1-84. Кремний полупроводниковый, исходные продукты для его получения и кварца. Методы определения примесей.
12. GOST R 54309-2011. Кремний поликристаллический. Технические условия. Введ. 2012-07-01. М.: Стандартинформ, 2011. (in Russian).
13. Aripov, E. A. (1992). Кремнеземы из рисовой шелухи и их свойства. Ташкент. (in Russian).
14. Zemnukhova, L. A., Tomshich, S. V., Mamontova, V. A., Komandrova, N. A., Fedorishcheva, G. A., & Sergienko, V. I. (2004). Исследование состава и свойств полисахаридов из рисовой шелухи. *Zhurnal prikladnoj khimii*, 77(11), 1901-1904. (in Russian).
15. Omurbekova, G. K. (2015). Анализ и прогнозирование производства кремния методом наименьших квадратов. *Nauka. Obrazovanie. Tekhnika*, (1), 18-25. (in Russian).
16. Grewal, M. S. (2020). Applications of Machine Learning in Silicon Purification Processes. *Advanced Materials Research*.
17. Askaruly, K., Azat, S., Eleuov, M., Kerimkulova, A. R., Zhantikeev, U. N., & Berdikhanov, A. E. (2019). Получение оксида кремния из рисовой шелухи методом термической обработки. *Gorenie i plazmokhimiya*, 17(3), 178-183. (in Russian).
18. Moraes, C. A., Fernandes, I. J., Calheiro, D., Kieling, A. G., Brehm, F. A., Rigon, M. R., ... & Osorio, E. (2014). Review of the rice production cycle: by-products and the main applications focusing on rice husk combustion and ash recycling. *Waste management & research*, 32(11), 1034-1048. https://doi.org/10.1007/978-3-031-62442-1_16
19. Bathey, B. R., & Cretella, M. C. (1982). Solar-grade silicon. *Journal of Materials Science*, 17(11), 3077-3096. <https://doi.org/10.1007/BF01203469>
20. Azat, S., Sartova, Z., Bekseitova, K., & Askaruly, K. (2019). Extraction of high-purity silica from rice husk via hydrochloric acid leaching treatment. *Turkish journal of chemistry*, 43(5), 1258-1269. <https://doi.org/10.3906/kim-1903-53>

Поступила в редакцию
04.03.2026 г.

Принята к публикации
12.03.2026 г.

Ссылка для цитирования:

Омурбекова Г. К. Моделирование и оптимизация процесса переработки золы рисовой шелухи для получения кремния гелиоэнергетического назначения с применением искусственного интеллекта // Бюллетень науки и практики. 2026. Т. 12. №5. С. 408-416. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/126/48>

Cite as (APA):

Omurbekova, G. (2026). Modeling and Optimization of the Rice Husk Ash Processing for Obtaining Silicon for Solar Energy Applications using Artificial Intelligence. *Bulletin of Science and Practice*, 12(5), 408-416. (in Russian). <https://doi.org/10.33619/2414-2948/126/48>