

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-6-95-106

¹Черкашина Н.И., ¹Ручий А.Ю., ^{1,*}Синебок Д.А., ²Самойлова Ю.М., ¹Баринев Р.А.¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова²Белгородский юридический институт Министерства внутренних дел
Российской Федерации имени И.Д. Путилина

*E-mail: sinebokd@mail.ru

ПОЛУЧЕНИЕ, СОСТАВ И СВОЙСТВА КРЕМНИЙ- И УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ ПРОДУКТОВ ПЕРЕРАБОТКИ ШЕЛУХИ ГРЕЧИХИ

Аннотация. Эффективное использование отходов биомассы может существенно помочь в решении экологических проблем, однако, существует ряд задач, с которыми сталкиваются исследователи. Возникает вопрос эффективного извлечения ценных компонентов в связи с тесной связью между компонентами биомассы.

В работе исследуется возможность извлечения ценных продуктов из гречишной шелухи, являющейся многотоннажным побочным продуктом переработки гречихи. Основное внимание уделено процессам получения целлюлозы, лигнина и диоксида кремния с использованием кислотной и щелочной обработки. Проведены анализы, включая рентгенофазовый, ИК-спектроскопический и термический, которые позволили установить физико-химические особенности синтезируемых продуктов, их морфологию и состав. Установлено, что полученная целлюлоза содержит незначительные примеси и характеризуется высокой степенью чистоты, а лигнин и диоксид кремния демонстрируют высокую энергетическую ценность. Продукты лигноцеллюлозы содержали более 30 % углерода по весу. Полученный продукт кремнезема имел аморфную структуру. Результаты этого исследования способствуют расширению и разработке простого и эффективного процесса преобразования отходов биомассы в устойчивые материалы, обеспечивая экономическую целесообразность и снижая экологическую нагрузку. Результаты могут служить основой для дальнейших исследований в области извлечения ценных компонентов из других видов растительных отходов, что подчеркивает значимость этих процессов для устойчивого развития и охраны окружающей среды.

Ключевые слова: гречишная шелуха, целлюлоза, лигнин, диоксид кремния, растительные отходы

Введение. Исследования, направленные на извлечение полезных продуктов из растительных отходов, с применением обработки биомассы кислотами, щелочами, высокими температурами и давлением, привлекают внимание многих ученых [1]. Цель исследователей – сделать переработку и извлечение полезных продуктов экономически целесообразной и наиболее эффективной.

Гречишная лузга составляет 20–25 % от веса гречки и тем самым является значительным побочным продуктом переработки зерна в сельском хозяйстве, представляя собой источник органических и минеральных компонентов [2]. Потенциально, из лигнинцеллюлозных биомасс можно извлечь такие ценные продукты, как целлюлоза [3–5], лигнин и значительное количество диоксида кремния, что делает этот агропромышленный отход перспективным сырьем для комплексной переработки и получения ценных химических соединений [6].

Целлюлоза вызывает интерес благодаря своей уникальной морфологии, механическим характеристикам, низкой плотности, возобновляемости, доступности и нетоксичности [7]. Она является основным полисахаридным компонентом

биомассы, содержание которой может достигать до 24 % на сухой вес. Целлюлоза применяется в производстве бумаги, строительстве, производстве биоразлагаемых материалов, сорбентов, текстильной промышленности, пищевой промышленности, фармацевтике, косметике и других сферах [8]. Лигнин, будучи природным полимером с уникальной ароматической структурой, находит широкое применение в производстве биомасс и биотоплива, связующих веществ, в химической промышленности, в производстве удобрений, для создания биокомпозитов и биопластиков и прочих сферах [9, 10]. Диоксид кремния, присутствующий в значительных количествах в шелухе гречихи, представляет интерес для создания строительных материалов, адсорбентов, катализаторов, наноматериалов и прочих направлений [11].

В данной работе исследовали возможность извлечения из отходов растительного сырья, а именно гречишной шелухи, ценных продуктов, таких как лигнин, диоксид кремния и целлюлоза.

Материалы и методы. В процессе синтеза были использованы следующие химические реактивы: кислота серная химически чистая (ХЧ),

натрий гидроокись химически чистый (ХЧ), дистиллированная вода, перекись водорода (ХЧ). В качестве отходов растительного сырья использовалась шелуха гречихи в виде мелкодисперсного порошка (сбор урожая 2023 года).

ИК-спектры поглощения сырья и продуктов были получены при помощи прибора Bruker Vertex 70 в диапазоне измерения $400\text{--}4000\text{ см}^{-1}$ со спектральным разрешением $\geq 0,4\text{ см}^{-1}$.

Определение фазового состава исходных и синтезированных материалов осуществлялось посредством рентгенографического метода анализа. Дифрактограммы порошков были получены на рентгенофлуоресцентном спектрометре серии ARL 9900 Work Station со встроенной системой дифракции в диапазоне двойных углов 2θ $4\text{--}64^\circ$. Шаг съёмки – $0,05^\circ$, анод – медь.

Анализ рентгенограмм исходного сырья и продуктов синтеза проводился с использованием компьютерных программ Dif Win и Search Match. Фазовый состав определялся с помощью базы данных PDF-2 (Powder Diffraction File-2) и базы данных по Фики.

Массу образцов измеряли с помощью лабораторных весов CAS CAUW 220D с дискретностью отсчета $0,1\text{ мг}$.

Морфологию сырья и продуктов исследовали методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) с помощью микроскопа Tescan MIRA 3 LMU.

Дифференциально-термический анализ сырья проводился с помощью прибора синхронного термического анализа STA 449 F1 Jupiter. Область нагрева составила $20\text{--}600^\circ\text{C}$ со скоростью поднятия температуры – 10 град/мин . Среда испытания приближена к воздушной среде: 21% кислорода, 79% аргона.

Процесс обработки гречишной шелухи для одновременного получения продуктов приведен на рисунке 5.

Основная часть. На рисунке 1 представлены данные по рентгенофазовому анализу гречишной шелухи. В результате анализа полученной дифрактограммы удалось выявить следующие фазы: дифракционные отражения $3,997\text{ \AA}$ и $3,214\text{ \AA}$ соответствуют фазе оксида кремния (карточка PDF-2: 82-1560 Silicon Oxide), дифракционные отражения $4,655\text{ \AA}$ и $3,024\text{ \AA}$ соответствуют углероду (карточка PDF-2: 50-1364 Carbon), дифракционные отражения $2,561\text{ \AA}$ и $1,744\text{ \AA}$ соответствуют фазе корунда (карточка PDF-2: 71-1123 Corundum). Основную часть дифрактограммы занимают гидратные фазы диоксида кремния ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) в виде аморфного двухвершинного гало с вершинами у 18 и 22° .

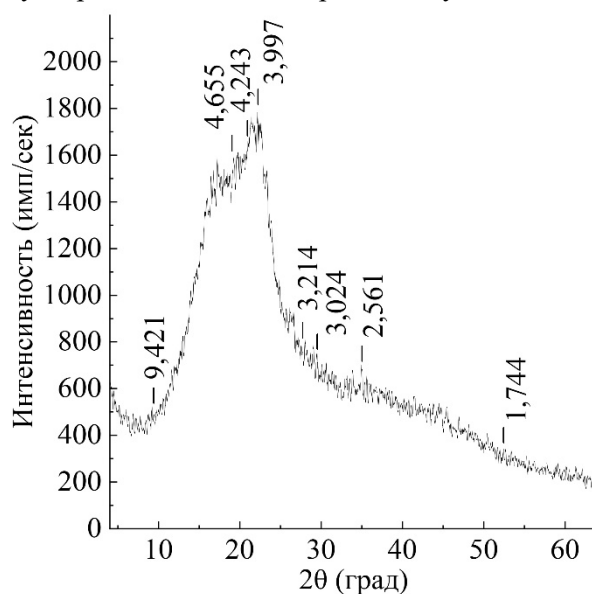


Рис. 1. Рентгенограмма гречишной шелухи

На рисунке 2 и в таблице 1 представлены микроструктура и распределение элементов, а также усреднённый элементный состав гречишной шелухи, соответственно.

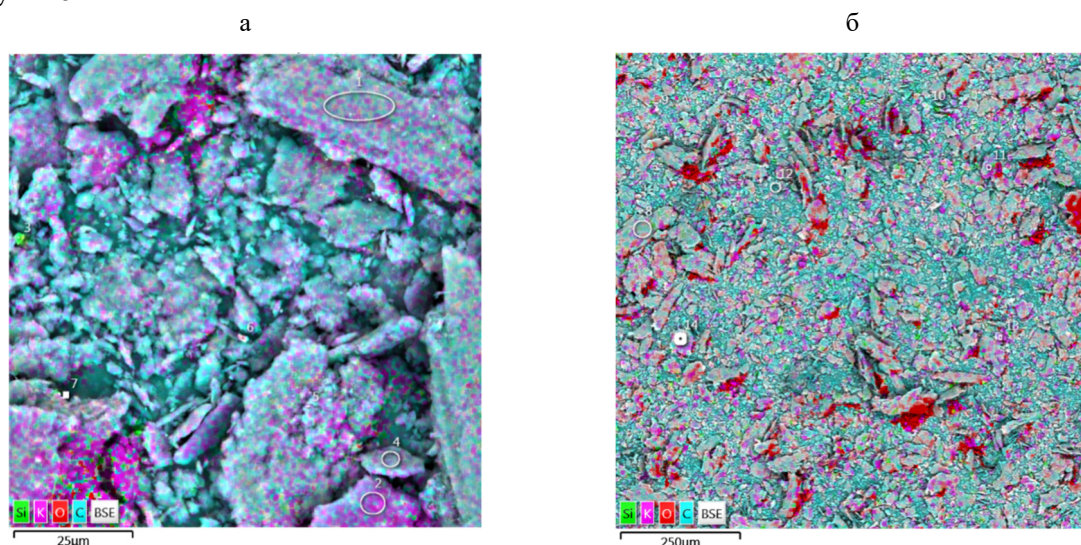


Рис. 2. Многослойная карта ЭДС гречишной шелухи

Таблица 1

Усреднённый элементный состав гречишной шелухи в пересчёте к 100 %, вес. %

C	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Pb
56,25	31,41	0,16	0,33	3,26	1,27	0,20	0,11	1,20	0,91	0,05	0,08	4,65	0,12

Исходя из представленных данных можно сделать вывод, что гречишная шелуха в основном состоит из атомов углерода, кислорода, железа, алюминия, в небольшом количестве присутствуют атомы кремния, калия, кальция, и в виде примесей в гречишной шелухе присутствуют атомы натрия, магния, фосфора, серы, титана, марганца и свинца [12].

На рис. 3 представлен ИК Фурье-спектр поглощения гречишной шелухи. Согласно представленному спектру, можно сделать следующие выводы:

1. Широкая полоса поглощения с пиковым значением 3392 см^{-1} относится к ν -колебаниям -ОН связей. Индекс симметричности пика составил 0,77, что показывает незначительное преобладание внутримолекулярных связей над внешнемолекулярными.

2. Пики небольшой интенсивности с волновым числом 2920 и 2852 см^{-1} относятся к ν -колебаниям С-Н связей.

3. Невысокий пик 1736 см^{-1} относится к ν -колебаниям карбонильной группы α -галогенкислот вида: СНХ-СООН .

4. Пик с волновым числом 1619 см^{-1} относится к ν -колебаниям $\text{C}=\text{C}$ связей в ароматических кольцах. Рядом с этим пиком (около 1650 см^{-1}) присутствует наложение, связанное с деформационными колебаниями молекулярной воды в шелухе.

5. Пик 1448 см^{-1} соответствует δ -колебаниям С-Н связей в алифатических группах.

6. Пик с волновым числом 1376 см^{-1} характерен для колебаний связи $\text{R-SO}_2\text{-OR}$.

7. Пик 1321 см^{-1} относится к δ -колебанию связи -СОН.

8. Полоса поглощения 1157 см^{-1} относится к δ -колебаниям связей -ОН и - CH_2 .

9. Полосы поглощения в диапазоне $950\text{--}1160\text{ см}^{-1}$ могут быть отнесены к ν -колебаниям С-О связей [13]. В этой же области находится самый высокоинтенсивный пик спектра – 1050 см^{-1} , соответствующий ν -колебанию С-О-С мостика. Также на данном участке наблюдается наложение полос поглощения кремнийорганических соединений, описанных ниже.

10. Пик 896 см^{-1} малой интенсивности относится к δ -колебаниям связи $\text{C}=\text{C}$.

11. Сигналы в области $590\text{--}850\text{ см}^{-1}$ могут указывать на наличие ароматических соединений с различными заместителями, а также на деформационные колебания С-Н связей в ароматических кольцах.

На представленном ИК-спектре также можно выделить следующие полосы поглощения, характерные для кремнийорганических соединений:

1. Пик с волновым числом 1249 см^{-1} относится к колебанию связи SiCH_3 .

2. Пик 1080 см^{-1} – интенсивный пик, относящийся к ассиметричным ν -колебаниям Si-O-Si связей в силоксановом фрагменте. В данном случае перекрывается областью ν -колебаний связи С-О.

3. Пик малой интенсивности с волновым числом 896 см^{-1} относится к δ -колебаниям Si-C связи.

4. Пик малой интенсивности с волновым числом 767 см^{-1} может указывать на наличие в гречишной шелухе полидиметилсилоксана.

5. Пики 663 и 608 см^{-1} относятся к δ -колебаниям связей Si-O-Si .

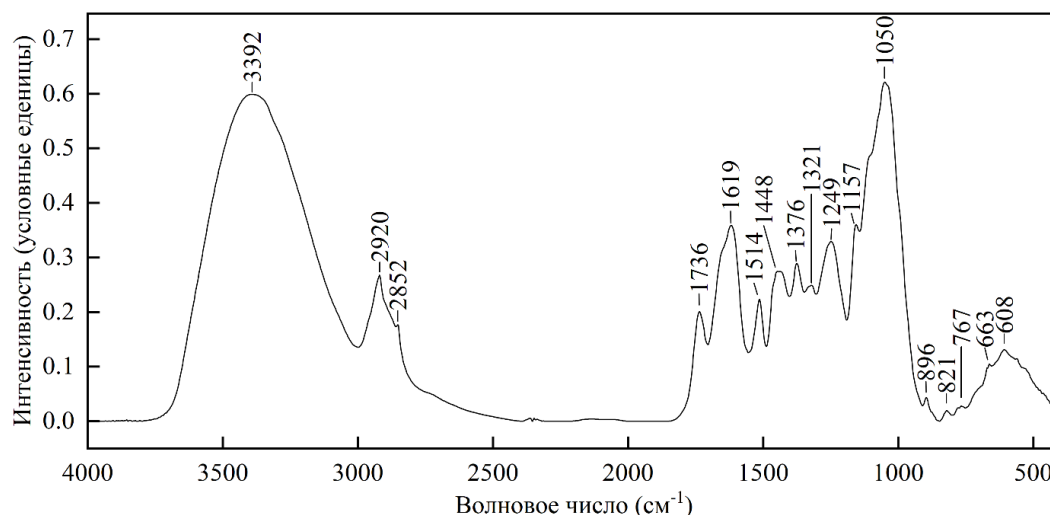


Рис. 3. ИК Фурье-спектр поглощения исходной гречишной шелухи

Таким образом, ИК-спектр гречишной шелухи демонстрирует наличие широкого спектра функциональных групп, характерных для сложной органической матрицы, включающей в себя компоненты, такие как спирты, фенолы, пентозаны, карбонильные соединения, ароматические структуры, алифатические фрагменты и кремнийорганические соединения. Этот анализ позволяет сделать предположения о химическом составе и структуре гречишной шелухи как природного лигноцеллюлозного материала.

Результат исследования физико-химических процессов, проходящих в гречишной шелухе, представлен на рис. 4. В результате анализа дериватограммы можно выделить несколько процессов. При 82,9 °С наблюдается эндотермический эффект с небольшой потерей массы, что соответствует процессу удаления физически и химически связанной воды из образца. При 324,8 °С наблюдаются экзотермический эффект, соответствующий разложению органических компонентов шелухи, а также окислению продуктов их разложения. При этом происходит интенсивная потеря массы образца, соответствующая удалению продуктов горения из шелухи. При 370,0 °С виден эндотермический пик, соответствующий процессу плавления и разложения минеральных компонентов шелухи. При 396,3 °С наблюдается

экзотермический эффект, соответствующий интенсивному горению аморфного углерода, сопровождающийся потерей массы образца. Данный пик интенсивный, следует сделать вывод, что содержание органических компонентов в гречишной шелухе высоко. При 410,0 °С замечен небольшой экзотермический эффект, связанный с полиморфными переходами компонентов в минеральной части шелухи. В области с 410,0 до 450,0 °С наблюдается эндотермический эффект, который может быть связан с образованием низкотемпературного твердофазного расплава (из-за содержания в шелухе алюминия, железа, щелочных и щелочноземельных металлов). Два пика при 463,0 и 471,2 °С могут быть связаны с кристаллизацией новых минеральных фаз из расплава. Потеря массы при 463,8 °С может быть связана с разложением карбонатов (выделение CO_2), выкристаллизовавшихся из расплава. Гречишная шелуха полностью выгорела при 510,0 °С. После завершения всех термических процессов остается около 3,16 % от первоначальной массы образца.

Дериватограмма гречишной шелухи показывает последовательность термических процессов, включающих удаление влаги, термическое разложение органических компонентов и фазовые переходы минеральных веществ.

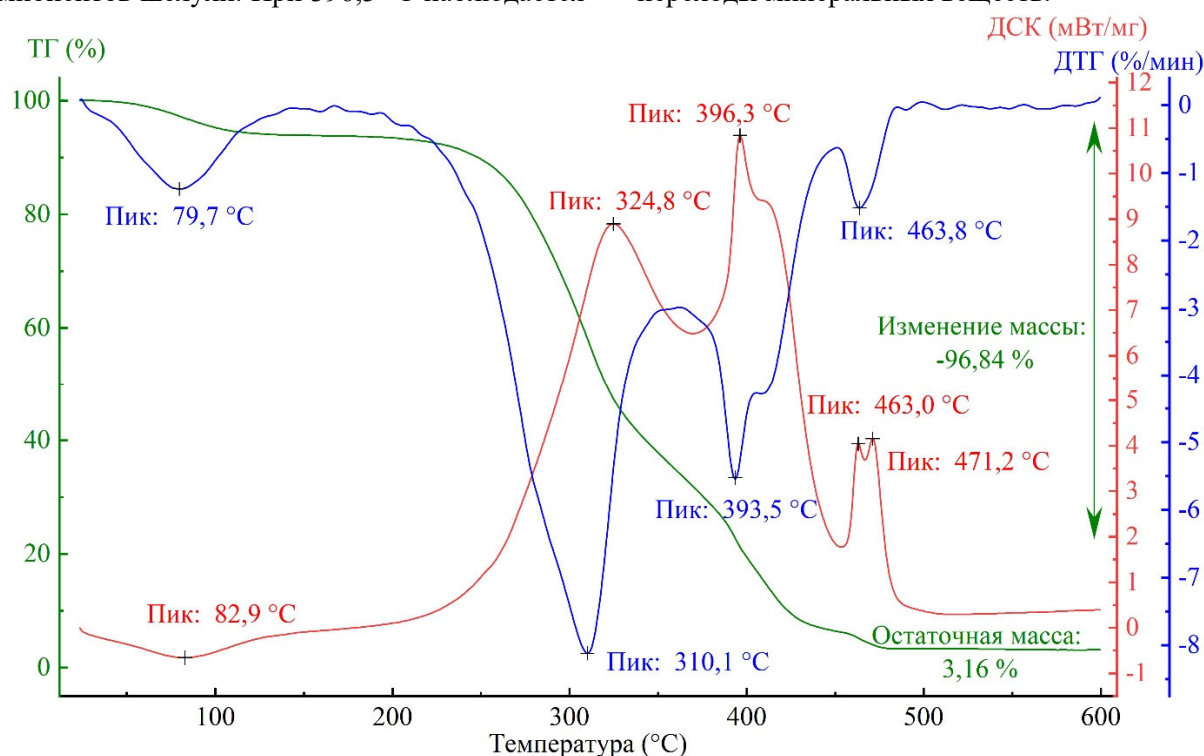


Рис. 4. Дериватограмма гречишной шелухи

На рисунке 5 приведена схема извлечения из гречишной шелухи ценных продуктов, таких как лигнин, диоксид кремния и целлюлоза.

На первом этапе 50 г шелухи, помещали в химический стакан и добавляли 500 мл 1 % рас-

твора серной кислоты. Перемешивали и полученный раствор заливали в колбу и затем производили нагрев и выдержку раствора в течение 30 мин при температуре 120 °С.

Для приготовления 500 мл 1 % раствора серной кислоты понадобилось 5,34 мл 93,64 % кислоты и 494,66 мл дистиллированной воды. После кислотного гидролиза полученный раствор при-

обрёл бледно-жёлтую окраску. Далее его отфильтровывали на ручном вакуумном насосе. Твёрдая часть оставалась на фильтре в воронке Бюхнера, жидкая часть перетекала в колбу Бунзена. Полученная жидкость – раствор ксилозы.

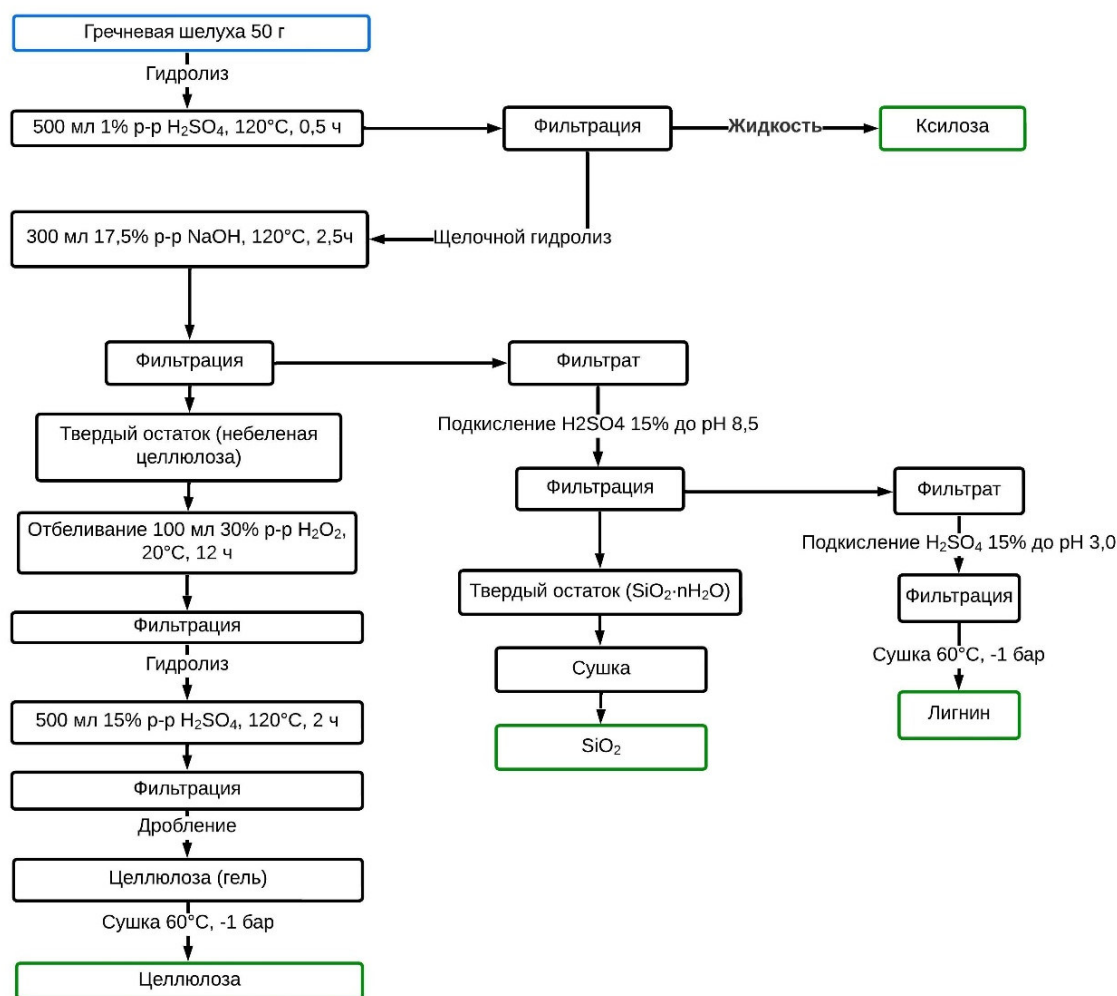


Рис. 5. Схема извлечения из гречишной шелухи лигнина, диоксида кремния и целлюлозы

Гречишную шелуху после кислотного гидролиза обрабатывали 300 мл 17,5 % раствора NaOH. Процесс щелочного гидролиза проходил при 120 °C в течение 2,5 ч. После гидролиза раствор приобрёл чёрный цвет. Далее раствор фильтровали с помощью водоструйного вакуумного насоса, для отделения жидкости содержащей лигнин и диоксид кремния от твёрдого остатка, содержащего небеленую целлюлозу. Твёрдый остаток на фильтре заливали 100 мл 30 % раствора перекиси водорода и перемешивали. Процесс отбеливания перекисью занял 12 ч. При этом цвет твёрдого остатка изменился с тёмно-коричневого на желтоватый. Затем полученный раствор отфильтровывали и твёрдый остаток подвергли кислотному гидролизу (500 мл 15 % серной кислоты) при 120 °C в течение 2 ч. После кислотного гидролиза целлюлоза приобретала светло-жёлтый оттенок. Затем полученный раствор отфильтровывали и промывали в 300 мл дистиллированной воды, а после измельчали для

получения целлюлозного геля. Полученный целлюлозный гель высушивали в вакуумной сушилке при 60 °C и давлении в 1 бар в течение 24 ч. Масса полученной целлюлозы составила 12,4 г.

Чёрный раствор, полученный после фильтрации на 2 этапе, подвергался подкислению 15 % раствором серной кислоты до значения pH $8,5 \pm 0,5$. Активность ионов водорода в растворе контролировалась при помощи прибора pH-150МИ. Когда раствор достигал необходимого значения pH, выпадал осадок в виде взвешенных частиц кремниевой кислоты. Для отделения твёрдых частиц раствор центрифугировался в установке Лаборио LC-12Plus при 10 000 об/мин ротора в течение 5 мин. Выпавший осадок высушивали в вакуумной сушилке при давлении в -1 бар и температуре в 60 °C в течение суток для получения диоксида кремния. Полученная жидкость

использовалась в следующем этапе. Масса полученного диоксида кремния для гречишной шелухи составила 1,9 г.

Жидкость, полученная после центрифугирования на 3 этапе, подвергалась подкислению 15 % раствором серной кислоты до значения pH $3,0 \pm 0,5$. После достижения раствором необходимого значения pH, происходило изменение цвета с чёрного на светло-коричневый и выпал осадок (лигнин). После центрифугирования лигнин высушивали в вакуумной сушилке при таких же параметрах, как и диоксид кремния. Масса полученного лигнина для гречишной шелухи составила 1,9 г.

На рис. 6 и табл. 2 представлены микроструктура, распределение элементов и усреднённый элементный состав целлюлозы, полученной из гречишной шелухи.

Таблица 2

Усреднённый элементный состав целлюлозы, полученной из гречишной шелухи в пересчёте к 100 %, вес. %

C	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca
53,57	45,59	0,09	—	—	0,42	0,27	—	0,06

Исходя из представленных данных можно сделать вывод, что полученная целлюлоза содержит небольшие примеси в виде атомов алюминия, кремния, калия и кальция. Наличие в полученном продукте атомов натрия и серы объясняется тем, что сульфат натрия – побочный продукт щелочных и кислотных гидролизом. После несложных методов очистки и промывки материала можно получить целлюлозу высокой степени чистоты.

На рис. 7 представлен ИК Фурье-спектр поглощения целлюлозы. Для всех материалов спектр поглощения целлюлозы идентичен. Согласно представленному спектру, можно сделать следующие выводы:

Пик 3412 см^{-1} относится к валентным колебаниям связей -ОН.

Пик 2937 см^{-1} соответствует валентным колебаниям связи -CH₂.

Пик 1596 см^{-1} связан с деформационными колебаниями НОН.

Пики в области $1500\text{--}1400\text{ см}^{-1}$ относятся к деформационным симметричным колебаниям связи -CH₂ОН, деформационным колебаниям плеча связи -СН.

Пик 1378 см^{-1} соответствует скелетным колебаниям связи -СН₂.

Пик 1330 см^{-1} относится к деформационному колебанию связи -СОН.

Пик 1120 см^{-1} связан с валентными колебаниями плеча пиранозного цикла.

Пик 1052 см^{-1} соответствует валентным колебаниям С-О-С мостика.

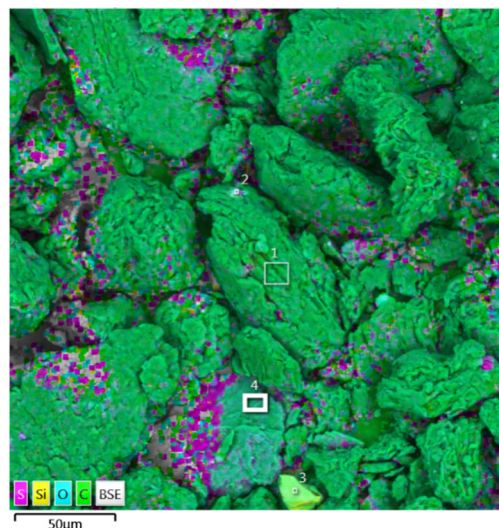


Рис. 6. Многослойная карта ЭДС целлюлозы, полученной из гречишной шелухи

Пик 899 см^{-1} относится к деформационным колебаниям плеча связи -СН и валентным асимметричным колебаниям С-О-С мостика.

Пик 616 см^{-1} соответствует деформационным колебаниям связи -ССО.

Пик 467 см^{-1} относится к колебаниям связи Si-ОН [14].

Таким образом, полосы поглощения представленного спектра соответствуют целлюлозе с небольшой примесью кремнийорганических соединений.

На рис. 8 и табл. 3 представлены микроструктура, распределение элементов и усреднённый элементный состав диоксида кремния, полученного из гречишной шелухи.

Исходя из представленных данных можно сделать вывод, что полученный диоксид кремния содержит много органических примесей, а также примеси в виде атомов алюминия, калия и кальция. Наличие в полученном продукте атомов натрия и серы объясняется тем, что сульфат натрия – побочный продукт химических манипуляций над шелухой. Добиться получения чистого диоксида кремния можно при прокаливании и промывке материала.

Результаты рентгенофазового анализа полученного диоксида кремния представлены на рис. 9. В результате анализа полученной дифрактограммы удалось выявить следующие фазы: значительную часть графика занимает аморфная фаза диоксида кремния в виде двухвершинного гало с пиковыми значениями $5,573\text{ Å}$ и $3,919\text{ Å}$, дифракционные отражения $3,367\text{ Å}$ и $2,601\text{ Å}$ соответствуют фазе углерода (карточка PDF-2: 50-926 Carbon).

На рис. 10 и табл. 4 представлены микроструктура, распределение элементов и усреднённый элементный состав лигнина, полученного из гречишной шелухи.

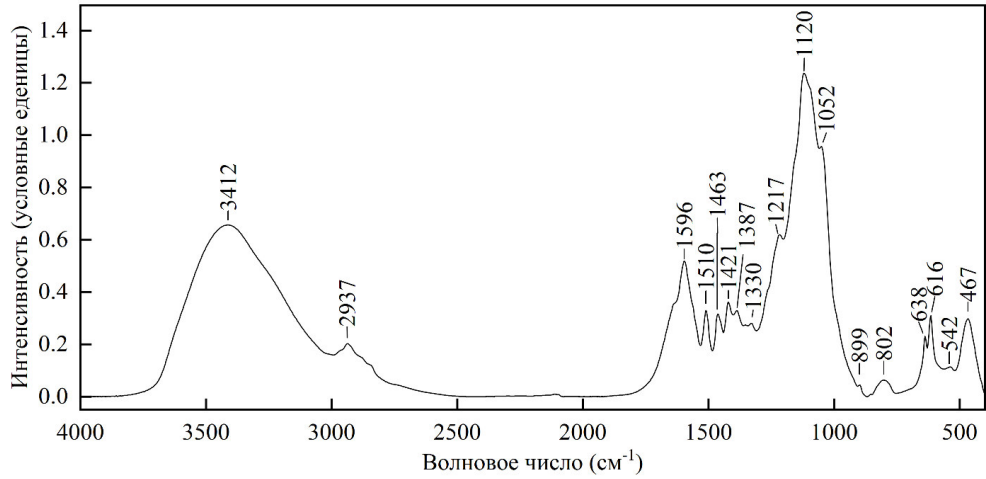


Рис. 7. ИК Фурье-спектр поглощения полученной целлюлозы

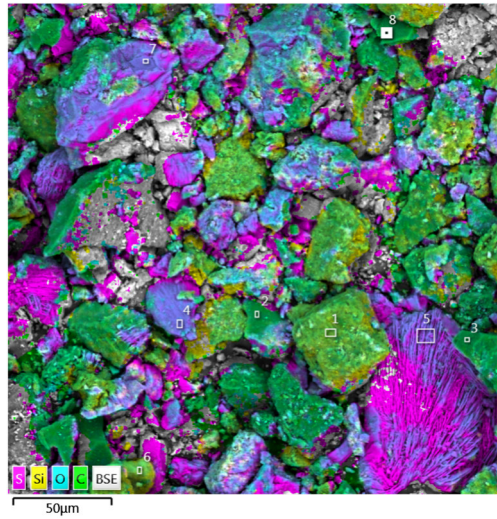


Рис. 8. Многослойная карта ЭДС диоксида кремния, полученного из гречишной шелухи

Таблица 3

Усреднённый элементный состав диоксида кремния, полученного из гречишной шелухи в пересчёте к 100 %, вес. %

C	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca
33,44	42,17	13,61	—	0,07	2,91	7,74	0,06	—

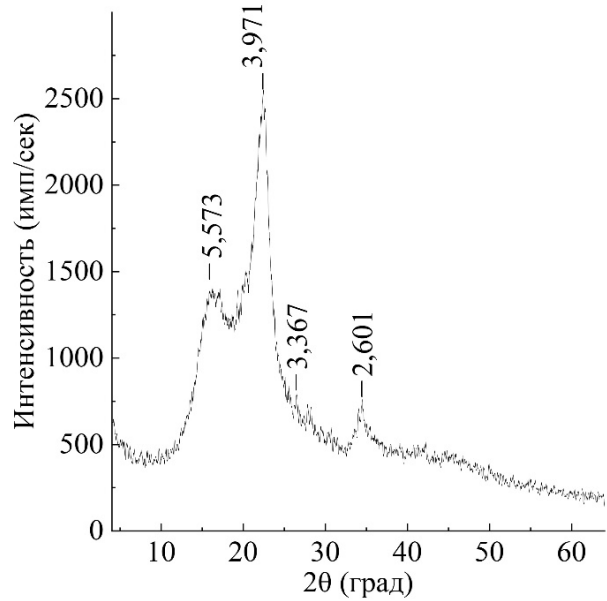


Рис. 9. Рентгенограмма полученного диоксида кремния

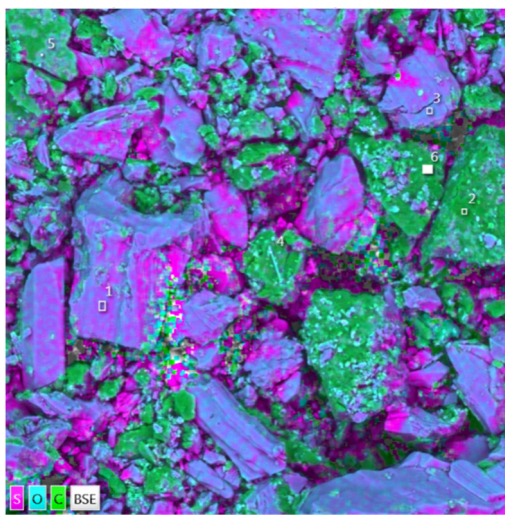


Рис. 10. Многослойная карта ЭДС лигнина, полученного из гречишной шелухи

Таблица 4
Усреднённый элементный состав лигнина, полученной из гречишной шелухи в пересчёте к 100 %, вес. %

C	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca
31,52	40,56	13,80	—	0,03	0,06	13,99	0,04	—

Исходя из представленных данных можно сделать вывод, что полученный лигнин содержит небольшие примеси в виде атомов алюминия, кремния, калия и кальция. Наличие в полученном продукте атомов натрия и серы объясняется тем, что побочным продуктом синтеза является сульфат натрия. Для получения лигнина высокой степени чистоты необходимо хорошо промыть полученный материал.

На рис. 11 представлен ИК Фурье-спектр поглощения лигнина. Для всех материалов спектр

поглощения лигнина идентичен. Согласно представленному спектру, можно сделать следующие выводы:

Пик 3412 см^{-1} относится к валентным колебаниям связей -OH .

Пик 2936 см^{-1} соответствует валентным колебаниям связи -CH_2 .

Пик 2852 см^{-1} – колебания связи -CH_3 .

Пик 1698 см^{-1} относится к колебаниям связи C=O .

Пики 1601 и 1513 см^{-1} связаны с колебаниями бензольного кольца.

Пик 1463 см^{-1} соответствует колебаниям плеча связи -CH_2 .

Пик 1424 см^{-1} относится к колебаниям связи -CH_3 .

Пик 1328 см^{-1} связан с деформационными колебаниями связи -OCH_3 .

Пик 1218 см^{-1} – плоскостные колебания фенольного кольца.

Пик 1125 см^{-1} связан с сирингильной ароматикой (наложение полос поглощения фенольного и нефенольного кольца).

Пик 1033 см^{-1} соответствует валентным колебаниям связи C-O-C .

Пик 986 см^{-1} относится к деформационным колебаниям плеча связи -CH и валентным асимметричным колебаниям C-O-C мостика.

Пик 616 см^{-1} соответствует деформационным колебаниям связи -CCO .

Подведя итог, полосы поглощения представленного спектра поглощения соответствуют лигнину [15].

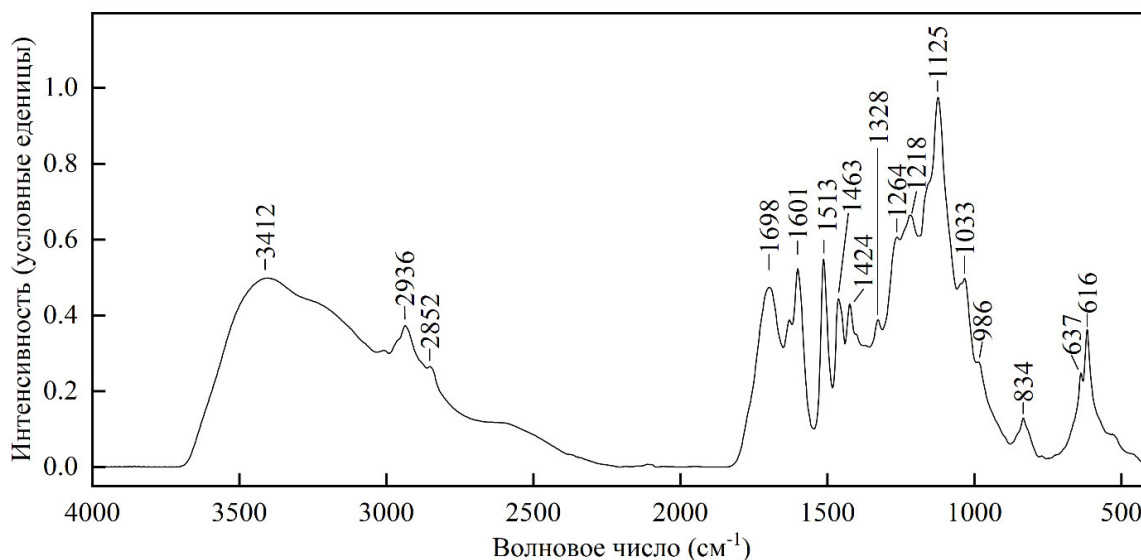


Рис. 11. ИК Фурье-спектр поглощения полученного лигнина

Выводы. В исследовании предложен эффективный метод извлечения ценных продуктов из гречишной шелухи, таких как целлюлоза, лигнин и диоксид кремния. Комбинирование простых

фаз и высокая степень выхода продуктов рассматриваются как ключевые преимущества предложенного метода.

Рентгеновская дифракция отражает наличие аморфных фракций кремнезема. Морфологический анализ, выполненный с использованием сканирующей электронной микроскопии, показал наличие структуры частиц целлюлозы и мелких частиц лигнина и диоксида кремния неправильной формы. Содержание углерода более 30 % и 50 % в соединениях лигнина и целлюлозы, соответственно, соответствует углеводородам, присутствующим в биомассе, указывая на высокую энергетическую ценность данных материалов.

Результаты данного исследования могут быть использованы для выделения ценных продуктов из других видов растительных отходов, что обеспечит экономическую целесообразность и позволит сократить экологическую нагрузку.

Таким образом, характеристики и методы обработки, представленные в данном исследовании, создают надежную основу для будущих исследований, направленных на использование этих биоматериалов в сферах зеленого сельского хозяйства, защиты окружающей среды и разработки новых биоматериалов, что подчеркивает важность процессов переработки сельскохозяйственных отходов для устойчивого развития.

Источник финансирования. Исследование выполнено в рамках государственного задания Минобрнауки России № FZWN-2024-0001 с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В. Г. Шухова.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ковальченко Н.А., Коршик Т.С., Калатоzi В.В. Конверсионный подход комплексной переработки отходов кофейного производства для решения экологических проблем // Вестник БГТУ имени В.Г. Шухова. 2015. № 4. С. 172–175.
2. Cherkashina N.I., Kuprieva O.V., Pushkarskaya D.V., Kashibadze N.V., Shrubchenko L.F. Modification of buckwheat husk powder and creation of composite material on its basis // Physica Scripta. 2024. Vol. 99. 105921. DOI: 10.1088/1402-4896/ad723d.
3. Yu B., Fan G., Zhao S., Lu Y., He Q., Cheng Q., Yan J., Chai B., Song G. Simultaneous isolation of cellulose and lignin from wheat straw and catalytic conversion to valuable chemical products // Applied Biological Chemistry. 2021. Vol. 64. Pp. 1–13. DOI: 10.1186/s13765-020-00579-x.
4. Prosvirnikov D.B., Safin R.G., Zakirov S.R. Microcrystalline Cellulose Based on Cellulose Containing Raw Material Modified by Steam Explosion Treatment. Solid State Phenomena // Trans Tech Publications. 2018. Vol. 284. Pp. 773–778. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.284.773.
5. Prosvirnikov D.B., Timerbaev N.F., Safin R.G. Microcrystalline Cellulose from Lignocellulosic Material Activated by Steam Explosion Treatment and Mathematical Modeling of the Processes Accompanying its Preparation. // Materials Science Forum. 2019. Vol. 945. Pp. 911–918. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.945.911.
6. Клинецвич В.Н., Флюрик Е.А. Способы использования лузги гречихи посевной // Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология. 2020. № 1. С. 68–81.
7. Habibi Y., Lucia L.A., Rojas O.J. Cellulose nano-crystals chemistry, self-assembly, and applications // Chemical Reviews. 2010. Vol. 110. Pp. 3479–3500. DOI: 10.1021/cr900339w
8. Khadija El Bourakadi, Fatima-Zahra Semlali, Maryama Hammi, Mounir El Achaby. A review on natural cellulose fiber applications: Empowering industry with sustainable solutions // International journal of biological macromolecules. 2024. Vol. 281. 135773. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.135773.
9. Hasan M.S., Sardar M.R., Shafn A., Rahman M.S., Mahmud M., Hossen M.M. A Brief Review on Applications of Lignin // Journal of Chemical Reviews. 2022. Vol. 5. Pp. 56–82. DOI: 10.22034/JCR.2023.359861.1186.
10. Atika A., Fahriya P.S., Asma S., Witta K.R., Melati S., Nurhani A., Widya F., Adarsh K. Current roles of lignin for the agroindustry: Applications, challenges, and opportunities // International Journal of Biological Macromolecules. 2023. Vol. 240. 124523. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2023.124523
11. Muhamud A.M., Gupta N.K. Nanostructured SiO₂ material: synthesis advances and applications in rubber reinforcement // RSC Advances. 2022. Vol. 29. Pp. 18524–18546. <https://doi.org/10.1039/d2ra02747j>
12. Валеева А.Р., Гареев Б.И., Ситнов С.А., Соколова А.Г., Готлиб Е.М. Износостойкие эпоксидные материалы, наполненные продуктами переработки рисовой и гречневой шелухи // Экономика строительства. 2022. № 8. С. 46–54.
13. Глаголева Л.Э., Губин А.С., Александрова А.В., Коротких И.В. Определение функциональных групп растительных комплексов зеленой гречки методом ИК-спектроскопии // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2017. № 4. С. 57–60.
14. Hivechi A., Bahrami H., Siegel R., Milan P., Amoupour M. In vitro and in vivo studies of biaxially electrospun poly(caprolactone)/gelatin nanofibers, reinforced with cellulose nanocrystals, for wound healing applications // Cellulose. 2020. Vol. 27. Pp. 5179–5196. DOI: 10.1007/s10570-020-03106-9.
15. Rui D., Hongchao W., Mahendra T., Nicola B., Michael R.K. Processing and Characterization of

Low-Cost Electrospun Carbon Fibers from Organosolv Lignin/Polyacrylonitrile Blends // Carbon.

2016. Vol. 100. Pp. 126–136. DOI: 10.1016/j.carbon.2015.12.078.

Информация об авторах

Черкашина Наталья Игоревна, доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник научной-исследовательской лаборатории «Разработка научно-технических основ создания полимерных систем из возобновляемого растительного сырья». E-mail: natalipv13@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Ручий Артем Юрьевич, аспирант кафедры теоретической и прикладной химии. E-mail: artiem.ruchii.99@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Синебок Дарья Александровна, аспирант кафедры теоретической и прикладной химии. E-mail: sinebokd@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Самойлова Юлия Михайловна, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры информационно-компьютерных технологий в деятельности органов внутренних дел. E-mail: y.samoylova.bel@mail.ru. Белгородский юридический институт МВД России имени И.Д. Путилина, Россия, 308024, Белгород, ул. Горького, 71.

Баринов Роман Алексеевич студент кафедры теоретической и прикладной химии. E-mail: barinovroman216@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 13.12.2024 г.

© Черкашина Н.И., Ручий А.Ю., Синебок Д.А., Самойлова Ю.М., Баринов Р.А., 2025

¹*Cherkashina N.I., ¹Ruchiy A.Yu., ^{1,*}Sinebok D.A., ²Samoylova Yu.M., ¹Barinov R.A.*

¹*Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*

²*Putilin Belgorod Law Institute of Ministry of the Interior of Russia*

**E-mail: sinebokd@mail.ru*

PRODUCTION, COMPOSITION AND PROPERTIES OF SILICON- AND CARBON-CONTAINING PRODUCTS OF BUCKWHEAT HUSK PROCESSING

Abstract. *Although the efficient use of biomass waste can significantly help in solving environmental problems, there are a number of challenges that researchers face. The question of efficient extraction of valuable components arises due to the close relationship between the components of biomass.*

This paper investigates the possibility of extracting valuable products from buckwheat husks, which are a significant multi-tonnage by-product of buckwheat processing. The main attention is paid to the processes of obtaining cellulose, lignin and silicon dioxide using acid and alkaline treatment. Analyses were carried out, including X-ray, IR spectroscopic and thermal, which made it possible to establish the physicochemical properties of the synthesized products, their morphology and composition. It was found that the obtained cellulose contains minor impurities and is characterized by a high degree of purity, and lignin and silicon dioxide demonstrate high energy value.

The final products obtained as a result of this process were cellulose particles and fine particles of silicon dioxide and lignin with a heterogeneous shape. The lignocellulose products contained more than 30% carbon by weight. The resulting silica product had an amorphous structure. The result of this study contributes to the expansion and development of a simple and efficient process for converting biomass waste into sustainable, value-added materials, ensuring economic feasibility and reducing environmental impact. The results can serve as a basis for further research in the field of extracting valuable components from other types of plant waste, highlighting the importance of these processes for sustainable development and environmental protection.

Keywords: *buckwheat husk, cellulose, lignin, silicon dioxide, plant waste*

REFERENCES

1. Koval'chenko N.A., Korshikov T.S., Kalatozov V.V. Conversion approach integrated waste

management coffee production to address environmental issues [Konversionnyj podhod kompleksnoj pererabotki othodov kofejnogo proizvodstva dlya resheniya ekologicheskikh problem]. Bulletin of

BSTU named after V.G. Shukhov. 2015. No. 4. Pp. 172–175. (rus)

2. Cherkashina N.I., Kuprieva O.V., Pushkarskaya D.V., Kashibadze N.V., Shrubchenko L.F. Modification of buckwheat husk powder and creation of composite material on its basis. *Physica Scripta*. 2024. Vol. 99. 105921. DOI: 10.1088/1402-4896/ad723d

3. Yu B., Fan G., Zhao S., Lu Y., He Q., Cheng Q., Yan J., Chai B., Song G. Simultaneous isolation of cellulose and lignin from wheat straw and catalytic conversion to valuable chemical products. *Applied Biological Chemistry*. 2021. Vol. 64. Pp. 1–13. DOI: 10.1186/s13765-020-00579-x

4. Prosvirnikov D.B., Safin R.G., Zakirov S.R. Microcrystalline Cellulose Based on Cellulose Containing Raw Material Modified by Steam Explosion Treatment. *Solid State Phenomena*. Trans Tech Publications. 2018. Vol. 284. Pp. 773–778. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.284.773.

5. Prosvirnikov D.B., Timerbaev N.F., Safin R.G. Microcrystalline Cellulose from Lignocellulosic Material Activated by Steam Explosion Treatment and Mathematical Modeling of the Processes Accompanying its Preparation. *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 945. Pp. 911–918. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.945.911.

6. Klintsavich V.N., Flyurik E.A. Methods of use of buckwheat husk and sowing (review) [Sposoby ispol'zovaniya luzgi grechihi posevnoj]. *Trudy BGTU. Seriya 2: Himicheskie tekhnologii, biotekhnologiya, geoekologiya*. 2020. No. 1. Pp. 68–81. (rus)

7. Habibi Y., Lucia L.A., Rojas O.J. Cellulose nano-crystals chemistry, self-assembly, and applications. *Chemical Reviews*. 2010. Vol. 110. Pp. 3479–3500. DOI: 10.1021/cr900339w

8. Khadija El Bourakadi, Fatima-Zahra Semlali, Maryama Hammi, Mounir El Achaby. A review on natural cellulose fiber applications: Empowering industry with sustainable solutions. *International journal of biological macromolecules*. 2024. Vol. 281. 135773. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.135773.

9. Hasan M.S., Sardar M.R., Shafn A., Rahman M.S., Mahmud M., Hossen M.M. A Brief Review on Applications of Lignin. *Journal of Chemical Reviews*. 2022. Vol. 5. Pp. 56–82. DOI: 10.22034/JCR.2023.359861.1186.

10. Atika A., Fahriya P.S., Asma S., Witta K.R., Melati S., Nurhani A., Widya F., Adarsh K. Current roles of lignin for the agroindustry: Applications, challenges, and opportunities. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2023. Vol. 240. 124523. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2023.124523

11. Muhammad A.M., Gupta N.K. Nanostructured SiO₂ material: synthesis advances and applications in rubber reinforcement. *RSC Advances*. 2022. Vol. 29. Pp. 18524–18546. DOI: 10.1039/d2ra02747j

12. Valeeva A.R., Gareev B.I., Sitnov S.A., Sokolova A.G., Gotlib E.M. Wear-resistant epoxy materials filled with rice and buckwheat husk products [Iznosostojkie epoksidnye materialy, napolnennye produktami pererabotki risovoj i grechnevoj sheluhi]. *Ekonomika stroitel'stva*. 2022. No 8. Pp. 46–54.

13. Glagoleva L.E., Gubin A.S., Aleksandrova A.V., Korotkih I.V. Determination of the functional groups of the green buckwheat plant complexes by infrared spectroscopy method [Opredelenie funktsional'nykh grupp rastitel'nykh kompleksov zelenoj grechki metodom IK-spektroskopii]. *Vestnik rossijskoj sel'skohozyajstvennoj nauki*. 2017. No. 4. Pp. 57–60.

14. Hivechi A., Bahrami H., Siegel R., Milan P., Amoupour M. In vitro and in vivo studies of bi-axially electrospun poly(caprolactone)/gelatin nanofibers, reinforced with cellulose nanocrystals, for wound healing applications. *Cellulose*. 2020. Vol. 27. Pp. 5179–5196. DOI: 10.1007/s10570-020-03106-9.

15. Rui D., Hongchao W., Mahendra T., Nicola B., Michael R.K. Processing and Characterization of Low-Cost Electrospun Carbon Fibers from Organosolv Lignin/Polyacrylonitrile Blends. *Carbon*. 2016. Vol. 100. Pp. 126–136. DOI: 10.1016/j.carbon.2015.12.078.

Information about the authors

Cherkashina, Natalia I. DSc, associate professor. E-mail: natalipv13@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Ruchiy, Artem Y. Postgraduate student. E-mail: artiem.ruchii.99@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Sinebok, Darya A. Postgraduate student. E-mail: sinebokd@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Samoilova, Yulia M. PhD, Senior lecturer. E-mail: y.samoylova.bel@mail.ru. Putilin Belgorod Law Institute of Ministry of the Interior of Russia, 308024, Belgorod, Gorky St., 71.

Barinov, Roman A. Student. E-mail: barinovroman216@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 13.12.2024

Для цитирования:

Черкашина Н.И., Ручий А.Ю., Синебок Д.А., Самойлова Ю.М., Баринов Р.А. Получение, состав и свойства кремний- и углеродсодержащих продуктов переработки шелухи гречихи // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 6. С. 95–106. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-6-95-106

For citation:

Cherkashina N.I., Ruchiy A.Yu., Sinebok D.A., Samoylova Yu.M., Barinov R.A. Production, composition and properties of silicon- and carbon-containing products of buckwheat husk processing. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 6. Pp. 95–106. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-6-95-106