

ВЫДЕЛЕНИЕ И АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ ИЗ РАСТЕНИЙ РОДА РЕЙНУТРИЯ

К.С. Черепанова, И.А. Черенков, Т.Б. Медведева, Н.В. Громов

Ксения Сергеевна Черепанова (ORCID 0009-0009-5572-8748), Илья Александрович Черенков (ORCID 0009-0008-3054-7142), Николай Владимирович Громов (ORCID 0000-0003-3457-5104)*

Отдел нетрадиционных каталитических процессов Института катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, пр. Ак. Лаврентьева, 5, Новосибирск, Российская Федерация, 630090

Кафедра инженерных проблем экологии, Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20 к 3, Новосибирск, Российская Федерация, 630073

E-mail: cherepanova@catalysis.ru*, gromov@catalysis.ru*, cherenkov@catalysis.ru

Татьяна Борисовна Медведева (ORCID 0000-0001-5444-430X)

Отдел нетрадиционных каталитических процессов Института катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, пр. Ак. Лаврентьева, 5, Новосибирск, Российская Федерация, 630090

Лаборатория НМ ТПТО, Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20 к 3, Новосибирск, Российская Федерация, 630073

E-mail: tanmedvedeva@catalysis.ru

Заражение экосистем инвазивными видами представляется одной из существенных экологических проблем. К числу особенно опасных растений в России отнесены виды рода рейнутрия (Reynoutria). При борьбе с инвазивными видами целесообразно рассмотреть перспективы использования их биомассы как источника для получения востребованных продуктов. В данной работе исследованы возможности получения и использования целлюлозы из биомассы рейнутрии. Впервые методами азотнокислой обработки и окислительной делигнификации получены образцы целлюлозы из растений данного биологического рода. Исходная биомасса и выделенные целлюлозы охарактеризованы по компонентному составу и степени полимеризации. Найдено, что в выделенных образцах содержание целлюлозы достигает 75 мас.%, α -целлюлозы 67 мас.%. Определено, что степень делигнификации достигает 68 % при обработке рейнутрии методом окислительной делигнификации, а содержание целлюлозы увеличено с 42 до 63–75 мас.%. Путем кислотного гидролиза технической целлюлозы, выделенной методом окислительной делигнификации (РС-ОД), получена микроразмерная целлюлоза (РС-ОД-Г). В работе проанализирована перспективность использования целлюлозных материалов, полученных из рейнутрии, в сравнении с коммерческими видами целлюлозы. Определено, что полученный в данной работе методом окислительной делигнификации образец целлюлозы является перспективным для производства различных видов бумаги и картона, т.к. по определенным в данной работе характеристикам совпадает с коммерческой целлюлозой (ГОСТ 3914-89, 6501-82, 23482-84, 11208-82). Дальнейшая очистка от минеральных компонентов и увеличение доли α -целлюлозы позволит существенно расширить диапазон потенциального применения в таких областях как производство вискозы, бумаги для электротехнических приложений, ацетатов целлюлозы.

Ключевые слова: целлюлоза, рейнутрия, делигнификация, окислительная делигнификация, обработка азотной кислотой

Для цитирования:

Черепанова К.С., Черенков И.А., Медведева Т.Б., Громов Н.В. Выделение и анализ перспектив использования целлюлозы из растений рода Рейнутрия. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2026. Т. 69. Вып. 9. С. 114–125. DOI: 10.6060/ivkkt.20266909.7011.

For citation:

Cherepanova X.S., Cherenkov I.A., Medvedeva T.B., Gromov N.V. Isolation and analysis of the prospects for using cellulose from plants of the genus Rainutria. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2026. V. 69. N 9. P. 114–125. DOI: 10.6060/ivkkt.20266909.7011.

ISOLATION AND ANALYSIS OF THE PROSPECTS FOR USING CELLULOSE FROM PLANTS OF THE GENUS *REYNOUTRIA*

K.X. Cherepanova, I.A. Cherenkov, T.B. Medvedeva, N.V. Gromov

Xeniia S. Cherepanova (ORCID 0009-0009-5572-8748), Iliia A. Cherenkov (ORCID 0009-0008-3054-7142), Nikolay V. Gromov (ORCID 0000-0003-3457-5104)*

Department of Nonconventional Catalytic Processes, Boreskov Institute of Catalysis of SB of the RAS, Lavrentyev ave., 5, Novosibirsk, 630090, Russia

Department of Engineering Problems of Ecology, Novosibirsk State Technical University, K. Marx ave., 20, Novosibirsk, 630073, Russia

E-mail: cherepanova@catalysis.ru*, gromov@catalysis.ru*, cherenkov@catalysis.ru

Tatiana B. Medvedeva (ORCID 0000-0001-5444-430X)

Department of Nonconventional Catalytic Processes, Boreskov Institute of Catalysis of SB of the RAS, Lavrentyev ave., 5, Novosibirsk, 630090, Russia

Laboratory of New Materials and Technologies for Technogenic Waste Processing, Novosibirsk State Technical University, K. Marx ave., 20, Novosibirsk, 630073, Russia

E-mail: tanmedvedeva@catalysis.ru

The ecosystem infestation with invasive species is one of the most significant environmental problems. Species of the genus *Reynoutria* are considered particularly dangerous plants in Russia. When combating invasive species, it is advisable to consider the prospects of using their biomass as source to obtain products in demand. In this work, the possibilities of isolation and using cellulose from *Reynoutria* biomass were investigated. For the first time, cellulose samples from plants of this biological genus were obtained using nitric acid treatment and oxidative delignification methods. The initial biomass and cellulose isolated were characterized in terms of their component composition and degree of polymerization. It was found that the cellulose content in the samples isolated reached 75 wt.%, and the α -cellulose content reached 67 wt.%. It was determined that the degree of delignification reaches 68 % when *Reynoutria* is treatmented by oxidative delignification, and the cellulose content is increased from 42 to 63-75 wt.%. Micro-sized cellulose (PC-ОД-Г) was obtained by acid hydrolysis of technical cellulose isolated by the oxidative delignification method (PC-ОД). The potential for using cellulose materials obtained from *Reynoutria* in comparison with commercial types of cellulose is analyzed in this paper. It was determined that the cellulose sample obtained in this work by oxidative delignification is promising for the production of various types of paper and cardboard, since according to the characteristics determined in this work, it coincides with commercial cellulose (State Standard 3914-89, 6501-82, 23482-84, 11208-82). Further purification from mineral components and an increase in the proportion of α -cellulose will significantly expand the range of potential applications in areas such as the production of viscose, paper for electrical engineering applications, and cellulose acetates.

Keywords: cellulose, reynoutria, delignification, oxidative delignification, nitric acid treatment

ВВЕДЕНИЕ

Благодаря своим уникальным свойствам, высокой доступности, значительному ежегодному приросту и накоплению целлюлоза признана одним из наиболее важных природных полимеров [1, 2], а интерес к ней в России поддерживают стремление к достижению сырьевого и технологического суверенитета, необходимость сокращения времени подготовки сырья, а также стремительное развитие области исследования материалов. Техническая целлюлоза, в зависимости от ее чистоты, применяется в

бумажной промышленности, очистке воды и воздуха в качестве основы фильтрационных материалов и адсорбентов [3-5], производстве электроизоляционных материалов [6, 7]. Микрокристаллическая целлюлоза является сырьем для приготовления ее сложных и простых эфиров, привитых сополимеров, используемых в производстве бездымного пороха (нитроцеллюлоза), пластмасс и пленок (ацетат целлюлозы), загустителей и клеев (карбоксиметилцеллюлоза) и т.д. [12-15]. Микро-, нано-целлюлоза высокой степени чистоты могут ис-

пользоваться в производстве более сложных материалов, например огнеупорной керамики, фарфора и пластмасс благодаря гигроскопичности, связующей способности и стабильности [8, 9]. Целлюлозные материалы и композиции также могут применяться в качестве стабилизаторов и эмульгаторов в лакокрасочной, пищевой, фармацевтической и косметической отраслях [10-12].

При поиске перспективных источников целлюлозы стоит затронуть следующие аспекты, касающиеся традиционного сырья. Климатические условия большей части России практически исключают крупнотоннажное выращивание хлопка – одного из основных коммерческих источников целлюлозы. В России активно применяется древесная биомасса, что требует аккуратного подхода с точки зрения экологии. Известно, что интенсивная вырубка лесов приводит к деградации экосистем и сокращению биоразнообразия. Кроме того, древесина требует довольно длительного выращивания (60-140 лет) [16], что увеличивает затраты на уход за деревьями и снижает общую эффективность лесозаготовительной деятельности. По данным открытых источников [17] за 2021-2022 гг. РФ импортировала 518 тыс. т целлюлозы, в связи с чем растет актуальность поиска новых отечественных источников этого полимера.

Среди перспективных групп сырья для выделения целлюлозы, произрастающих на территории РФ, которые позволяют снизить нагрузку на лесные ресурсы, можно выделить инвазивные виды. По мнению специалистов Главного ботанического сада им. Н.В. Цицина РАН сегодня в перечень наиболее опасных инвазий для России входят растения рода рейнутрии (лат. *Reynoutria*) [18]. Рейнутрия японская, лат. *Reynoutria japonica* и Рейнутрия богемская, лат. *Reynoutria bohemica*) [19] внесены в «Черную» книгу флоры средней полосы, а в Европейских странах эти виды считаются одними из наиболее опасных. Будучи инвазивным видом, биомасса рейнутрии может рассматриваться как отход и сырье для производства целлюлозы после зачистки территорий, занятых сорняком [20]. Исследования по переработке рейнутрии в целлюлозу с получением бумаги проводятся в Центральном исследовательском институте технической целлюлозы и бумаги («Central Pulp & Paper Research Institute», Словения). Данная группа – одна из немногих, кто затрагивает использование инвазивных видов, в том числе рейнутрии, в целлюлозно-бумажной промышленности. Однако, стоит отметить, что исследователи применяют близкие к традиционным методы для переработки биомассы рейнутрии в бумагу и

добавки к ней. В т.ч. сульфатный метод (Крафт-процесс), для которого характерно существенное образование сточных вод, а целлюлозные материалы не отличаются высокой степенью чистоты [21-23].

В свою очередь, в РФ разработка методов выделения целлюлозы из древесных и недревесных источников в лабораторных и пилотных масштабах успешно ведется научными группами с начала XXI в. [24-27]. Показана возможность получения высококачественных целлюлозных материалов с низким содержанием примесей, в т.ч. нитроцеллюлозы. В Институте проблем химико-энергетических технологий СО РАН был разработан и успешно применен метод азотнокислой обработки травянистой культуры мискантуса и сельскохозяйственного отхода шелухи овса [28-30]. Также можно отметить работы, проведенные в Институте химии и химической технологии СО РАН и СибГТУ по переработке древесной биомассы методом окислительной делигнификации [31, 32].

Однако работы по выделению целлюлозы из рейнутрии в России на сегодняшний день не проводились. В данном исследовании мы рассматриваем возможность выделения целлюлозы из Рейнутрии сахалинской методами азотнокислой обработки и окислительной делигнификации, как эффективных подходов получения целлюлозы из нетрадиционных источников. Также проведено сравнение характеристик полученных целлюлозных материалов с коммерческими видами целлюлозы и отмечены перспективные направления ее использования.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Определение компонентного состава

Исследования перспектив применения целлюлоз, выделяемых методами окислительной делигнификации и азотнокислой обработки, проводены с использованием биомассы Рейнутрии сахалинской (лат. *Reynoutria sachalinensis*).

Влажность сырья определена гравиметрически высушиванием до постоянной массы при 103 °С [33]. Определение доли минеральных компонентов включало озоление биомассы и 4-ч прокалывание остатка в муфельной печи при 575 °С [33]. Экстрагирование биомассы для нахождения доли экстрактивных соединений осуществлялось в аппарате Сокслета в присутствии диэтилового эфира [33]. Содержание компонента лигнина было найдено по методике [33] с применением 72% H₂SO₄. Определение гемицеллюлоз проводилось с помощью ВЭЖХ анализа гидролизата (2% HCl) с предвари-

тельной дериватизацией 2,4-динитрофенилгидразином [34]. С помощью метода Кюршнера была определена доля целлюлозной части с использованием азотно-спиртовой смеси [33].

Компонентный состав образцов технической целлюлозы определен по вышеописанным методикам, кроме остаточного лигнина, который определяли в присутствии 86% H_2SO_4 [33]. Количество α -целлюлозы найдено согласно ГОСТ 6840-78 [35] обработкой целлюлозы растворами NaOH. Степени полимеризации целлюлозных образцов найдены согласно ГОСТ 25438-82 [36]. В качестве растворителя применялся кадоксен.

Выделение образцов технической целлюлозы

Выделение целлюлозы азотнокислой варкой проводили способом, описанным в работе [30]. Процесс заключался в обработке растительного сырья растворами HNO_3 (0,2-4%) и NaOH (1-2%). Стекланный реактор с растительным сырьем и раствором помещали на перемешивающую платформу LS-110 (Лоип, Россия). Параметрами процесса были: частота вращения платформы 120 об/мин, гидромодуль 1/15, температура процесса 65-95 °С, время процесса (2-5 ч). Между стадиями содержимое колбы пропускали через бумажный фильтр «Белая лента», а твердый осадок промывали горячей дистиллированной водой до нейтральной реакции сточных вод. После финальной обработки содержимое фильтра высушивали до постоянной массы при 103 °С.

Процесс окислительной делигнификации осуществлялся также в стеклянном реакторе в смеси « H_2O_2 – CH_3COOH – H_2O » (концентрации 6, 30, 64 масс.%, соответственно) в присутствии катализатора ZrO_2 . Реакция проводилась в следующих условиях: температура процесса 100 °С, время процесса 4 ч, гидромодуль 1/26 соотношение катализатор/субстрат – 1/100. Содержимое реактора пропускали через фильтр «Синяя лента». Твердый остаток промывали горячей деионизированной водой до нейтральной реакции сточных вод и высушивали при 103 °С до постоянной массы.

Гидролиз технической целлюлозы

Образец технической целлюлозы РС-ОД, полученный методом окислительной делигнификации, подвергался кислотному гидролизу по методике, описанной в работе [37]. Процесс проходил в среде 65% H_2SO_4 при гидромодуле 1/8,75 и температуре 45 °С в течение 45 мин. Гидролиз останавливали добавлением 10-кратного объема воды. Содержимое реактора центрифугировали 30 мин при 4700 об/мин (Sigma, Германия), промывали водой и подвергали ультразвуковой обработке (Сап-

фир, Россия). Полученный осадок высушивали с помощью лиофильной камеры (BioBase, Китай). Образец получил название РС-ОД-Г.

Физико-химические методы исследования

Исследования поверхности образцов проводили при помощи двухлучевого сканирующего микроскопа Solaris S900 (Tescan, Чехия) при энергии электронов зонда 20 кэВ. Пробоподготовка включала нанесение исследуемого образца на проводящий углеродный скотч и напыление тонкой золотой пленки толщиной около 5 нм.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Обнаружено, что исследуемый образец рейнутрии главным образом содержит целлюлозу – 42 масс.% (рис. 1). Доля легкогидролизуемых сахаров рейнутрии составляет 19 масс.%, при этом гемицеллюлозы в основном представлены ксиланом (до 91 мас.%). Остальные компоненты представлены минеральными (до 6 масс.%) и экстрактивными (до 1 масс.%) веществами.



Рис. 1. Компонентный состав биомассы Рейнутрии сахалинской (1 – целлюлоза, 2 – гемицеллюлозы, 3 – лигнин, 4 – минеральные вещества, 5 – экстрактивные вещества)

Fig. 1. Component composition of *Reynoutria sachalinensis* biomass (1 – cellulose, 2 – hemicellulose, 3 – lignin, 4 – minerals, 5 – extractives)

Выделение технической целлюлозы

Для Рейнутрии сахалинской метод азотнокислой варки оказался неэффективным в отношении удаления лигнина (рис. 2, табл. 1), в то время как с помощью окислительной делигнификации удалось снизить содержание лигнина с 28 до 9 масс.%. Максимальная степень делигнификации рейнутрии составила 67,9 масс.%. Среди преимуществ образца РС-А перед РС-ОД отмечается более низкое содержание минеральных компонентов (0,15 и 8,00 масс.%). Из-за высокого количества нецеллюлозных примесей в РС-А, образцы технической целлюлозы, выделенные из рейнутрии некорректно сравнивать по степени полимеризации и содержанию α -целлюлозы с другими образцами. Можно отметить лишь то, что для образца РС-ОД СП составила 1800, а α -целлюлоза обнаружена в количестве 67 масс.%.

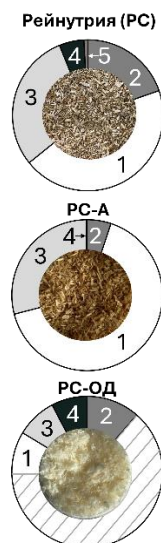


Рис. 2. Компонентный состав биомассы *Reynoutria sachalinensis* и целлюлозосодержащих образцов, полученных методом азотной варки (РС-А) и окислительной делигнификации (РС-ОД) (1 – целлюлоза и α -целлюлоза (штрих), 2 – гемицеллюлозы, 3 – лигнин, 4 – минеральные вещества, 5 – экстрактивные вещества)

Fig. 2. Component composition of *Reynoutria sachalinensis* biomass and cellulose contained samples obtained by nitric acid pulping (PC-A) and oxidative delignification (PC-ОД) (1 – cellulose and α -cellulose (hatching), 2 – hemicellulose, 3 – lignin, 4 – minerals, 5 – extractives)

Получение микроразмерной целлюлозы путем кислотного гидролиза

Путем кислотного гидролиза образца технической целлюлозы РС-ОД, выделенного из рейннурии методом окислительной делигнификации, был получен образец РС-ОД-Г. Для определения размера частиц и его структуры образец был исследован методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Определено, что кислотный гидролиз образца РС-ОД позволяет получить частицы целлюлозы со средним размером 5 мкм. На поверхности частиц, выделенных из рейннурии, обнаружены наноразмерные волокна, предположительно указывающие на формирование нановолокон с диаметром ~ 110 нм и низким соотношением длина / толщина (рис. 3).

Перспективы применения полученных целлюлозных материалов

На основании экспериментальных данных о составе полученных целлюлозных материалов изучены перспективы их применения. В данной части работы мы сравнили выделенные и коммерческие образцы целлюлозы по составу (α -целлюлоза, зола, С5 сахара, смолы и жиры, влажность), а также по степени делигнификации и полимеризации (табл. 2, 3).

Таблица 1

Основные характеристики исходной биомассы рейннурии и выделенных образцов технической целлюлозы

Table 1. Main characteristics of the initial biomass of *Reynoutria* and isolated samples of technical pulp

Образец	Состав, масс. %					СД, %	Вых, масс. %	В, масс. %	СП
	Ц	α -Ц	Л	Г	МВ				
РС	42,0	56,0	28,0	18,6	5,0	-	-	17,5	-
РС-А	63,0	-	27,6	4,9	0,15	1,4	59,7	2,5	-
РС-ОД	75,0	67,0	9,0	11,9	8,0	67,9	53,0	2,5	1800

Примечания. Ц – целлюлоза, α -Ц – α -целлюлоза, Л – лигнин, Г – гемицеллюлозы, МВ – минеральные вещества, СД – степень делигнификации, Вых – выход продукта, В – влажность, СП – степень полимеризации

Notes: C – cellulose, α -C – α -cellulose, L – lignin, G – hemicelluloses, MB – mineral substances, СД – degree of delignification, Вых – product yield, В – moisture content, СП – degree of polymerization

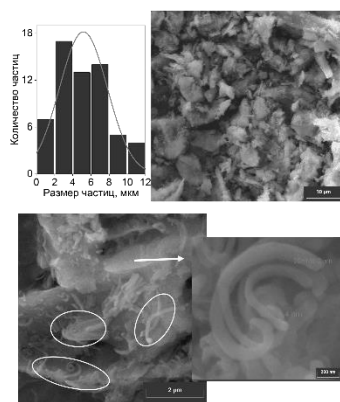


Рис. 3. СЭМ-изображения и распределение размера частиц образца РС-ОД-Г

Fig. 3. SEM images and particle size distribution of the PC-ОД-Г sample

Табл. 2 содержит данные по характеристикам целлюлоз различного происхождения (хлопковая, древесная, в т.ч. хвойная) и применения, представленные в Государственных стандартах и др. источниках. Согласно полученным данным, метод окислительной делигнификации позволяет получить целлюлозный материал РС-ОД, который удовлетворяет техническим условиям ГОСТ 3914-89, 6501-82, 23482-84, 11208-82 «Целлюлоза сульфитная / сульфатная беленая / небеленая из хвойной древесины» [38-41]. Перечисленные материалы используются в производстве различных видов бумаги и картона, изготавливаемых для нужд народного хозяйства и экспорта. РС-ОД соответствует

приведенным стандартам по степени делигнификации (не менее 25-32% по ГОСТ vs. 67,9% полученных), влажности (не более 20% по ГОСТ vs. 2,5% полученных), содержанию C5 сахаров (не менее 0-5,5% по ГОСТ vs. 11,9% полученных), что позволяет рассматривать рейннурию в качестве источника целлюлозы. При подходящей степени делигнификации дополнительное снижение зольности данного образца до 0,27-0,5% позволит добавить его к перечню подходящих целлюлоз для изготовления электроизоляционных материалов. А именно, конденсаторной, кабельной и трансформаторной бумаг согласно ГОСТ 5186-88 и 12765-88. Также дополнительная очистка от минеральной составляющей до 0,08-0,12% с одновременным увеличением доли α -целлюлозы до 90-92,5% повысит рентабельность РС-ОД в качестве альтернативы вискозной целлюлозе согласно ГОСТ 5982-84 и 24299-80. Более глубокая обработка с целью снижения зольности до 0,07-0,08% и увеличения содержания α -целлюлозы до 96,5-96,7% сделает целлюлозу РС-ОД подходящей для рассмотрения в качестве целлюлозы для кордных нитей и высокомолекулярных волокон ГОСТ 16762-82 и кордной целлюлозы холодного облагораживания ГОСТ 21101-83. Стоит также отметить, что РС-ОД имеет подходящую степень полимеризации (1800) для использования

в производстве ацетатного волокна вместо хлопковой целлюлозы, однако, все же требует увеличения доли α -целлюлозы до 98% и уменьшения зольности до 0,1%. Для сходимости с другими источниками целлюлозы в производстве ацетатов, например древесными (сульфитной и сульфатной), необходимо также уменьшение длины цепи до диапазона 1500-700.

В свою очередь, образец РС-А не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к промышленным образцам целлюлозы и уступает по своим характеристикам образцу РС-ОД. Можно сказать, что использованные в работе условия азотнокислотной обработки рейннурии демонстрируют низкую эффективность для получения целлюлозных материалов с высокой степенью чистоты. В ходе дальнейшей работы будут проведены исследования по оптимизации условий обработки.

Следует отметить, что образец после кислотного гидролиза технической целлюлозы РС-ОД-Г при дальнейшем исследовании может рассматриваться для применения в качестве эмульгатора в фармацевтике, косметике и пищевой отрасли (добавка Е 460i), стабилизатора в лакокрасочной отрасли, в производстве огнеупорных материалов и пластмасс, а также в тонком органическом синтезе.

Таблица 2

Некоторые характеристики технической целлюлозы и условия ее применения в различных областях.

Ц – целлюлоза, α -Ц – α -целлюлоза, С – концентрация, СД – степень делигнификации, СП – степень полимеризации, прочерк – нет данных.

Table 2. Some characteristics of technical cellulose and conditions for its use in various field. Ц – cellulose, α -Ц – alpha-cellulose, С – concentration, СД – delignification degree, СП – polymerization degree, dash – no data available

Вид целлюлозы	Область применения	С α -Ц, не менее	СД, %, не менее	СП	Зола, %, не более	Влажность, %, не более	С смол и жиров, %, не более	С C ₅ -сахаров, %, не менее	Ссылка
Хлопковая Ц	Общие характеристики	94-98	99,7	2000-10000	-	7,0-10,6	0,3	0,5-1,0	[42]
Древесная сульфитная Ц		93-96	99,8	1000-1500	-	-	0,2-0,4	1,0-2,5	
Древесная сульфатная Ц		92,2-92,5	94-97	700-1000	-	-	0,20-0,25	-	
Ц сульфитная беленая из хвойной древесины. ГОСТ 3914-89	Различные виды бумаги и картона, изготавливаемых для нужд народного хозяйства и экспорта	-	25-32	-	-	20	0,6-1,0	0-4,6	[43]
Ц сульфитная небеленая из хвойной древесины. ГОСТ 6501-82	Различные виды бумаги и картона	-	27-35	-	-	20	1,0-1,5	0-5,5	[38]

Продолжение табл. 2

Ц сульфитная небеленая из хвойной древесины для экспорта. ГОСТ 23482-84	экспорт	-	27	-	-	25	1,0-1,5	-	[40]
Ц древесная (хвойная) сульфатная небеленая. ГОСТ 11208-82	Различные виды бумаги и картона	-	20,0-36,0	-	-	23	-	-	[39]
Ц сульфитная вискозная ГОСТ 5982-84	Вискозная текстильная нить, вискозные волокна и гидрат целлюлозной пленки.	90-92,5	-	-	0,08- 0,12	6-10	0,20- 0,35	-	[44]
Ц сульфатная вискозная. ГОСТ 24299-80	Вискозные волокна	92	-	-	-	6-10	0,08	-	[45]
Ц электроизо- ляционная сульфатная для конденсатор- ной, кабельной и трансформа- торной бумаги ГОСТ 5186-88	Конденсаторная, кабельная и трансформатор- ная бумага	-	25,0-32,0	-	0,27	12-20	-	-	[46]
Ц хвойная суль- фатная небеле- ная электроизо- ляционная технические условия ГОСТ 12765-88	Электроизоляци- онный картон и многослойная кабельная бумага на напряжение до 35 кВ включительно	-	23-36	-	0,5	18	-	-	[47]
Ц сульфатная предгидролиз- ная для кордных нитей и высокомо- дульных волокон ГОСТ 16762-82	Вискозные кордные, технические нити и высокомодуль- ные волокна	-	-	-	0,08	6-10	0,06	-	[48]
Ц сульфатная предгидролиз- ная кордная хо- лодного облаго- раживания. ГОСТ 21101-83	Высокопрочная кордная вискозная нить, применяемая в производстве кордных тканей и материалов группы 100	96,5- 96,7	-	-	0,07	6-10	0,07	-	[49]
Хлопковая Ц	Производство ацетатов	98	-	1800- 3800	0,1	10	0,05	-	[42]

Таблица 3

Области потенциального применения технической целлюлозы, выделенной из рейнутрии. ✓— подходит по исследуемым параметрам; ○— при условии дополнительной очистки; ●— при условии дополнительной очистки и повышения степени полимеризации

Table 3. Fields of potential application for technical cellulose isolated from Reynoutria. ✓— complies with the parameters studied; ○— subject to additional purification; ●— subject to additional purification and increasing polymerization degree

Вид целлюлозы	Область применения	РС-А	РС-ОД
Ц сульфитная беленая из хвойной древесины. ГОСТ 3914-89	производство различных видов бумаги и картона, изготавливаемых для нужд народного хозяйства и экспорта	○	✓
Ц сульфитная небеленая из хвойной древесины. ГОСТ 6501-82	производство различных видов бумаги и картона	○	✓
Ц сульфитная небеленая из хвойной древесины для экспорта. ГОСТ 23482-84	экспорт	○	✓
Ц древесная (хвойная) сульфатная небеленая. ГОСТ 11208-82	Производство различных видов бумаги и картона.	○	✓
Ц сульфитная вискозная ГОСТ 5982-84	Производство вискозной текстильной нити, вискозных волокон и гидрат целлюлозной пленки.	○	○
Ц сульфатная вискозная. ГОСТ 24299-80	Производство вискозного волокна	○	○
Ц электроизоляционная сульфатная для конденсаторной, кабельной и трансформаторной бумаги ГОСТ 5186-88	Изготовление конденсаторной, кабельной и трансформаторной бумаги.	○	○
Ц хвойная сульфатная небеленая электроизоляционная технические условия ГОСТ 12765-88	Производство электроизоляционного картона и многослойной кабельной бумаги на напряжение до 35 кВ включительно.	○	○
Ц сульфатная предгидролизная для кордных нитей и высокомолекулярных волокон ГОСТ 16762-82	Изготовление вискозных кордных, технических нитей и высокомолекулярных волокон.	○	○
Ц сульфатная предгидролизная кордная холодного облагораживания. ГОСТ 21101-83	Производство высокопрочной кордной вискозной нити, применяемой в производстве кордных тканей и материалов группы 100	○	○
Хлопковая Ц	Производство ацетатов	●	○
Древесная сульфитная Ц		●	●
Древесная сульфатная Ц		●	●

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе впервые рассматривается выделение целлюлозы из инвазивного вида Рейнутрии сахалинской методами азотнокислой обработки и окислительной делигнификации. С помощью данных подходов получены два целлюлозосодержащих образца РС-А и РС-ОД. Вместе с исходной биомассой рейнутрии образцы охарактеризованы по содержанию целлюлозы (до 75 масс.%), α -целлюлозы (до 67 масс.%), остаточных лигнина, золы (0,15-8 масс.%) и гемицеллюлоз (до 18,6 масс.%), а также по степени полимеризации (1800) и влажности (2,5-17,5 масс.%). Определено, что степень де-

лигнификации достигает 68% при обработке рейнутрии методом окислительной делигнификации, а содержание целлюлозы увеличено с 42 до 63-75 масс.%. Показано, что путем кислотного гидролиза технической целлюлозы РС-ОД можно получить микроразмерные образцы целлюлозы (РС-ОД-Г) со средним размером частиц 5 мкм.

Проведено сравнение целлюлозных материалов, полученных из рейнутрии, с коммерческими видами целлюлозы. В сравнении образцов учитывались параметры содержания α -целлюлозы, золы, влажности, С5 сахаров, смол и жиров, а также степени делигнификации и полимеризации целлюлоз.

Определено, что полученный в данной работе образец целлюлозы является перспективным для применения в производстве различных видов бумаги и картона, изготавливаемых для нужд народного хозяйства и экспорта, т.к. по вышеописанным характеристикам совпадает с коммерческой целлюлозой (ГОСТ 3914-89, 6501-82, 23482-84, 11208-82). А дальнейшая очистка от минеральных компонентов и увеличение доли α -целлюлозы позволит существенно расширить диапазон потенциального применения в области текстильного производства, электротехники и химической промышленности.

БЛАГОДАРНОСТЬ И ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (государственное задание Института катализа СО РАН, проект № FWUR 2024–0036) и тематическим планом исследований кафедры Инженерных проблем экологии Новоси-

бирского государственного технического университета № ТП-ИПЭ-1_26.

Авторы выражают благодарность сотруднику ИК СО РАН к.х.н. Супруну Е.А. за проведение СЭМ, а также студенту НГТУ Д.Д. Дворецкой за помощь в проведении экспериментов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the governmental assignment of the Boreskov Institute of Catalysis SB RAS (project no. FWUR-2024-0036) and the Department Engineering Problems of Ecology of NSTU N. TP-IPE-1_26.

The authors gratefully acknowledge employ of the BIC SB RAS, E.A. Suprun, Ph.D., for the SEM analysis, as well as to NSTU student D.D. Dvoretzskaya for her assistance in the experiments.

The authors declare the absence of a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

- Wyman C., Decker S., Himmel M., Brady J., Skopec C., Viikari L. Hydrolysis of cellulose and hemicellulose. In: Polysaccharides: Structural Diversity and Functional Versatility. Marcel Dekker Inc. 2005. P. 995-1033. DOI: 10.1201/9781420030822.ch43.
- Mosier N., Wyman C., Dale B., Elander R., Lee Y., Holtzaple M., Ladisch M. Features of promising technologies for pre-treatment of lignocellulosic biomass. *Bioresour. Technol.* 2005. V. 96. N 6. P. 673-686. DOI: 10.1016/j.biortech.2004.06.025.
- Ottenhall A., Henschen J., Illergård J., Ek M. Cellulose-based water purification using paper filters modified with polyelectrolyte multilayers to remove bacteria from water through electrostatic interactions. *Environ. Sci.: Water Res. Technol.* 2018. V. 4. N 12. P. 2070-2079. DOI: 10.1039/C8EW00514A.
- Rana A. K., Mostafavi E., Alsanie W.F., Siwal S.S., Thakur V.K. Cellulose-based materials for air purification: A review. *Ind. Crops Prod.* 2023. V. 194. P. 116331. DOI: 10.1016/j.indcrop.2023.116331.
- Федотова О.В., Трофимова К.В., Цыганков П.Ю., Сафаров Р.Р. Исследование влияния параметров получения высокопористых целлюлозных материалов на их структурные характеристики. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2023. Т. 66. Вып. 2. С. 107-113. DOI: 10.6060/ivkkt.20236602.6736.
- Chen Q., Kang M., Xie Q., Wang J. Effect of melamine modified cellulose nanocrystals on the performance of oil-immersed transformer insulation paper. *Cellulose.* 2020. V. 27. N 13. P. 7621-7636. DOI: 10.1007/s10570-020-03305-4.
- Jusner P., Schwaiger E., Potthast A., Rosenau T. Thermal stability of cellulose insulation in electrical power transformers – A review. *Carbohydr. Polym.* 2021. V. 252. P. 117196. DOI: 10.1016/j.carbpol.2020.117196.
- Edgar K.J., Buchanan C.M., Debenham J.S., Rundquist P.A., Seiler B.D., Shelton M.C., Tindall D. Advances in cellulose ester performance and application. *Prog. Polym.*

REFERENCES

- Wyman C., Decker S., Himmel M., Brady J., Skopec C., Viikari L. Hydrolysis of cellulose and hemicellulose. In: Polysaccharides: Structural Diversity and Functional Versatility. Marcel Dekker Inc. 2005. P. 995-1033. DOI: 10.1201/9781420030822.ch43.
- Mosier N., Wyman C., Dale B., Elander R., Lee Y., Holtzaple M., Ladisch M. Features of promising technologies for pre-treatment of lignocellulosic biomass. *Bioresour. Technol.* 2005. V. 96. N 6. P. 673-686. DOI: 10.1016/j.biortech.2004.06.025.
- Ottenhall A., Henschen J., Illergård J., Ek M. Cellulose-based water purification using paper filters modified with polyelectrolyte multilayers to remove bacteria from water through electrostatic interactions. *Environ. Sci.: Water Res. Technol.* 2018. V. 4. N 12. P. 2070-2079. DOI: 10.1039/C8EW00514A.
- Rana A. K., Mostafavi E., Alsanie W.F., Siwal S.S., Thakur V.K. Cellulose-based materials for air purification: A review. *Ind. Crops Prod.* 2023. V. 194. P. 116331. DOI: 10.1016/j.indcrop.2023.116331.
- Fedotova O.V., Trofimova K.V., Tsygankov P.Y., Safarov R.R. Study of the production parameters influence of highly porous cellulosic materials on their structural characteristics. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]* 2023. V. 66. N 2. P. 107-113 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20236602.6736.
- Chen Q., Kang M., Xie Q., Wang J. Effect of melamine modified cellulose nanocrystals on the performance of oil-immersed transformer insulation paper. *Cellulose.* 2020. V. 27. N 13. P. 7621-7636. DOI: 10.1007/s10570-020-03305-4.
- Jusner P., Schwaiger E., Potthast A., Rosenau T. Thermal stability of cellulose insulation in electrical power transformers – A review. *Carbohydr. Polym.* 2021. V. 252. P. 117196. DOI: 10.1016/j.carbpol.2020.117196.
- Edgar K.J., Buchanan C.M., Debenham J.S., Rundquist P.A., Seiler B.D., Shelton M.C., Tindall D. Advances in cellulose ester performance and application. *Prog. Polym.*

- Sci. 2001. V. 26. N 9. P. 1605-1688. DOI: 10.1016/S0079-6700(01)00027-2.
9. **Gürdağ G., Sarmad S.** Cellulose Graft Copolymers: Synthesis, Properties, and Applications. In: Polysaccharide Based Graft Copolymers. Berlin, Heidelberg: Springer. 2013. P. 15-57. DOI: 10.1007/978-3-642-36566-9_2.
10. **Аутлов С.А., Базарнова Н.Г., Кушнир Е.Ю.** Микрокристаллическая целлюлоза: структура, свойства и области применения (обзор). *Химия растит. сырья*. 2013. Т. 3. С. 33-41. DOI: 10.14258/jcprm.1303033.
11. **Akhlamadi G., Goharshadi E.K., Saghir S.V.** Extraction of cellulose nanocrystals and fabrication of high alumina refractory bricks using pencil chips as a waste biomass source. *Ceram. Int.* 2021. V. 47. N 19. P. 27042-27049. DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.06.117.
12. **Shokri J., Adibkia K.** Application of Cellulose and Cellulose Derivatives in Pharmaceutical Industries. In Cellulose - Medical, Pharmaceutical and Electronic Applications. Rijeka: IntechOpen. 2013. DOI: 10.5772/55178.
13. **Lima N.F., Maciel G.M., Lima N.P., Fernandes I.d.A.A., Haminiuk C.W.I.** Bacterial cellulose in cosmetic innovation: A review. *Int. J. Biol. Macromol.* 2024. V. 275. P. 133396. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.133396.
14. **Yuan H., Wei X., Chen C., Yu H., Huang J., Tian H.** Recent developments in cellulose-based Emulsion systems for food applications: A review. *Food Hydrocoll.* 2025. V. 163. P. 111089. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2025.111089.
15. **Корчагина А.А., Будаева В.В., Алешина Л.А., Люханова И.В., Бычин Н.В., Сакович Г.В.** Модификация растительной целлюлозы и ее синтетического аналога в низкозамещенные продукты этерификации. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2022. Т. 65. Вып. 6. С. 64-74. DOI: 10.6060/ivkkt.20226506.6598.
16. Агентство лесного хозяйства и охраны животного мира камчатского края. Приказ Об утверждении лесохозяйственного регламента Корякского лесничества N 748-пр. от 26.10.2018 г. [Электронный ресурс]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/4101201811010008?index=71> (дата обращения: 17.12.2025).
17. **Никольская В.** Целлюлозно-бумажная отрасль в 2023 году. *ЛесПромИнформ*. 2023. Т. 174. Вып. 4. [Электронный ресурс]. URL: <https://lesprominform.ru/jarticles.html?id=6538>. (дата обращения: 17.12.2025).
18. **Евгеньев В.** Английский захватчик: новый ядовитый сорняк распространяется по России быстрее борщевика. 2025. [Электронный ресурс]. URL: <https://progorod76.ru/news/83485?ysclid=mj8mq1rg4532067233>. (дата обращения: 17.12.2025).
19. **Виноградова Ю.К., Майоров С.Р., Хорун Л.В.** Черная книга флоры Средней России (Чужеродные виды растений в экосистемах Средней России). М.: ГЕОС. 2009. 494 с.
20. **Зорикова О.Л., Маняхин А.Ю., Боровая С.А., Раилко С.П.** Сезонная динамика содержания полисахаридов в сырье *Reynoutria japonica*. *Химия растит. сырья*. 2018. Т. 3. С. 33-39. DOI: 10.14258/jcprm.2018033777.
21. **Starešinič M., Boh Podgornik B., Javoršek D., Leskovšek M., Možina K.** Fibers Obtained from Invasive Alien Plant Species as a Base Material for Paper Production. *Forests*. 2021. V. 12. N 5. P. 527. DOI: 10.3390/f12050527.
22. **Kapun T., Zule J., Fabjan E., Hočevar B., Grilc M., Likozar B.** Engineered invasive plant cellulose fibers as resources for papermaking. *Eur. J. Wood Wood Prod.* 2022. V. 80. N 2. P. 501-514. DOI: 10.1007/s00107-021-01779-y.
9. **Gürdağ G., Sarmad S.** Cellulose Graft Copolymers: Synthesis, Properties, and Applications. In: Polysaccharide Based Graft Copolymers. Berlin, Heidelberg: Springer. 2013. P. 15-57. DOI: 10.1007/978-3-642-36566-9_2.
10. **Autlov S.A., Bazarnova N.G., Kushnir E.Yu.** Microcrystalline cellulose: structure, properties and areas of application (review). *Khim. Rastit. Syr'ya*. 2013. V. 3. P. 33-41 (in Russian). DOI: 10.14258/jcprm.1303033.
11. **Akhlamadi G., Goharshadi E.K., Saghir S.V.** Extraction of cellulose nanocrystals and fabrication of high alumina refractory bricks using pencil chips as a waste biomass source. *Ceram. Int.* 2021. V. 47. N 19. P. 27042-27049. DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.06.117.
12. **Shokri J., Adibkia K.** Application of Cellulose and Cellulose Derivatives in Pharmaceutical Industries. In Cellulose - Medical, Pharmaceutical and Electronic Applications. Rijeka: IntechOpen. 2013. DOI: 10.5772/55178.
13. **Lima N.F., Maciel G.M., Lima N.P., Fernandes I.d.A.A., Haminiuk C.W.I.** Bacterial cellulose in cosmetic innovation: A review. *Int. J. Biol. Macromol.* 2024. V. 275. P. 133396. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.133396.
14. **Yuan H., Wei X., Chen C., Yu H., Huang J., Tian H.** Recent developments in cellulose-based Emulsion systems for food applications: A review. *Food Hydrocoll.* 2025. V. 163. P. 111089. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2025.111089.
15. **Korchagina A.A., Budaeva V.V., Aleshina L.A., Lyukhanova I.V., Bychin N.V., Sakovich G.V.** Modification of plant cellulose and its synthetic analog into low-substituted esterification products. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 65. N 6. P. 64-74 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20226506.6598.
16. Agency for Forestry and Wildlife Protection of the Kamchatka Krai. Order on approval of the forestry regulations of the Koryaksky forestry N 748-pr. dated 10.26.2018. [Electronic resource]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/4101201811010008?index=71> (accessed: 17.12.2025) (in Russian).
17. **Nikol'skaya V.** Pulp and paper industry in 2023. *LesProm-Inform*. 2023. V. 174. N 4 (in Russian). URL: <https://lesprominform.ru/jarticles.html?id=6538> (дата обращения: 17.12.2025).
18. **Evgen'ev V.** English invader: a new poisonous weed is spreading across Russia faster than hogweed. 2025. [Electronic resource]. URL: <https://progorod76.ru/news/83485?ysclid=mj8mq1rg4532067233> (accessed: 17.12.2025) (in Russian).
19. **Vinogradova Yu.K., Mairov S.R., Khorun L.V.** Black book of the flora of Central Russia (Alien plant species in ecosystems of Central Russia). M.: GEOS. 2009. 494 p. (in Russian).
20. **Zorikova O.L., Manyakhin A.Yu., Borovaya S.A., Railko S.P.** Seasonal dynamics of polysaccharide content in the raw material of *Reynoutria japonica*. *Khim. Rastit. Syr'ya*. 2018. V. 3. P. 33-39 (in Russian). DOI: 10.14258/jcprm.2018033777.
21. **Starešinič M., Boh Podgornik B., Javoršek D., Leskovšek M., Možina K.** Fibers Obtained from Invasive Alien Plant Species as a Base Material for Paper Production. *Forests*. 2021. V. 12. N 5. P. 527. DOI: 10.3390/f12050527.
22. **Kapun T., Zule J., Fabjan E., Hočevar B., Grilc M., Likozar B.** Engineered invasive plant cellulose fibers as resources for papermaking. *Eur. J. Wood Wood Prod.* 2022. V. 80. N 2. P. 501-514. DOI: 10.1007/s00107-021-01779-y.

23. **Vrabič-Brodnjak U., Možina K.** Invasive Alien Plant Species for Use in Paper and Packaging Materials. *Fibers*. 2022. V. 10. N 11. P. 94. DOI: 10.3390/fib10110094.
24. **Будаева В.В., Митрофанов Р.Ю., Золотухин В.Н., Архипова О.С.** Свойства целлюлозы из мискантуса. *Ползунов. вестн.* 2010. Т. 3. С. 240-245.
25. **Будаева В.В., Гисматулина Ю.А., Золотухин В.Н., Сакович Г.В., Вепрев С.Г., Шумный В.К.** Показатели качества целлюлозы, полученной азотнокислым способом в лабораторных и опытно-промышленных условиях из мискантуса. *Ползунов. вестн.* 2013. Т. 3. С. 162-167.
26. **Сакович Г.В., Будаева В.В., Корчагина А.А., Гисматулина Ю.А.** Перспективы нитратов целлюлозы из нетрадиционного сырья для взрывчатых составов. *Химия растит. сырья*. 2019. Т. 1. С. 259-268. DOI: 10.14258/jcprm.2019014336.
27. **Корчагина А.А., Гисматулина Ю.А., Будаева В.В., Золотухин В.Н., Бычин Н.В., Сакович Г.В.** Мискантус гигантский сорта «камис» - новое сырье для нитратов целлюлозы. *Журн. Сиб. федер. ун-та. Химия*. 2020. Т. 4. С. 565-577. DOI: 10.17516/1998-2836-0206.
28. **Denisova M.N., Budaeva V.V., Pavlov I.N.** Pulps isolated from Miscanthus, oat hulls, and intermediate flax straw with sodium benzoate. *Korean J. Chem. Eng.* 2015. V. 32. N 2. P. 202-205. DOI: 10.1007/s11814-014-0371-1.
29. **Gismatulina Y.A., Budaeva V.V., Sakovich G.V.** Nitric acid preparation of cellulose from miscanthus as a nitrocellulose precursor. *Russ. Chem. Bull.* 2015. V. 64. N 12. P. 2949-2953. DOI: 10.1007/s11172-015-1252-4.
30. **Gismatulina Y.A., Budaeva V.V.** Chemical composition of five Miscanthus sinensis harvests and nitric-acid cellulose therefrom. *Ind. Crops Prod.* 2017. V. 109. P. 227-232. DOI: 10.1016/j.indcrop.2017.08.026.
31. **Sudakova I. G., Garyntseva N.V., Chudina A.I., Kuznetsov B.N.** Experimental and Mathematical Optimization of the Peroxide Delignification of Larch Wood in the Presence of MnSO₄ Catalyst. *Catal. Ind.* 2020. V. 12. N 3. P. 265-272. DOI: 10.1134/S2070050420030125.
32. **Pen R. Z., Shapiro I.D., Karetnikova N.V.** Peroxide cellulose from wheat straw. *Khim. Rastit. Syr'ya*. 2022. N 2. P. 299-305. DOI: 10.14258/jcprm.2022010688.
33. **Оболенская А.В., Ельницкая З.П., Леонович А.А.** Лабораторные работы по химии древесины и целлюлозы. М.: Экология. 1991. 320 с.
34. **Gromov N.V., Medvedeva T.B., Rodikova Y.A., Babushkin D.E., Panchenko V.N., Timofeeva M.N., Zhizhina E.G., Taran O.P., Parmon V.N.** One-pot synthesis of formic acid via hydrolysis-oxidation of potato starch in the presence of cesium salts of heteropoly acid catalysts. *RSC Adv.* 2020. V. 10. N 48. P. 28856-28864. DOI: 10.1039/D0RA05501H.
35. ГОСТ 6840-78. Целлюлоза. Метод определения содержания альфа-целлюлозы. М.: Изд-во стандартов. 1978. 7 с.
36. ГОСТ 25438-82. Целлюлоза для химической переработки. Методы определения характеристической вязкости. М.: Изд-во стандартов. 1982. 7 с.
37. **Qazanfarzadeh Z., Kadivar M.** Properties of whey protein isolate nanocomposite films reinforced with nanocellulose isolated from oat husk. *Int. J. Biol. Macromol.* 2016. V. 91. P. 1134-1140. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2016.06.077.
38. ГОСТ 6501-82. Целлюлоза сульфитная небеленая из хвойной древесины. Тех. условия. М.: Изд-во стандартов. 1982. 6 с.
39. ГОСТ 11208-82. Целлюлоза древесная (хвойная) сульфатная небеленая. Тех. условия. М.: Изд-во стандартов. 1983. 6 с.
23. **Vrabič-Brodnjak U., Možina K.** Invasive Alien Plant Species for Use in Paper and Packaging Materials. *Fibers*. 2022. V. 10. N 11. P. 94. DOI: 10.3390/fib10110094.
24. **Budaeva V.V., Mitrofanov R.Yu., Zolotukhin V.N., Arkhipova O.S.** Properties of cellulose from miscanthus. *Polzunov. Vestn.* 2010. V. 3. P. 240-245 (in Russian).
25. **Budaeva V.V., Gismatulina Y.A., Zolotukhin V.N., Sakovich G.V., Veprev S.G., Shumny V.K.** Quality indicators of cellulose obtained by nitric acid method in laboratory and pilot plant conditions from miscanthus. *Polzunov. Vestn.* 2013. V. 3. P. 162-167 (in Russian).
26. **Sakovich G.V., Budaeva V.V., Korchagina A.A., Gismatulina Y.A.** Prospects of cellulose nitrates from non-traditional raw materials for explosive compositions. *Khim. Rastit. Syr'ya*. 2019. V. 1. P. 259-268 (in Russian). DOI: 10.14258/jcprm.2019014336.
27. **Korchagina A.A., Gismatulina Y.A., Budaeva V.V., Zolotukhin V.N., Bychin N.V., Sakovich G.V.** Miscanthus giganteus of the "Kamis" variety as a new raw material for cellulose nitrates. *J. Sib. Fed. Univ. Khim.* 2020. V. 4. P. 565-577 (in Russian). DOI: 10.17516/1998-2836-0206.
28. **Denisova M.N., Budaeva V.V., Pavlov I.N.** Pulps isolated from Miscanthus, oat hulls, and intermediate flax straw with sodium benzoate. *Korean J. Chem. Eng.* 2015. V. 32. N 2. P. 202-205. DOI: 10.1007/s11814-014-0371-1.
29. **Gismatulina Y.A., Budaeva V.V., Sakovich G.V.** Nitric acid preparation of cellulose from miscanthus as a nitrocellulose precursor. *Russ. Chem. Bull.* 2015. V. 64. N 12. P. 2949-2953. DOI: 10.1007/s11172-015-1252-4.
30. **Gismatulina Y.A., Budaeva V.V.** Chemical composition of five Miscanthus sinensis harvests and nitric-acid cellulose therefrom. *Ind. Crops Prod.* 2017. V. 109. P. 227-232. DOI: 10.1016/j.indcrop.2017.08.026.
31. **Sudakova I. G., Garyntseva N.V., Chudina A.I., Kuznetsov B.N.** Experimental and Mathematical Optimization of the Peroxide Delignification of Larch Wood in the Presence of MnSO₄ Catalyst. *Catal. Ind.* 2020. V. 12. N 3. P. 265-272. DOI: 10.1134/S2070050420030125.
32. **Pen R. Z., Shapiro I.D., Karetnikova N.V.** Peroxide cellulose from wheat straw. *Khim. Rastit. Syr'ya*. 2022. N 2. P. 299-305. DOI: 10.14258/jcprm.2022010688.
33. **Obolenskaya A.V., El'nitskaya Z.P., Leonovich A.A.** Laboratory work on the chemistry of wood and cellulose. М.: Ekologiya. 1991. 320 p. (in Russian).
34. **Gromov N.V., Medvedeva T.B., Rodikova Y.A., Babushkin D.E., Panchenko V.N., Timofeeva M.N., Zhizhina E.G., Taran O.P., Parmon V.N.** One-pot synthesis of formic acid via hydrolysis-oxidation of potato starch in the presence of cesium salts of heteropoly acid catalysts. *RSC Adv.* 2020. V. 10. N 48. P. 28856-28864. DOI: 10.1039/D0RA05501H.
35. GOST 6840-78. Cellulose. Method for determination of alpha-cellulose content. М.: Izd-vo standartov. 1978. 7 p. (in Russian).
36. GOST 25438-82. Cellulose for chemical processing. Methods for determination of intrinsic viscosity. М.: Izd-vo standartov. 1982. 7 p. (in Russian).
37. **Qazanfarzadeh Z., Kadivar M.** Properties of whey protein isolate nanocomposite films reinforced with nanocellulose isolated from oat husk. *Int. J. Biol. Macromol.* 2016. V. 91. P. 1134-1140. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2016.06.077.
38. GOST 6501-82. Unbleached sulfite pulp from softwood. Specifications. М.: Izd-vo standartov. 1982. 6 p. (in Russian).
39. GOST 11208-82. Unbleached sulphate wood (softwood) pulp. Specifications. М.: Izd-vo standartov. 1983. 6 p. (in Russian).

40. ГОСТ 23482-84. Целлюлоза сульфитная небеленая из хвойной древесины для экспорта. Тех. условия. М.: Изд-во стандартов, 1986. 6 с.
41. ГОСТ 3914-89. Целлюлоза сульфитная беленая из хвойной древесины. Тех. условия. М.: Изд-во стандартов, 1989. 8 с.
42. **Манушин В.И., Никольский К.С., Минскер К.С., Колесов С.В.** Целлюлоза, сложные эфиры целлюлозы и пластические массы на их основе. Владимир: Полимерсинтез, 2002. 56 с.
43. ГОСТ 3914-89. Целлюлоза сульфитная беленая из хвойной древесины. Тех. условия. М.: Изд-во стандартов, 1989. 8 с.
44. ГОСТ 5982-84. Целлюлоза сульфитная вискозная. Тех. условия. М.: Изд-во стандартов, 1986. 6 с.
45. ГОСТ 24299-80. Целлюлоза сульфатная вискозная. Тех. условия. М.: Изд-во стандартов, 1982. 4 с.
46. ГОСТ 5186-88. Целлюлоза электроизоляционная сульфатная для конденсаторной, кабельной и трансформаторной бумаги. Тех. условия. М.: Изд-во стандартов, 1988. 8 с.
47. ГОСТ 12765-88. Целлюлоза хвойная сульфатная небеленая электроизоляционная. Тех. условия. М.: Изд-во стандартов, 1988. 8 с.
48. ГОСТ 16762-82. Целлюлоза сульфатная предгидролизованная для кордных нитей и высокомодульных волокон. Тех. условия. М.: Изд-во стандартов, 1982. 4 с.
49. ГОСТ 21101-83. Целлюлоза сульфатная предгидролизованная кордная холодного облагораживания. Тех. условия. М.: Изд-во стандартов, 1983. 4 с.
40. GOST 23482-84. Unbleached sulfite pulp from softwood for export. Specifications. M.: Izd-vo standartov, 1986. 6 p. (in Russian).
41. GOST 3914-89. Bleached sulfite pulp from softwood. Specifications. M.: Izd-vo standartov, 1989. 8 p. (in Russian).
42. **Manushin V.I., Nikol'sky K.S., Minsker K.S., Kolesov S.V.** Cellulose, cellulose esters and plastic masses based on them. Vladimir: Polimersintez, 2002. 56 p. (in Russian).
43. GOST 3914-89. Bleached sulfite pulp from softwood. Specifications. M.: Izd-vo standartov, 1989. 8 p. (in Russian).
44. GOST 5982-84. Viscose sulfite pulp. Specifications. M.: Izd-vo standartov, 1986. 6 p. (in Russian).
45. GOST 24299-80. Viscose sulphate pulp. Specifications. M.: Izd-vo standartov, 1982. 4 p. (in Russian).
46. GOST 5186-88. Insulating sulphate pulp for capacitor, cable and transformer paper. Specifications. M.: Izd-vo standartov, 1988. 8 p. (in Russian).
47. GOST 12765-88. Unbleached sulphate insulating softwood pulp. Specifications. M.: Izd-vo standartov, 1988. 8 p. (in Russian).
48. GOST 16762-82. Pre-hydrolysis sulphate pulp for cord threads and high-modulus fibers. Specifications. M.: Izd-vo standartov, 1982. 4 p. (in Russian).
49. GOST 21101-83. Pre-hydrolysis sulphate cord pulp of cold refining. Specifications. M.: Izd-vo standartov, 1983. 4 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 22.01.2026

Принята к опубликованию 06.02.2026

Received 22.01.2026

Accepted 06.02.2026