

УДК 676.017, 544.723

СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ЛИСТВЕННОЙ И ВОДОРΟΣЛЕВОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ

© Д.А. Поломарчук^{1*}, И.И. Осовская², Ю.В. Севастьянова¹, К.Г. Боголицын^{1,3}, А.Э. Паршина¹,
Н.И. Богданович¹

¹ Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова,
наб. Северной Двины, 17, Архангельск, 163002, Россия,
polomarchuk.d@edu.narfu.ru

² Санкт-Петербургский государственный университет промышленных
технологий и дизайна, Высшая школа технологии и энергетики, ул. Ивана
Черных, 4, Санкт-Петербург, 198095, Россия

³ Институт экологических проблем Севера ФИЦКИА УрО РАН,
наб. Северной Двины, 109, Архангельск, 163000, Россия

Цель данной работы заключается в установлении влияния структурных характеристик водорослевой целлюлозы на свойства композиционного материала на основе лиственной целлюлозы. В работе использовалась сульфатная беле-
ная лиственная целлюлоза и водорослевая целлюлоза, полученная из арктической бурой водоросли вида *Saccharina la-
tissima*, отобранной в акватории о. Большой Соловецкий (Белое море). Для установления влияния структурных характе-
ристик водорослевой целлюлозы на свойства композиционного материала был проведен ряд анализов, который показал
следующие результаты: водорослевая целлюлоза имеет мезопористую структуру с развитой удельной площадью по-
верхности. Размер волокон водорослевой целлюлозы колеблется в интервале 0.1–0.4 мм, а по своей морфологии они
имеют лентообразную форму, часть из которых перекручена. Исследование физико-механических свойств композици-
онной бумаги из лиственной целлюлозы с добавкой водорослевой выявило отличия с бумагой из чистой лиственной
целлюлозы. Добавка водорослевой целлюлозы придает бумажному полотну шероховатость, снижает воздухопроницае-
мость и капиллярную впитываемость. Композит также более эффективен в качестве фильтра, чем бумажное полотно
исключительно из лиственной целлюлозы. Полученная композиционная бумага имеет перспективу при производстве
бумаг специализированного назначения.

Ключевые слова: бурые водоросли, лиственная целлюлоза, водорослевая целлюлоза, бумажное полотно, композит.

Для цитирования: Поломарчук Д.А., Осовская И.И., Севастьянова Ю.В., Боголицын К.Г., Паршина А.Э., Бог-
данович Н.И. Свойства композиционного материала на основе лиственной и водорослевой целлюлозы // Химия расти-
тельного сырья. 2025. №1. С. 351–362. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20250114679>.

Введение

Целлюлоза является уникальным природным полимером со свойствами, позволяющими применять ее для создания современных биоразлагаемых, биосовместимых материалов. Благодаря этому целлюлоза находит все новые области применения в широком кругу отраслей от биомедицины до электротехники [1, 2]. До сих пор целлюлозная промышленность полностью полагалась на лигноцеллюлозное сырье из наземных растений, особенно древесины и хлопка. Однако из-за увеличения спроса на целлюлозные мате-
риалы ведутся поиски альтернативных источников сырья. Целлюлоза является основным структурным ком-
понентом клеточной стенки каждого растения, обеспечивая механическую прочность и эластичность расти-
тельным тканям. Помимо лигноуглеводных наземных объектов целлюлоза содержится в клеточных стенках
морских растений, в том числе макроводорослей [3–7]. Учитывая особенности их роста и воспроизводства
сырьевой базы, они являются перспективным альтернативным источником целлюлозных материалов. Су-
щественным преимуществом морских макрофитов является отсутствие лигнина, что позволяет в процессе
выделения использовать более мягкие окислители и получить конечные продукты высокой чистоты [8]. Как

* Автор, с которым следует вести переписку.

и в наземных растениях, целлюлоза является ключевым структурообразующим компонентом клеточной стенки водорослей [1], которая может быть представлена в виде целлюлозного каркаса, помещенного в аморфную матрицу, состоящую из альгинатов и фукоиданов [9]. С химической точки зрения целлюлоза представляет собой нерастворимый в воде гомополимер из звеньев глюкопиранозы, соединенных ацетальными связями β -1-4 [1, 10]. Целлюлоза обладает ярко выраженной гидрофильной и гидрофобной природой из-за присутствия как экваториальных гидроксильных групп, так и аксиальных атомов водорода, что придает ей стабильность благодаря компланарной ориентации отдельных глюкопиранозных колец [11, 12].

Биосинтез целлюлозы осуществляется терминальными мембранными комплексами целлюлозосинтазы [13]. Размер и форма микрофибрилл, кристалличность и внутримикрофибриллярные ассоциации напрямую связаны с особенностями организации терминальных комплексов. Их типичная геометрия у высших растений соответствует гексагональной структуре, обычно известной как структура розеток. Для водорослей характерны более разнообразные варианты организации терминальных комплексов: розеточное, однорядное и многорядное [14–17]. После биосинтеза полимерные цепочки целлюлозы агрегируют в полукристаллические микрофибриллы благодаря меж- и внутримолекулярным водородным связям и силам Ван-дер-Ваальса [18]. Микрофибриллы состоят из 24–36 цепочек целлюлозы, в зависимости от количества каталитически активных ферментов целлюлозосинтазы [10]. Водорослевая целлюлоза в последнее время привлекает к себе повышенное внимание, поскольку она обладает рядом преимуществ по сравнению с целлюлозой из наземной биомассы [19]. Но из-за того, что содержание и выход целлюлозы в макрофитах невелики [20], ее можно использовать в качестве добавки в композиции специальных видов бумаги. При выборе волокнистого материала следует учитывать его бумагообразующие свойства, которые в совокупности определяют достижение требуемого качества готового продукта [21].

Основные научные работы посвящены изучению структуры древесной и растительной целлюлозы и ее бумагообразующих свойств [22–24]. Исследований водорослевой целлюлозы в качестве полуфабриката для производства бумаги и подобных ей материалов практически не велось [19, 25]. Работы, выполненные в настоящее время, посвящены изучению сорбционных свойств целлюлозосодержащих материалов, полученных из бурых водорослей [26, 27]. Но именно водорослевую целлюлозу ранее не рассматривали как сырье для получения бумаги. Поэтому целью работы является исследование влияния структурных характеристик водорослевой целлюлозы на свойства волокнистого композиционного материала.

Экспериментальная часть

В рамках данной работы использовали сульфатную беленую целлюлозу из смеси лиственных пород древесины в соответствии с ГОСТ [28] и водорослевую целлюлозу, выделенную согласно модифицированной схеме, предложенной в работе [29] (рис. 1) из арктических бурых водорослей вида *Saccharina latissima*, отобранных в акватории о. Большой Соловецкий (Белое море). Полученный материал водорослевой целлюлозы замораживали и лиофилизировали перед дальнейшим использованием. Перед лиофильной сушкой образцы предварительно замораживали при температуре $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 8 ч. Лيوфилизацию проводили на приборе Lyovapor L-200 (BUCHI, Швейцария) при давлении 0.089 мбар, температуре ледового конденсатора $-55.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 24 ч. Выход целлюлозы составил 8%. Полученную целлюлозу хранили в герметичном стеклянном сосуде в холодильнике при $4.5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Белизну водорослевой целлюлозы определяли в соответствии с ГОСТ [30, 31]. Значения представлены в таблице 1.

Исследование структуры лиственной (ЛЦ) и водорослевой целлюлозы (ВЦ) проводили методом низкотемпературной сорбции-десорбции азота на приборе ASAP 2020 (Micromeritics, США). Навеску образца дегазировали при $350\text{ }^{\circ}\text{C}$, конечном давлении дегазации 0.6–0.7 Па. После этого проводили сорбцию-десорбцию азота при криогенной температуре ($-196\text{ }^{\circ}\text{C}$) с записью изотерм процессов. Обработку полученных данных проводили при помощи методов Barret-Joyner-Halenda (BJH), Brunauer-Emmett-Teller (BET), Horvath-Kawazoe (HK), Broekhoff-de Boer и Dubinin-Radushkevich. Аналитическую обработку полученных данных проводили при помощи программного обеспечения ASAP 2020 V 4.00.

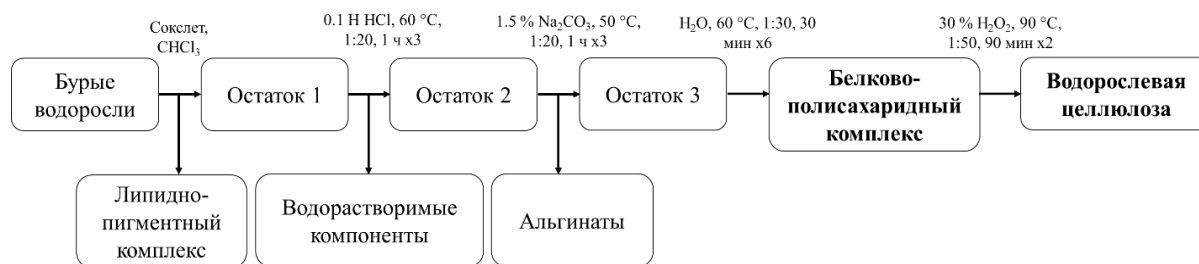


Рис. 1. Схема получения водорослевой целлюлозы

Таблица 1. Оптические показатели водорослевой целлюлозы

Показатель	Осветитель	Среднее значение
WCIE ¹	C/2°	25.46
Delta WCIE	C/2°	0.23
R457 ²	0	68.26
L*	C/2°	92.17
a*	C/2°	-3.82
b*	C/2°	11.65

Примечание. ¹ белизна бумаги по CIE; ² количество света, отраженного от поверхности отливки из целлюлозы; *координаты цветности; C – источник света.

Для определения адсорбции и десорбции паров воды 0.7 г целлюлозы, предварительно высушенной до абсолютно сухого состояния (для десорбции W=40%), помещали в сетчатые карманы и ставили в эксикатор с насыщенными водными растворами солей с различной относительной влажностью (P/P₀). Относительная влажность пара над насыщенными растворами солей составляет: K₂SO₄ – 0.975; KCl – 0.840; NaBr – 0.650; CaCl₂ – 0.320.

Мешочки с навесками оставляли в эксикаторах в течение 9 дней до постоянства их массы. В течение всего опыта проводили систематическое взвешивание до равновесной сорбции. После достижения равновесия целлюлозу извлекали из эксикатора, сушили в бюксах до абсолютно сухого состояния и взвешивали в случае определения десорбции.

Влагосодержание определяли по следующей формуле:

$$D = (m_{\text{вл}} - m_{\text{сух}}) / m_{\text{сух}},$$

где D – десорбция целлюлозы; m_{вл} – масса навески при данной относительной влажности; m_{сух} – масса навески абсолютно сухой целлюлозы.

Оценку структурно-размерных свойств водорослевой целлюлозы проводили микроскопическим методом на приборе высокого разрешения Axio Imager M2m. Распределение волокон по размерам анализировали на приборе L&W Fiber tester (AB Lorentzen & Wettre, Швеция) путем анализа фотографий суспензии целлюлозы (~1 г/л).

Бумажное полотно изготавливали двух видов, из сульфатной лиственной целлюлозы (ЛЦ) и полотна из лиственной целлюлозы с нанесением слоя водорослевой целлюлозы (ЛВЦ). Предварительно набухшую целлюлозную массу подвергали размолу на мельнице PFI M-PTB508A (IDM test S.L., Испания), до степени помола 30 °ШР (Шоппера-Риглера), затем гомогенизировали в дезинтеграторе РТИ (РТИ Austria, Австрия). Дезинтегрированную суспензию полуфабриката – лиственной / водорослевой целлюлозы переносили в приемный бак динамического листоотливного аппарата ADF (TechPap, Франция) и производили отлив бумажного полотна. Сформированное полотно лиственной целлюлозы / лиственной с добавлением водорослевой целлюлозы сушили при температуре 90 °C кондиционировали согласно ГОСТ [32] и использовали для дальнейшего анализа (ЛЦ). Образцы ЛВЦ получали следующим образом: после формирования слоя ЛЦ вносили суспензию водорослевой целлюлозы в приемный бак динамического листоотливного аппарата и, не прекращая движение формообразующей сетки, наносили суспензию водорослевой целлюлозы поверхностным

слоем. Сформированный бумажный лист (ЛВЦ) сушили и анализировали механические свойства. Данное полотно является анизотропным. Характеристики полученных материалов приведены в таблице 2.

Сопротивление бумаги разрыву определяли на вертикальной разрывной машине ТС-101-0.5 (Иваново) согласно ГОСТ [33]. Для испытаний готовили полосы изготовленной бумаги в продольном (машинном, MD) и поперечном (CD) направлениях шириной 15 ± 0.1 мм, длиной 180 мм. Скорость испытания – 25 мм/мин. В результате эксперимента получали параметры разрывной длины (м), нагрузки разрыва (Н), жесткости при растяжении (кН/м), удлинения (мм), деформации (%).

Сопротивление раздиранию (мН) определяли на приборе L&W Tearing Tester (AB Lorentzen & Wettre, Швеция) согласно ГОСТ [34] по методу Эльмендорфа. Для тестирования использовали образцы отливок шириной 45 ± 1 мм, длиной 63 ± 0.1 мм. Испытания проводили в продольном (MD) и поперечном направлении (CD). Одновременно проводилось испытание четырех образцов, сложенных вместе.

Сопротивление сжатию на коротком расстоянии (кН/м) и индекс сжатия (Н·м/г) оценивали при помощи прибора SCT (Frank-PTI, Германия) согласно ГОСТ [36]. Для тестирования использовали образцы отливок шириной 15 ± 0.1 мм, длиной 100 ± 0.1 мм. Испытания проводили в продольном (MD) и поперечном направлении (CD).

Сопротивление продавливанию (кПа) определяли по ГОСТ [36] на приборе L&W SE 180 (AB Lorentzen & Wettre, Швеция). Для тестирования использовали образцы отливок размером 70×70 мм. Испытания проводили на двух сторонах отливки (сеточной и внешней), результаты усредняли.

Воздухопроницаемость и шероховатость/гладкость определяли методом Bendtsen (ISO 5636-3) и по ГОСТ [37] соответственно. Воздухопроницаемость оценивали для двух сторон отливки (сеточной и внешней), результаты усредняли.

Определение капиллярной впитываемости проводится по ГОСТ [38]. Испытуемые полосы бумаги шириной 15 мм закрепляли одним концом в зажимах планки вертикально так, чтобы полосы находились на расстоянии 1–2 мм от линейки, а свободные концы полосок были на 5–10 мм ниже нулевого деления линейки. После ослабления винта и опускания поперечной планки до нижнего положения фиксировали начало впитывания по секундомеру. По истечении 10 мин определяли по линейке высоту поднятия воды.

Обсуждение результатов

Длина волокна является одним из ключевых параметров для определения способности материала формировать однородное полотно. Оценку длины, а также формы волокон целлюлозы проводили микроскопическим методом с/без окрашивания по Херцбергу (хлорид цинка-йод).

При микроскопическом анализе обнаружено несколько различных типов структурно-размерных элементов: остатки оболочки водорослей, многочисленные волокна, а также пучки (скопления) (рис. 2).

Волокна имеют вид плоских лент с обрубленными концами равномерной ширины с узким внутренним каналом. Характерных отличительных особенностей на поверхности волокон не обнаружено. Волокна извилистые с многочисленными перевитостями длиной от 100 до 250 мкм, шириной до 18 мкм. Из волокон подобного ленточного строения обычно получается плотная прочная бумага с сомкнутой поверхностью. На некоторых волокнах замечена сильная фибриляция по длине волокна, которая отражается в наличии «распушенных» участков. Подобные неровности поверхности волокна должны обеспечивать лучшую адгезию и формирование прочных материалов.

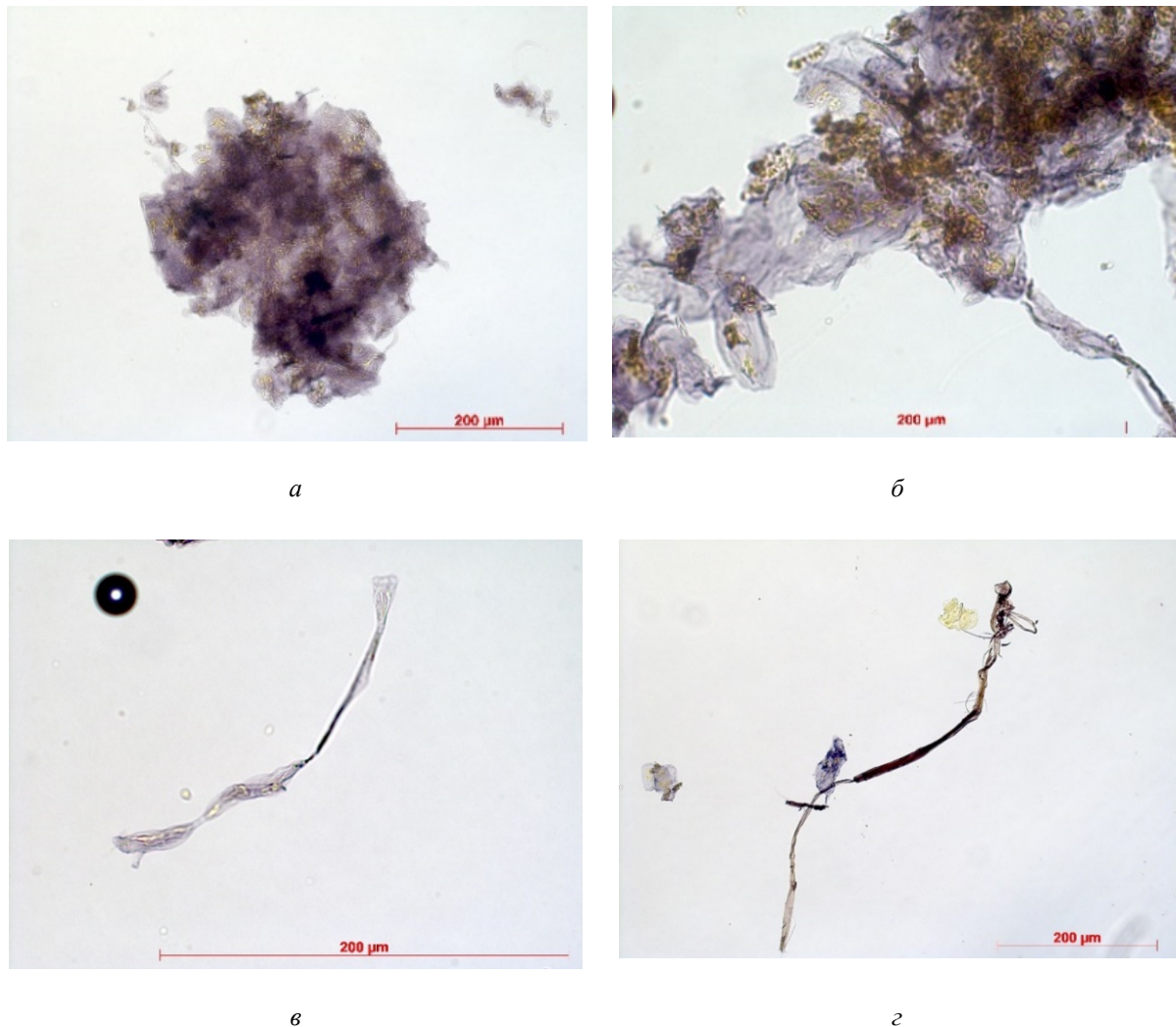
При окрашивании образца реактивом Херцберга (хлор-цинк-йод) практически все элементы окрасились преимущественно в синий и сине-фиолетовый цвета (рис. 2). У части волокон во внутреннем канале обнаружены круглые и продолговатые небольшого размера внутренние включения.

Также обнаруживается наличие желтого окрашивания волокна, которое в соответствии с методикой [39] свидетельствует о локальном распределении фенольных соединений, которые прочно связаны с углеводной матрицей. При дальнейшем исследовании оболочки и сравнении с растительными целлюлозами обнаружено, что желтым цветом могут окрашиваться хлоропласты, а сама оболочка – синим цветом.

На поверхности крупных частиц также выделяются области с коричнево-желтым окрашиванием (рис. 2а, б), что свидетельствует о наличии включений другого состава.

Таблица 2. Структурно-размерные свойства образцов бумаги из 100% лиственной (ЛЦ) и с добавлением водорослевой целлюлозы (ЛВЦ)

Параметры	ЛЦ	ЛВЦ
Толщина, мкм	127.8	179.9
Масса метра квадратного бумаги, г/м ²	70.0	85.5

Рис. 2. Снимки образцов агрегатов (*а, б*) и волокон (*в, г*) водорослевой целлюлозы с окрашиванием

Микроскопический анализ волокон водорослевой целлюлозы позволил установить, что исследуемые материалы характеризуются как коротковолокнистые с локальным распределением фенольных соединений, которые прочно связаны с углеводной матрицей.

Полученные результаты подтвердили, проведя испытания качества волокна на приборе Fibertester. Распределение частиц по размерам приведено на рисунке 3.

Сопоставительное исследование структуры водорослевой и лиственной целлюлозы выявило существенные различия в организации капиллярно-пористой матрицы. Так, водорослевая целлюлоза является мезопористой с развитой удельной площадью поверхности (табл. 3, рис. 4).

Создание новых и совершенствование существующих технологических процессов переработки волокнистых целлюлозных материалов основано на изучении механизмов взаимодействия в системе биополимер-растворитель. Поскольку в большинстве процессов в качестве растворителя используется вода, это изучение вопросов влагосодержания, капиллярного поглощения, энергетического обезвоживания целлюлозной матрицы становится все более актуальными.

На рисунке 5 приведены кривые адсорбции-десорбции паров воды водорослевой и лиственной целлюлозы.

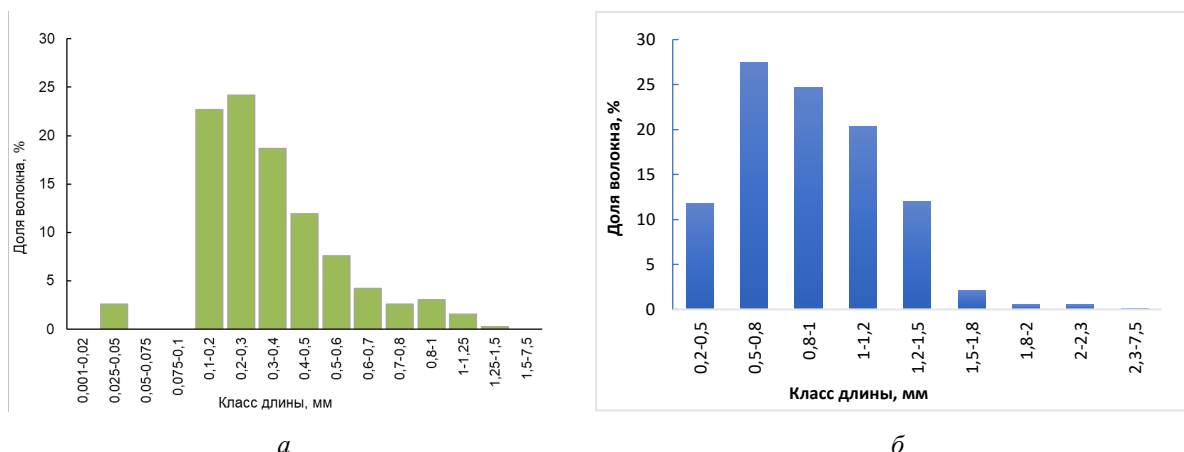


Рис. 3. Распределение частиц по длинам: а) водорослевой целлюлозы б) лиственной целлюлозы

Таблица 3. Характеристика капиллярно-пористой структуры исследуемых неразмолотых целлюлоз: водорослевая (ВЦ) и лиственная (ЛЦ)

Показатель	Метод	ВЦ	ЛЦ
Удельная площадь поверхности (SA), м ² /г	BET	6.87	1.45
Объем пор (V), см ³ /г	BET	0.022	0.002
Объем мезопор, см ³ /г	ВНДес, Broekhoff-de Boer	0.021	0.001
Объем микропор, см ³ /г	Horvath-Kawazoe	0.0033	0.0003
Средний диаметр пор, нм	BET	9.09	5.96

При проведении исследования капиллярно-пористой структуры лиственная и водорослевая целлюлозы размолу не подвергались.

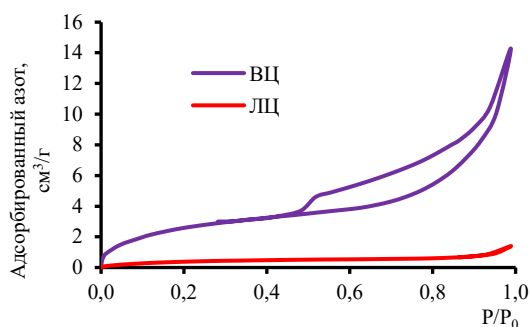


Рис. 4. Изотермы низкотемпературной сорбции-десорбции азота образцов водорослевой (ВЦ) и лиственной (ЛЦ) целлюлозы

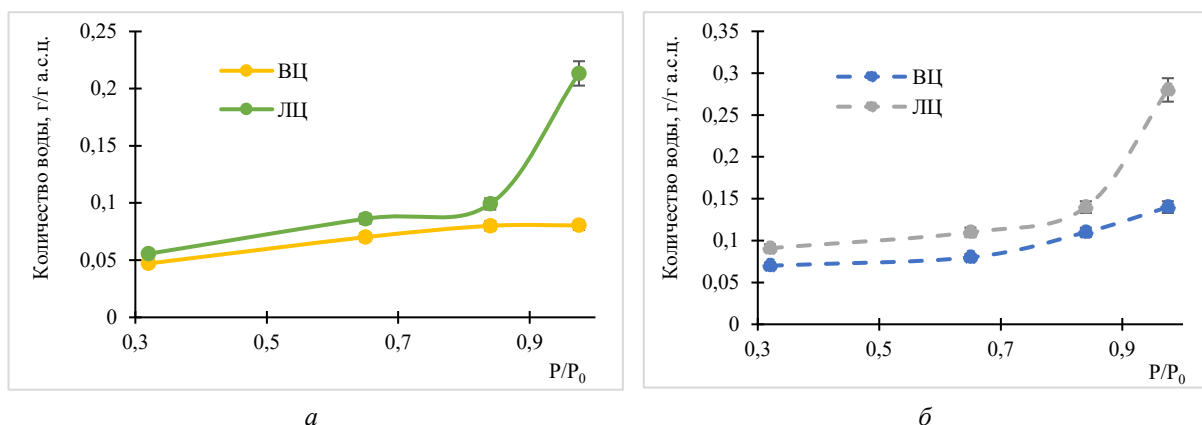


Рис. 5. Кривые адсорбции (а) – десорбции (б) паров воды водорослевой и лиственной целлюлозы

На графике видно, что кривая сорбции лиственной целлюлозы имеет сигмоидную форму с резким возрастанием влагопоглощения при высоких относительных давлениях насыщенных паров, близких к единице. Подобное поведение характерно для мезопористых материалов, в которых наблюдается явление капиллярной конденсации. На изотермах сорбции водорослевой целлюлозы зафиксировано наличие плато насыщения при $P/P_0 > 0.6$.

Величина влагопоглощения ВЦ согласуется с результатами, полученными для целлюлоз различного происхождения, обработки, кристалличности [40]. Поскольку сорбция воды сильно связана с доступностью макромолекул, плотностью их упаковки, т.е. кристалличностью, то с ростом кристалличности наблюдается снижение влагопоглощения образца. Следует также учитывать, что ЛЦ имеет неоднородный химический состав [41].

Создание дополнительного слоя водорослевой целлюлозы на лист из лиственной целлюлозы оказывает влияние на механические свойства конечного продукта (табл. 4, 5). Так, видно, что композит обладает меньшими показателями воздухопроницаемости и капиллярной впитываемости, что, вероятно, обусловлено формированием плотного слоя ВЦ, состоящего из волокон малого размера. Коротковолокнистая водорослевая целлюлоза при этом придает материалу шероховатость, что является важным показателем, для которых важна адгезия клеевого слоя.

Показатели жесткости, сопротивления сжатию и раздиранию (табл. 4) выше у композита. Однако остальные показатели отражают спад прочностных характеристик при нанесении слоя водорослевой целлюлозы по сравнению с чистым образцом лиственной целлюлозы.

На основании результатов испытаний бумагу из водорослевой целлюлозы можно использовать для этикеток марок М и А (ГОСТ [42]). Марка М используется для этикеток с односторонним мелованием и предназначена для печатания высококачественных многокрасочных этикеток офсетным способом с последующей отделкой (бронзирование, лакирование, конгревное тиснение, фигурная высечка). Марка А является каландрированной и предназначена для печатания офсетным способом многокрасочных этикеток с последующей отделкой (бронзирование, лакирование, фигурная высечка).

Кроме бумагообразующих свойств исследована фракционная эффективность фильтрования у образцов (табл. 6) с использованием аэрозоля с частицами латекса (ГОСТ [43]). Как видно из результатов, добавление покрытия водорослевой целлюлозы увеличило эффективность фильтрования композита.

Таблица 4. Механические свойства полотна лиственной целлюлозы (ЛЦ), лиственной целлюлозы с добавлением водорослевой (ЛВЦ)

Показатель	ЛЦ	ЛВЦ
Воздухопроницаемость, с	8.99	8.19
Шероховатость, мл/мин (для ЛВЦ с лицевой стороны)	1260	1590
Относительное сопротивление продавливанию, кПа	370	265
Капиллярная впитываемость, мм (MD)	51	46

Таблица 5. Механические свойства полотна лиственной целлюлозы (ЛЦ), лиственной целлюлозы с добавлением водорослевой (ЛВЦ) в продольном (MD) и поперечном (CD) направлениях

Показатель	CD		MD	
	ЛЦ	ЛВЦ	ЛЦ	ЛВЦ
Разрывная длина L , м	3690	2460	8290	6740
Плотность ρ , кг/м ³	0.51	0.46	0.53	0.43
Жесткость при растяжении S_t , кН/м	195	210	420	500
Разрушающая нагрузка F , Н	37.8	30.7	84.1	79.1
Разрушающее напряжение σ_p , МПа	18.8	11.3	44.5	29.2
Удлинение Δl , мм	9.34	7.11	7.82	5.96
Деформация разрушения ε_p , %	5.19	3.95	4.35	3.32
Относительное сопротивление раздиранию R_o , мН	1000	880	670	600
Сопротивление сжатию на коротком расстоянии SCT, кН/м	1.3	1.2	2.2	2.4
Индекс сжатия, Н·м/г	18.5	14.9	31.9	29.9

Таблица 6. Эффективность фильтрования

D (μ m)	Eff. (%)		Δ , %
	ЛЦ	ВЦ	
0.03000	69.72	85.63	15.91
0.05000	60.48	75.73	15.25
0.10000	59.65	76.41	16.76
0.20000	60.47	75.08	14.61
0.30000	74.65	82.51	7.87

Ориентируясь на классификацию высокоэффективных фильтров очистки воздуха ЕРА, НЕРА, ULPA, можно отметить, что эффективность полученных нами материалов ниже, чем регламентируется ГОСТ [44] (эффективность $\geq 85\%$). Однако полученные значения соответствуют фильтрам средней очистки класса М5 и М6 [45]. Данные фильтры используются:

- а) в качестве наружных воздушных фильтров для помещений с низкими требованиями к качеству воздуха (например, заводские здания, складские помещения, гаражи);
- б) для предварительной и циркуляционной фильтрации воздуха в венткамерах;
- в) как финишные фильтры в кондиционерах для торговых залов, универмагов, офисов и отдельных производственных помещений;
- г) в качестве префильтров для классов фильтров от F9 до E11.

Выводы

Исследовано влияние структурных характеристик алгулезы на свойства композита – двухслойного материала на основе беленой листовенной целлюлозы и водорослевой целлюлозы, полученной из арктической бурой водоросли вида *Saccharina latissima*, отобранной в акватории о. Большой Соловецкий (Белое море).

Установлено, что водорослевая целлюлоза имеет мезопористую структуру с развитой удельной площадью поверхности. Размер волокон водорослевой целлюлозы колеблется в интервале 0.1–0.4 мм, а по своей морфологии они имеют лентообразную форму, часть из которых перекручена, целлюлоза может быть отнесена к коротковолокнистому виду волокнистых полуфабрикатов.

Выявлено снижение показателей прочностных характеристик композиционного двухслойного материала из листовенной целлюлозы с нанесением слоя водорослевой по сравнению с полотном из листовенной целлюлозы. Добавка водорослевой целлюлозы придает бумажному полотну дополнительную шероховатость, снижает воздухопроницаемость и капиллярную впитываемость. Исследование механических свойств материала показало возможность применения данного композита для производства бумаги с разносторонней гладкостью.

Установлено, что исследуемая целлюлоза из арктической бурой водоросли вида *Saccharina latissima* может быть более эффективно использована для создания фильтров для средней очистки класса М5 и М6 основе композиции листовенной и водорослевой целлюлозы.

Финансирование

Исследование выполнено в рамках проектной части государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ в сфере научной деятельности FSRU-2023-004 с использованием научного оборудования Инновационно-технологического центра «Современные технологии переработки биоресурсов Севера» САФУ.

Конфликт интересов

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Открытый доступ

Эта статья распространяется на условиях международной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая разрешает неограниченное использование, распространение и воспроизведение на любом носителе при условии, что вы дадите соответствующие ссылки на автора(ов) и источник и предоставите ссылку на Лицензию Creative Commons и укажете, были ли внесены изменения.

Список литературы

1. Zanchetta E., Damergi E., Patel B., Borgmeyer T., Pick H., Pulgarin A., Ludwig C. Algal cellulose, production and potential use in plastics: Challenges and opportunities // *Algal Res.* 2021. Vol. 56. 102288. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102288>.
2. Samyn P., Pappa I., Lama S., Vandamme D. Algae for nanocellulose production // *Bioprospecting Algae for Nanosized Materials*. Springer Nature Switzerland AG, 2021. Pp. 293–343. https://doi.org/10.1007/978-3-030-81557-8_13.
3. Siddhanta A.K. et al. Profiling of cellulose content in Indian seaweed species // *Bioresour. Technol.* 2009. Vol. 100, no. 24. Pp. 6669–6673. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.07.047>.
4. Siddhanta A.K. et al. The cellulose contents of Indian seaweeds // *J. Appl. Phycol.* 2011. Vol. 23, no. 5. Pp. 919–923. <https://doi.org/10.1007/s10811-010-9599-2>.
5. Koyama M., Sugiyama J., Itoh T. Systematic survey on crystalline features of algal celluloses // *Cellulose*. 1997. Vol. 4, no. 2. Pp. 147–160. <https://doi.org/10.1023/A:1018427604670>.
6. Chen Y.W. et al. Production of new cellulose nanomaterial from red algae marine biomass *Gelidium elegans* // *Carbohydr. Polym.* 2016. Vol. 151. Pp. 1210–1219. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.06.083>.

7. Mihanryan A. Cellulose from Cladophorales green algae: from environmental problem to high-tech composite materials // J. Appl. Polym. Sci. 2011. Vol. 119, no. 4. Pp. 2499–2460. <https://doi.org/10.1002/app.32959>.
8. Halib N. et al. Potential applications of nanocellulose-containing materials in the biomedical field // Materials. 2017. Vol. 10, no. 8. Pp. 1–31. <https://doi.org/10.3390/ma10080977>.
9. Domozych D.S. Biosynthesis of the cell walls of the algae // The Physiology of Microalgae. Cham: Springer International Publishing, 2016. Pp. 47–63. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24945-2_2.
10. Li S. et al. Cellulose synthesis and its regulation // Arab. B. 2014. Vol. 12. e0169. <https://doi.org/10.1199/tab.0169>.
11. McNamara J.T., Morgan J.L.W., Zimmer J. A molecular description of cellulose biosynthesis // Annu. Rev. Biochem. 2015. Vol. 84. Pp. 895–921. <https://doi.org/10.1146/annurev-biochem-060614-033930>.
12. Gardner K.H., Blackwell J. The structure of native cellulose // Biopolymers. 1974. Vol. 13, no. 10. Pp. 1975–2001. <https://doi.org/10.1002/bip.1974.360131005>.
13. Tsekos I. The sites of cellulose synthesis in algae: diversity and evolution of cellulose-synthesizing enzyme complexes // J. Phycol. 1999. Vol. 35, no. 4. Pp. 635–655. <https://doi.org/10.1046/j.1529-8817.1999.3540635.x>.
14. Roberts A.W., Roberts E.M., Delmer D.P. Cellulose synthase (CesA) genes in the green alga *Mesoteneium caldarium* // Eukaryot. Cell. 2002. Vol. 1, no. 6. Pp. 847–855. <https://doi.org/10.1128/EC.1.6.847-855.2002>.
15. Chan W.S., Kwok A.C.M., Wong J.T.Y. Knockdown of dinoflagellate cellulose synthase CesA1 resulted in malformed intracellular cellulosic thecal plates and severely impeded cyst-to-swarm transition // Front. Microbiol. 2019. Vol. 10. Pp. 1–14. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.01783>.
16. Roberts A.W., Roberts E. Evolution of the cellulose synthase (CesA) gene family: insights from green algae and seedless plants // Cellulose: Molecular and Structural Biology. Springer, 2007. Pp. 17–34. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5380-1_2.
17. Bogolitsyn K.G. et al. Isolation and structural characterization of cellulose from Arctic brown algae // Chem. Nat. Compd. 2017. Vol. 53, no. 3. Pp. 533–537. <https://doi.org/10.1007/s10600-017-2039-7>.
18. Алешина Л.А. и др. Структура и физико-химические свойства целлюлоз и нанокмпозитов на их основе. Петрозаводск, 2014. 240 с.
19. Wahlstrom N., Edlund U., Pavia H., Toth G., Jaworski A., Pell A.J., Choong F.X., Shirani H., Nilsson K.P.R., Richter-Dahlfors A. Cellulose from the green macroalgae *Ulva lactuca*: isolation, characterization, optotracing, and production of cellulose nanofibrils // Cellulose. 2020. Vol. 27. Pp. 3707–3725. <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03029-5>.
20. Bogolitsyn K., Parshina A., Ivanchenko N., Polomarchuk D. Seasonal variations in the chemical composition of Arctic brown macroalgae // Algal Research. 2023. Vol. 72. 103112. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2023.103112>.
21. Фляте Д.М. Технология бумаги: учебник для вузов. М., 1988. 440 с.
22. Bogolitsyn K.G., Zubov I.N., Gusakova M.A., Chukhchin D.G., Krasikova A.A. Juniper wood structure under the microscope // Planta. 2015. Vol. 241. Pp. 1231–1239. <https://doi.org/10.1007/s00425-015-2252-1>.
23. Болотова К.С., Чухчин Д.Г., Майер Л.В., Гурьянова А.А. Морфологические особенности фибриллярной структуры растительной и бактериальной целлюлозы // Лесной журнал. 2016. №6. С. 153–165. <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2016.6.153>.
24. Грунин Ю.Б., Грунин Л.Ю., Никольская Е.А., Таланцев В.И., Масас Д.С. Надмолекулярная структура целлюлозы // Butlerov Communications. 2011. Vol. 24, no. 4. Pp. 35–52.
25. Боголицын К.Г., Овчинников Д.В., Каплицын П.А., Дружинина А.С., Паршина А.Э., Шульгина Е.В., Семушина М.П., Алешина Л.А. Выделение и структурная характеристика целлюлозы арктических бурых водорослей // Химия природных соединений. 2017. №3. С. 452–456.
26. Паршина А.Э., Боголицын К.Г., Иванченко Н.Л., Поломarchuk Д.А. Сорбция кадмия, свинца и хрома (VI) целлюлозными комплексами арктических бурых водорослей // Химия растительного сырья. 2022. №3. С. 325–336. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20220311299>.
27. Bogolitsyn K., Parshina A., Karmanov A., Kocheva L., Rachkova N., Polomarchuk D. Sorption of uranium and thorium by cellulose complexes of Arctic brown algae // Journal of Applied Phycology. 2023. Vol. 35. Pp. 1813–1819. <https://doi.org/10.1007/s10811-023-02976-3>.
28. ГОСТ 28172-89. Целлюлоза сульфатная белая из смеси лиственных пород древесины. Технические условия. М., 1989. 8 с.
29. Боголицын К.Г., Паршина А.Э., Шкаева Н.В., Алешина Л.А., Прусский А.И., Сидорова О.В., Богданович Н.И., Архилин М.А. Влияние вида сушки на структурно-поверхностные характеристики целлюлозы бурых водорослей // Сверхкритические флюиды: теория и практика. 2021. Т. 16, №2. С. 110–130. <https://doi.org/10.34984/SCFTP.2021.16.2.013>.
30. ГОСТ 30437-96. Целлюлоза. Метод определения белизны. М., 2001.
31. ГОСТ Р ИСО 11476-2010. Бумага и картон. Метод определения белизны по CIE. C/2° осветитель (искусственное освещение). М., 2012.
32. ГОСТ 13523-78. Полуфабрикаты волокнистые, бумага и картон. Метод кондиционирования образцов. М., 1978. 4 с.
33. ГОСТ 13525.1-79. Полуфабрикаты волокнистые, бумага и картон. Методы определения прочности на разрыв и удлинения при растяжении. М., 1979. 5 с.
34. ГОСТ 13525.3-78. Полуфабрикаты волокнистые и бумага. Метод определения сопротивления раздиранию. М., 1978. 11 с.

35. ГОСТ Р ИСО 9895-2013. Национальный стандарт Российской Федерации бумага и картон. Определение сопротивления сжатию. Метод испытания на коротком расстоянии между зажимами. М., 2013. 12 с.
36. ГОСТ 13525.8-86. Полуфабрикаты волокнистые, бумага и картон. Метод определения сопротивления продавливанию. М., 1986. 6 с.
37. ГОСТ 30115-95. Бумага и картон. Определение шероховатости/гладкости (методы с применением пропускания воздуха). Общие требования. Минск, 1999. 7 с.
38. ГОСТ 12602-93. Бумага и картон. Определение капиллярной впитываемости. Метод Клемма. Минск, 1995. 8 с.
39. ГОСТ 7500-85. Бумага и картон. Методы определения состава по волокну. М., 1987. 50 с.
40. Zhao C. et al. Gelation of Na-alginate aqueous solution: a study of sodium ion dynamics via NMR relaxometry // *Carbohydrate Polymers*. 2017. Vol. 169. Pp. 206–212. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.03.099>.
41. Ioelovich M. Physicochemical methods for determination of cellulose crystallinity // *ChemXpress*. 2016. Vol. 9, no. 3. Pp. 245–251.
42. ГОСТ 7625-86. Бумага этикеточная. Технические условия. М., 1986. 11 с.
43. ГОСТ Р ЕН 1822-3-2012. Высокоэффективные фильтры очистки воздуха ЕРА, НЕРА и ULPA. Часть 3. Испытания плоского фильтрующего материала. М., 2014. 22 с.
44. ГОСТ 1822-1-2010 Р ЕН. Высокоэффективные фильтры очистки воздуха ЕРА, НЕРА и ULPA. Часть 1. Классификация, методы испытаний, маркировка. М., 2011. 12 с.
45. ГОСТ Р ЕН 779-2014. Фильтры очистки воздуха общего назначения. Определение технических характеристик. М., 2015. 68 с.

Поступила в редакцию 25 января 2024 г.

После переработки 26 марта 2024 г.

Принята к публикации 12 ноября 2024 г.

Polomarchuk D.A.^{1}, Osovskaya I.I.², Sevastyanova Y.V.¹, Bogolitsyn K.G.^{1,3}, Parshina A.E.¹, Bogdanovich N.I.¹*
 INFLUENCE OF CAPILLARY-POROUS STRUCTURE OF CELLULOSE ON PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES OF FIBROUS MATERIAL

¹ Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, nab. Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russia, polomarchuk.d@edu.narfu.ru

² St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Graduate School of Technology and Energy, Ivan Chernykh st., 4, St. Petersburg, 198095, Russia

³ Institute of Ecological Problems of the North FICCIA, Ural Branch of RAS, nab. Severnoy Dviny, 109, Arkhangelsk, 163000, Russia

The aim of this work is to determine the influence of structural characteristics of algal cellulose on the properties of composite material based on hardwood cellulose. In this work we used sulfate bleached hardwood pulp and algal cellulose obtained from the Arctic brown alga *Saccharina latissima* sampled in the White Sea. A number of analyses were carried out to establish the influence of structural characteristics of algal cellulose on the properties of the composite material. Algal cellulose has a mesoporous structure with a developed specific surface area. The algal cellulose fibers are ribbon-shaped, partly twisted. Their sizes varies in the range of 0.1–0.4 mm. The study of physical and mechanical properties of composite paper made of hardwood pulp with algae cellulose additive revealed differences with regular paper made of pure hardwood pulp. The addition of algal cellulose imparts roughness to the paper, reduces air permeability and capillary absorption. The composite also demonstrate increased filtration ability. The resulting composite paper is perspective in the production of specific papers.

Keywords: brown algae, hardwood pulp, algal pulp, paper web, composite.

For citing: Polomarchuk D.A., Osovskaya I.I., Sevastyanova Y.V., Bogolitsyn K.G., Parshina A.E., Bogdanovich N.I. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2025, no. 1, pp. 351–362. (in Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.20250114679>.

* Corresponding author.

References

1. Zanchetta E., Damergi E., Patel B., Borgmeyer T., Pick H., Pulgarin A., Ludwig C. *Algal Res.*, 2021, vol. 56, 102288. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102288>.
2. Samyn P., Pappa I., Lama S., Vandamme D. *Bioprospecting Algae for Nanosized Materials*. Springer Nature Switzerland AG, 2021, pp. 293–343. https://doi.org/10.1007/978-3-030-81557-8_13.
3. Siddhanta A.K. et al. *Bioresour. Technol.*, 2009, vol. 100, no. 24, pp. 6669–6673. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.07.047>.
4. Siddhanta A.K. et al. *J. Appl. Phycol.*, 2011, vol. 23, no. 5, pp. 919–923. <https://doi.org/10.1007/s10811-010-9599-2>.
5. Koyama M., Sugiyama J., Itoh T. *Cellulose*, 1997, vol. 4, no. 2, pp. 147–160. <https://doi.org/10.1023/A:1018427604670>.
6. Chen Y.W. et al. *Carbohydr. Polym.*, 2016, vol. 151, pp. 1210–1219. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.06.083>.
7. Mihranyan A. *J. Appl. Polym. Sci.*, 2011, vol. 119, no. 4, pp. 2499–2460. <https://doi.org/10.1002/app.32959>.
8. Halib N. et al. *Materials*, 2017, vol. 10, no. 8, pp. 1–31. <https://doi.org/10.3390/ma10080977>.
9. Zanchetta E. et al. *Algal Res.*, 2021, vol. 56, 102288. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102288>.
10. Domozych D.S. *The Physiology of Microalgae*. Cham: Springer International Publishing, 2016, pp. 47–63. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24945-2_2.
11. Li S. et al. *Arab. B.*, 2014, vol. 12, e0169. <https://doi.org/10.1199/tab.0169>.
12. McNamara J.T., Morgan J.L.W., Zimmer J. *Annu. Rev. Biochem.*, 2015, vol. 84, pp. 895–921. <https://doi.org/10.1146/annurev-biochem-060614-033930>.
13. Gardner K.H., Blackwell J. *Biopolymers*, 1974, vol. 13, no. 10, pp. 1975–2001. <https://doi.org/10.1002/bip.1974.360131005>.
14. Tsekos I. *J. Phycol.*, 1999, vol. 35, no. 4, pp. 635–655. <https://doi.org/10.1046/j.1529-8817.1999.3540635.x>.
15. Roberts A.W., Roberts E.M., Delmer D.P. *Eukaryot. Cell.*, 2002, vol. 1, no. 6, pp. 847–855. <https://doi.org/10.1128/EC.1.6.847-855.2002>.
16. Chan W.S., Kwok A.C.M., Wong J.T.Y. *Front. Microbiol.*, 2019, vol. 10, pp. 1–14. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.01783>.
17. Roberts A.W., Roberts E. *Cellulose: Molecular and Structural Biology*. Springer, 2007, pp. 17–34. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5380-1_2.
18. Bogolitsyn K.G. et al. *Chem. Nat. Compd.*, 2017, vol. 53, no. 3, pp. 533–537. <https://doi.org/10.1007/s10600-017-2039-7>.
19. Aleshina L.A. i dr. *Struktura i fiziko-khimicheskiye svoystva tsellyuloz i nanokompozitov na ikh osnove*. [Structure and physicochemical properties of celluloses and nanocomposites based on them]. Petrozavodsk, 2014, 240 p. (in Russ.).
20. Wahlstrom N., Edlund U., Pavia H., Toth G., Jaworski A., Pell A.J., Choong F.X., Shirani H., Nilsson K.P.R., Richter-Dahlfors A. *Cellulose*, 2020, vol. 27, pp. 3707–3725. <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03029-5>.
21. Bogolitsyn K., Parshina A., Ivanchenko N., Polomarchuk D. *Algal Research*, 2023, vol. 72, 103112. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2023.103112>.
22. Flyate D.M. *Tekhnologiya bumagi: uchebnik dlya vuzov*. [Paper technology: textbook for universities]. Moscow, 1988, 440 p. (in Russ.).
23. Bogolitsyn K.G., Zubov I.N., Gusakova M.A., Chukhchin D.G., Krasikova A.A. *Planta*, 2015, vol. 241, pp. 1231–1239. <https://doi.org/10.1007/s00425-015-2252-1>.
24. Bolotova K.S., Chukhchin D.G., Mayyer L.V., Gur'yanova A.A. *Lesnoy zhurnal*, 2016, no. 6, pp. 153–165. <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2016.6.153>. (in Russ.).
25. Grunin Yu.B., Grunin L.Yu., Nikol'skaya Ye.A., Talantsev V.I., Masas D.S. *Butlerov Communications*, 2011, vol. 24, no. 4, pp. 35–52. (in Russ.).
26. Bogolitsyn K.G., Ovchinnikov D.V., Kaplitsin P.A., Druzhinina A.S., Parshina A.E., Shul'gina Ye.V., Semushina M.P., Aleshina L.A. *Khimiya prirodnikh soyedineniy*, 2017, no. 3, pp. 452–456. (in Russ.).
27. Parshina A.E., Bogolitsyn K.G., Ivanchenko N.L., Polomarchuk D.A. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2022, no. 3, pp. 325–336. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20220311299>. (in Russ.).
28. Bogolitsyn K., Parshina A., Karmanov A., Kocheva L., Rachkova N., Polomarchuk D. *Journal of Applied Phycology*, 2023, vol. 35, pp. 1813–1819. <https://doi.org/10.1007/s10811-023-02976-3>.
29. GOST 28172-89. *Tsellyuloza sul'fatnaya belenaya iz smesi listvennykh porod drevesiny. Tekhnicheskiye usloviya*. [GOST 28172-89. Bleached sulfate pulp from a mixture of hardwood species. Technical conditions]. Moscow, 1989, 8 p. (in Russ.).
30. Bogolitsyn K.G., Parshina A.E., Shkayeva N.V., Aleshina L.A., Prusskiy A.I., Sidorova O.V., Bogdanovich N.I., Arkhilin M.A. *Sverkhkriticheskiye flyuidy: teoriya i praktika*, 2021, vol. 16, no. 2, pp. 110–130. <https://doi.org/10.34984/SCFTP.2021.16.2.013>. (in Russ.).
31. GOST 30437-96. *Tsellyuloza. Metod opredeleniya belizny*. [GOST 30437-96. Cellulose. Method for determining whiteness]. Moscow, 2001. (in Russ.).
32. GOST R ISO 11476-2010. *Bumaga i karton. Metod opredeleniya belizny po CIE. S/2° osvetitel' (iskusstvennoye osveshcheniye)*. [GOST R ISO 11476-2010. Paper and cardboard. Method for determination of whiteness according to CIE. C/2° illuminant (artificial lighting)]. Moscow, 2012. (in Russ.).

33. GOST 13523-78. *Polufabrikaty voloknistyye, bumaga i karton. Metod konditsionirovaniya obraztsov*. [GOST 13523-78. Semi-finished fibrous products, paper and cardboard. Method of conditioning samples]. Moscow, 1978, 4 p. (in Russ.).
34. GOST 13525.1-79. *Polufabrikaty voloknistyye, bumaga i karton. Metody opredeleniya prochnosti na razryv i udlineniya pri rastyazhenii*. [GOST 13525.1-79. Semi-finished fibrous products, paper and cardboard. Methods for determining tensile strength and tensile elongation]. Moscow, 1979, 5 p. (in Russ.).
35. GOST 13525.3-78. *Polufabrikaty voloknistyye i bumaga. Metod opredeleniya soprotivleniya razdiraniyu*. [GOST 13525.3-78. Semi-finished fibrous products and paper. Method for determining tear resistance]. Moscow, 1978, 11 p. (in Russ.).
36. GOST R ISO 9895-2013. *Natsional'nyy standart Rossiyskoy Federatsii bumaga i karton. Opredeleniye soprotivleniya szhatiye. Metod ispytaniya na korotkom rasstoyanii mezhdu zazhimami*. [GOST R ISO 9895-2013. National standard of the Russian Federation paper and cardboard. Determination of compression resistance. Short-distance test method between clamps]. Moscow, 2013, 12 p. (in Russ.).
37. GOST 13525.8-86. *Polufabrikaty voloknistyye, bumaga i karton. Metod opredeleniya soprotivleniya prodavlivaniyu*. [GOST 13525.8-86. Semi-finished fibrous products, paper and cardboard. Method for determining the indentation resistance]. Moscow, 1986, 6 p. (in Russ.).
38. GOST 30115-95. *Bumaga i karton. Opredeleniye sherokhovatosti/gladkosti (metody s primeneniye propuskaniya vozdukh)*. *Obshchiye trebovaniya*. [GOST 30115-95. Paper and cardboard. Determination of roughness/smoothness (methods using air passage). General requirements]. Minsk, 1999, 7 p. (in Russ.).
39. GOST 12602-93. *Bumaga i karton. Opredeleniye kapillyarnoy vpityvayemosti. Metod Klemma*. [GOST 12602-93. Paper and cardboard. Determination of capillary absorbency. Klemm method]. Minsk, 1995, 8 p. (in Russ.).
40. GOST 7500-85. *Bumaga i karton. Metody opredeleniya sostava po voloknu*. [GOST 7500-85. Paper and cardboard. Methods for determining the composition by fiber]. Moscow, 1987, 50 p. (in Russ.).
41. Zhao C. et al. *Carbohydrate Polymers*, 2017, vol. 169, pp. 206–212. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.03.099>.
42. Ioelovich M. *ChemXpress*, 2016, vol. 9, no. 3, pp. 245–251.
43. GOST 7625-86. *Bumaga etiketchnaya. Tekhnicheskiye usloviya*. [GOST 7625-86. Label paper. Technical conditions]. Moscow, 1986, 11 p. (in Russ.).
44. GOST R YeN 1822-3-2012. *Vysokoeffektivnyye fil'try ochistki vozdukh EPA, HEPA i ULPA. Chast' 3. Ispytaniya ploskogo fil'tryushchego materiala*. [GOST R EN 1822-3-2012. High efficiency particulate air filters EPA, HEPA and ULPA. Part 3. Testing of flat filter material]. Moscow, 2014, 22 p. (in Russ.).
45. GOST 1822-1-2010 R YeN. *Vysokoeffektivnyye fil'try ochistki vozdukh EPA, HEPA i ULPA. Chast' 1. Klassifikatsiya, metody ispytaniy, markirovka*. [GOST 1822-1-2010 R EN. Highly efficient air purification filters EPA, HEPA and ULPA. Part 1. Classification, test methods, marking]. Moscow, 2011, 12 p. (in Russ.).
46. GOST R YeN 779-2014. *Fil'try ochistki vozdukh obshchego naznacheniya. Opredeleniye tekhnicheskikh kharakteristik*. [GOST R EN 779-2014. General-purpose air filters. Definition of technical characteristics]. Moscow, 2015, 68 p. (in Russ.).

Received January 25, 2024

Revised March 26, 2024

Accepted November 12, 2024

Сведения об авторах

Поломарчук Дарья Алексеевна – аспирант,
polomarchuk.d@edu.narfu.ru

Осовская Ираида Ивановна – кандидат химических наук, доцент, iraosov@mail.ru

Севастьянова Юлия Вениаминовна – кандидат технических наук, доцент, J.Sevastyanova@narfu.ru

Боголицын Константин Григорьевич – доктор химических наук, профессор, директор,
k.bogolitsin@narfu.ru

Паршина Анастасия Эдуардовна – кандидат химических наук, научный сотрудник,
a.parshina@narfu.ru

Богданович Николай Иванович – доктор химических наук, профессор, n.bogdanovich@narfu.ru

Information about authors

Polomarchuk Darya Alekseevna – postgraduate student,
polomarchuk.d@edu.narfu.ru

Osovskaya Irada Ivanovna – candidate of chemical sciences, associate professor, iraosov@mail.ru

Sevastyanova Yulia Veniaminovna – candidate of technical sciences, associate professor, J.Sevastyanova@narfu.ru

Bogolitsyn Konstantin Grigorievich – doctor of chemical sciences, professor, director, k.bogolitsin@narfu.ru

Parshina Anastasia Eduardovna – candidate of chemical sciences, research fellow, a.parshina@narfu.ru

Bogdanovich Nikolay Ivanovich – doctor of chemical sciences, professor, n.bogdanovich@narfu.ru