

ISSN 1561-8331 (Print)

ISSN 2524-2342 (Online)

УДК 676.017.272

<https://doi.org/10.29235/1561-8331-2026-62-3-240-251>

Поступила в редакцию 09.02.2026

Received 09.02.2026

Я. В. Казаков¹, Д. Г. Чухчин¹, М. М. Ямова¹, В. Л. Флейшер²¹Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова, Архангельск, Россия²Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь**ПРИМЕНЕНИЕ ИК-НПВО-СПЕКТРОСКОПИИ
ДЛЯ ОЦЕНКИ КОМПОНЕНТНОГО СОСТАВА БУМАГИ**

Аннотация. Предложена и описана технология определения состава бумаги по волокну с применением ИК-НПВО-спектроскопии, позволяющая повысить скорость и репрезентативность измерения. Технология включает идентификацию микроскопическим методом волокон определенного вида в композиции бумаги и определение процентного содержания волокон, отличных от волокон лиственной и хвойной сульфатной целлюлозы, используя полученные калибровочные зависимости. Применяли стандартные лабораторные отливки двух видов с различным составом по волокну: из хвойной и лиственной блененной товарной сульфатной целлюлозы (в соотношении 50 : 50 %) с добавлением блененной химико-термомеханической массы взамен лиственной и хвойной в количестве от 5 до 40 % и из неблененной сульфатной хвойной (21 ед. каппа) и лиственной (16 ед. каппа) целлюлозы, в композицию которой вводили неблененную целлюлозу из бамбука (17 ед. каппа) в количестве от 10 до 50 %. С использованием ИК-НПВО-спектроскопии установлено, что увеличение доли блененной химико-термомеханической массы или бамбуковой целлюлозы приводит к систематическим изменениям спектральных характеристик бумаги, обусловленным различиями в содержании и составе лигнина, гемицеллюлоз и экстрактивных веществ компонентов бумаги. Для количественной оценки изменений в спектрах выбраны соотношения интенсивностей аналитических полос, не зависящие от условий съемки спектра: 1 500, 1 400, 1 110 см⁻¹ для блененной химико-термомеханической массы и 1 070, 667, 1 736, 1 580 см⁻¹ для бамбуковой целлюлозы. На основе установленных калибровочных зависимостей получены уравнения регрессии, позволяющие определять содержание блененной химико-термомеханической массы или бамбуковой целлюлозы в образцах бумаги по соотношению интенсивностей аналитических полос в ИК-спектрах. Предложенный метод существенно превосходит традиционные химические и микроскопические подходы по скорости, воспроизводимости и трудозатратам и может быть полезен на целлюлозно-бумажных предприятиях для оперативного контроля композиций.

Ключевые слова: ИК-НПВО-спектроскопия, компонентный состав, бумага, целлюлоза, лигнин, неразрушающий анализ, блененная химико-термомеханическая масса, бамбуковая целлюлоза

Для цитирования. Применение ИК-НПВО-спектроскопии для оценки компонентного состава бумаги / Я. В. Казаков, Д. Г. Чухчин, М. М. Ямова, В. Л. Флейшер // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя хімічных навук. – 2026. – Т. 62, № 3. – С. 240–251. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2026-62-3-240-251>

Ya. V. Kazakov¹, D. G. Chukhchin¹, M. M. Yamova¹, V. L. Fleisher²¹Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov²Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus**APPLICATION OF IR-ATR SPECTROSCOPY TO ASSESS THE COMPONENT
COMPOSITION OF PAPER**

Abstract. A technology for determining the fiber composition of paper using IR-ATR spectroscopy is proposed and described, allowing for increased rapidity and representativeness of the measurements. The technology includes microscopic identification of a certain type of fiber in the paper composition; and determination of the percentage content of fibers other than hardwood and softwood kraft pulp, using the obtained calibration dependencies. The experiment involved standard laboratory handmade sheets of two types with different fiber compositions: from softwood and hardwood bleached commercial kraft pulp (in a 50 : 50 ratio) with the addition of bleached chemical-thermomechanical pulp instead of hardwood and softwood in an amount of 5 to 40%; and from unbleached kraft softwood (kappa number 21) and hardwood (kappa number 16) pulp, into the composition of which unbleached bamboo pulp (kappa number 17) was introduced in an amount of 10 to 50 %. Using IR-ATR spectroscopy, it was found that an increase in the proportion of bleached chemical-thermomechanical pulp or bamboo pulp leads to systematic changes in the spectral characteristics of the paper, due to differences in the content and composition of lignin, hemicelluloses and extractive substances of the paper components. To quantitatively assess the changes in the spectra, the intensity ratios of the analytical bands were selected that are independent of the spectrum recording conditions: 1 500, 1 400, 1 110 cm⁻¹ for bleached chemical-thermomechanical pulp and 1 070, 667, 1 736, 1 580 cm⁻¹ for bamboo pulp. Based on the established calibration relationships, regression equations were derived for determining the bleached chemical-thermomechanical pulp or bamboo pulp content in paper samples based on the intensity ratio of analytical bands in IR spectra. The proposed method significantly outperforms traditional chemical and microscopic approaches in terms of speed, reproducibility, and labor costs and can be useful in pulp and paper mills for the rapid monitoring of compositions.

Keywords: IR-ATR spectroscopy, component composition, paper, cellulose, lignin, non-destructive analysis, bleached chemi-cal-thermomechanical pulp, bamboo pulp

For citation. Kazakov Ya. V., Chukhchin D. G., Yamova M. M., Fleisher V. L. Application of IR-ATR spectroscopy to assess the component composition of paper. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical Series*, 2026, vol. 62, no. 3, pp. 240–251 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2026-62-3-240-251>

Введение. Бумага представляет собой листовой волокнистый материал, структура которого сформирована путем переплетения и связеобразования растительных волокон беспорядочным образом. Для производства целлюлозно-бумажных материалов используются волокнистые материалы преимущественно органического происхождения в виде древесных и недревесных волокон. Для того чтобы придать бумаге специфические свойства, применяют различные неволокнистые добавки, такие как отбеливатели, красители, проклеивающие вещества и наполнители [1].

Современная целлюлозно-бумажная промышленность производит широкий спектр бумаги и картона различного назначения. Потребительские и эксплуатационные свойства и внешний вид бумажной продукции варьируются в очень широких пределах для соответствия своему назначению. Различные свойства бумаге придают, как правило, путем подбора исходных полуфабрикатов, изменения параметров процессов производства бумаги, введения в бумажную массу различных вспомогательных веществ, отделки и поверхностной обработки бумаги [2].

Одним из общепринятых способов достижения необходимых свойств является использование в композиции бумаги или картона нескольких отличных по свойствам волокнистых полуфабрикатов. Традиционно в композицию бумаги включают лиственную и хвойную целлюлозу, механические массы, в некоторых случаях – целлюлозу из недревесного сырья [3].

Техническая, особенно беленая, целлюлоза, – это достаточно дорогостоящий материал, технология производства которого вызывает определенные нарекания с экологической точки зрения, поэтому производители бумаги пытаются заменить целлюлозу в композиции без ущерба качеству бумаги [4]. Например, введение в композицию бумаги белой химико-механической древесной массы позволяет снизить себестоимость продукции и пойти по пути ресурсосбережения. Так, при производстве химико-термомеханической массы (ХТММ) продукт имеет высокий выход из древесины [5]; исключены хлорсодержащие реагенты при отбелке; отсутствуют дурнопахнущие серосодержащие газовые выбросы в атмосферу.

Другим решением может стать использование целлюлозы из недревесного сырья, энерго- и ресурсоемкость получения которой понижена. В условиях интенсификации развития сотрудничества со странами БРИКС и АТЭС интересным решением является использование целлюлозы из бамбука [6].

Таким образом, представляется перспективным и практически используется частичная замена дорогостоящей целлюлозы на механические массы или недревесную целлюлозу в композиции некоторых видов бумаги и картона. Однако и в том, и в другом случае производители бумаги применяют технологические решения, компенсирующие снижение механических показателей продукции, повышение пухлости и впитывающей способности.

Каждый вид целлюлозного волокна обладает набором свойств и выполняет свою роль в формировании структуры и качества бумаги, поэтому в целом идентификация бумаги, анализ и оценка ее состава и структуры – это задача, постоянно возникающая при изучении возможностей применения определенного вида бумаги для специализированного использования.

Техника проведения качественного и количественного анализа состава бумаги по волокну стандартно определяется микроскопическим методом по ГОСТ 7500-85, в основе которого лежит различная окраска волокон разного вида, морфологии, происхождения и способа выделения, при введении в микропрепарат специальных реактивов и красителей. В данном случае определяют вид волокон и их процентное содержание. Качественный анализ состава бумаги проводят путем рассмотрения под микроскопом препаратов, окрашенных красителем, например хлор-цинк-йодом.

На рис. 1 представлены микрофотографии, полученные на исследовательском микроскопе высокого разрешения ImagerM2m Carl Zeiss при 100-кратном увеличении. Хорошо видны визуальные отличия в морфологии лиственных, хвойных, бамбуковых волокон и волокон ХТММ, а по цвету окраски хорошо различаются беленая целлюлоза и ХТММ.

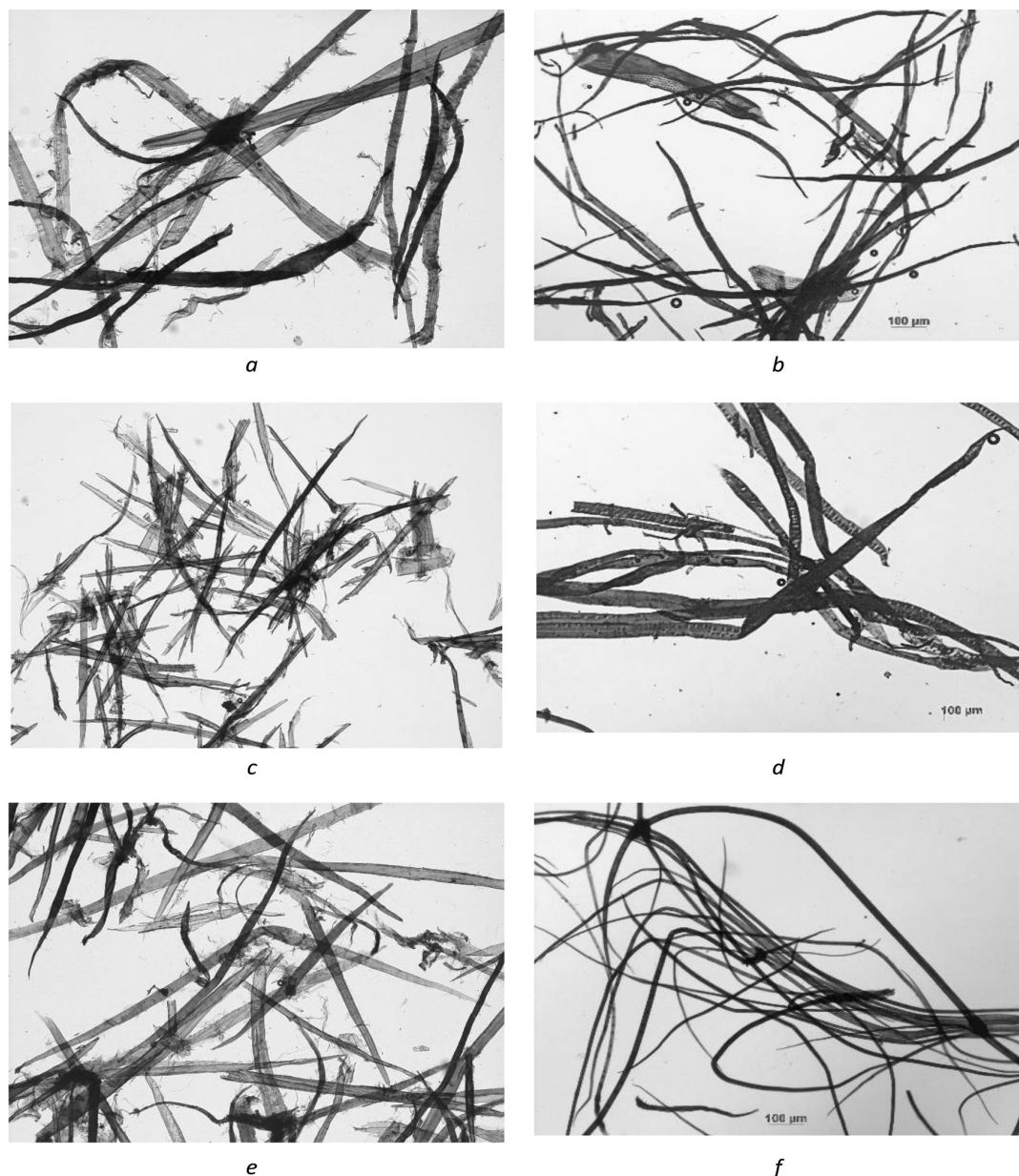


Рис. 1. Микрофотографии целлюлозных волокон, составляющих композицию бумаги:
a, c, e – белая бумага; *b, d, f* – небеленая целлюлоза; *a* – смесь лиственных и хвойных волокон 50 : 50 %;
b – лиственная целлюлоза; *c* – лиственная БХТММ; *d* – хвойная целлюлоза; *e* – смесь лиственной,
 хвойной и БХТММ; *f* – волокна небеленой целлюлозы из бамбука

Fig. 1. Microphotographs of cellulose fibers comprising the paper composition: *a, c, e* – white paper; *b, d, f* – unbleached pulp; *a* – mixture of hardwood and softwood fibers 50 : 50 %; *b* – hardwood pulp; *c* – hardwood BCTMP; *d* – softwood pulp; *e* – mixture of hardwood, softwood, and BCTMP; *f* – fibers of unbleached pulp from bamboo

Количественное определение волокнистых полуфабрикатов, входящих в состав бумаги, может быть выполнено путем подсчета волокон. Данный метод достаточно трудоемкий, времязатратный и не эффективен при анализе большого количества образцов бумаги. Для получения надежного результата его должен выполнять высококвалифицированный персонал.

В связи с этим существует объективная потребность в разработке простых и экспрессных способов определения содержания этих компонентов, среди которых ИК-спектроскопия представляется подходящим и привлекательным методом.

В мировой научной практике при изучении свойств, строения и химического состава различных материалов широко используется ИК-спектроскопия, и целлюлозосодержащие материалы

растительного происхождения не являются исключением. Известно, что применение ИК-спектроскопии для определения состава древесины началось еще во второй половине XX в. под руководством Б. Н. Карклина [7, 8]. В настоящее время область применения ИК-спектроскопии охватывает многие аспекты технологии целлюлозно-бумажного производства, а сам метод позволяет выполнить анализ свойств растительного сырья, химических вспомогательных веществ, состава бумаги и наполнителя, мониторинга изменения свойств бумаги во времени [9]. Так как бумага является многокомпонентным материалом, то ее инфракрасный спектр представляет собой сумму спектров отдельных компонентов. При этом важно найти способ корректного выделения спектров индивидуальных компонентов из общего экспериментального спектра.

Известен опыт использования ИК-спектроскопии, например, для контроля процесса сульфитной варки. Некоторые ученые [10] в ходе варки определяли остаточное содержание лигнина в варочном растворе и вычисляли число Каппа на различных этапах технологического процесса. По результатам ими предложен механизм прогнозирования варочного процесса на основе модели числа Каппа.

Есть примеры применения ИК-спектроскопии для оценки свойств различных видов бумаги и качества оттиска при печати, где объектами анализа выступают бумага из целлюлозных волокон, используемая для переплетов, печати этикеток, и мелованный картон [11]. Получение ИК-спектров в разных точках поверхности и изучение полос поглощения образцов бумаги дали возможность прогнозирования качества оттиска при печати.

ИК-спектроскопия также успешно используется для оценки содержания лигнина в растительных волокнах, составляющих композицию бумаги [12].

При производстве волокнистых полуфабрикатов наблюдаются колебания породного состава, что напрямую влияет на физико-механические свойства технической целлюлозы. Е. О. Окулова, А. В. Гурьев, М. А. Холмова исследовали возможность быстрого определения породного состава листовых волокнистых полуфабрикатов из осины и березы с помощью метода нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) ИК-Фурье-спектроскопии при получении экспресс-данных о долях осины и березы в образце прямо с поверхности целлюлозных отливок без дополнительной подготовки проб [13].

Таким образом, ИК-спектроскопия является широко распространенным методом для оценки состава и свойств целлюлозно-бумажных материалов растительного происхождения [14]. Этот метод достаточно эффективен, для анализа требуется небольшое количество материала, а сама процедура не занимает много времени. Использование ее модификации в НПВО-технологии расширяет возможности для исследования волокнистых целлюлозных материалов [15], однако для анализа композиции бумаги как многокомпонентной системы на основе растительных волокон различного происхождения, способа выделения и обработки сведений в литературе приводится недостаточно. Простота пробоподготовки, доступность аппаратуры и экспрессность делает ИК-НПВО-спектроскопию полезным инструментом для исследования целлюлозно-бумажных материалов, с помощью которого можно быстро получить качественные и количественные данные.

Целью настоящей работы является оценка возможности применения ИК-НПВО-спектроскопии для количественной оценки компонентного состава бумаги с известным качественным составом по волокну.

Материалы и методы. В качестве объектов исследования использовали изготовленные стандартные лабораторные отливки с различным компонентным составом по волокну. Было изготовлено два вида лабораторных образцов: из беленой хвойной и лиственной товарной сульфатной целлюлозы (в соотношении 50 : 50 %) с добавлением БХТММ взамен лиственной и хвойной; из небеленой сульфатной хвойной (21 ед. каппа) и лиственной (16 ед. каппа) целлюлозы. Дополнительно в композицию вводили небеленую целлюлозу из бамбука (17 ед. каппа) [6].

Композиция составлялась до размолва. Размол выполнялся совместный на мельнице Йокро до степени помола 40 °ШР, суммарная навеска 16 г по а. с. в. составлялась из воздушно-сухих полуфабрикатов. Составленные смеси подвергались совместному роспуску в гидроразбивателе при концентрации 1,5 % и затем обезвоживались на воронке Бюхнера с тряпичным фильтром до концентрации 6 %. Параллельно для сравнения выполняли размол каждого из использованных полуфабрикатов, то есть при их 100%-м содержании в бумажной массе.

ИК-спектры регистрировали на Фурье-спектрометре Vertex 70 (Bruker, Германия), приставка НПВО GladiATR (Pike Tech., США), материал кристалла НПВО – искусственный алмаз. Условия: строгая поляризация ИК-излучения, диапазон записи спектров – 4 000–400 см⁻¹, разрешение – 4 см⁻¹, количество параллельных сканирований образца – 128. Для обработки спектров использовали программное обеспечение, позволяющее проанализировать изменения в спектре и построить зависимости отношения интенсивности поглощения полос различных функциональных групп от условий проведения анализа [16].

Для подтверждения наличия волокон различного вида в составе бумаги предварительно проводился микроскопический анализ с применением цифрового микроскопа Carl Zeiss Axio Imager M2m, Германия [17] (см. рис. 1). На снимках отчетливо прослеживается наличие различных волокон – хвойных, лиственных и БХТММ (см. рис. 1, е) для белой бумаги и бамбуковых (рис. 1, f) в небеленой бумаге, однако количественную оценку содержания БХТММ или бамбуковой целлюлозы с помощью микроскопического метода осуществить достаточно сложно.

Результаты и их обсуждение. Оценка компонентного состава белой бумаги с БХТММ в композиции с применением ИК-НПВО-спектроскопии. Поскольку основная область применения ИК-спектроскопии – это определение химического состава различных веществ, то изменение химического состава бумаги за счет введения в нее БХТММ должно привести к изменениям в спектре бумаги.

БХТММ представляет собой перспективный вид древесных волокнистых полуфабрикатов (ВПФ) с высоким выходом продукции, превышающим 85 %. Этот материал получают путем комбинации химической, термической и механической обработки древесины, что позволяет сохранять значительную часть исходного сырья и обеспечивать экономическую эффективность производства. В настоящее время БХТММ активно производится в Китае, где на 34 предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности (ЦБП) функционирует более 50 технологических линий. Общая производительность этих линий достигает 10,73 млн т в год. На 25 из указанных линий полуфабрикат получают из древесины тополя или смеси тополя и эвкалипта, что подчеркивает адаптивность технологии к доступным видам сырья [18].

Традиционно БХТММ применяется для изготовления газетной бумаги, белых сортов бумаги для печати, а также в составе композиций для тароупаковочного картона. Однако в условиях снижения спроса на печатные виды бумаги и одновременного роста мирового производства ВПФ высокого выхода (преимущественно в Китае) возникает необходимость в исследовании новых областей применения этого материала. Дополнительно перспективы развития БХТММ связаны с ее использованием в экологически ориентированных производствах. Благодаря высокому выходу и возможности отбеливания без значительных потерь волокон БХТММ может быть интегрирована в производство биоразлагаемых упаковочных материалов, композитных панелей для строительства и даже в текстильную промышленность для создания волокнистых армирующих добавок. Такие новые области применения позволят не только диверсифицировать рынки сбыта, но и будут способствовать устойчивому развитию отрасли, минимизируя отходы и оптимизируя ресурсопотребление [18].

В табл. 1 приведены литературные данные по компонентному составу волокнистых полуфабрикатов, использованных в ходе эксперимента [19–22]. Целлюлозные материалы – беленая сульфатная целлюлоза (хвойная, лиственная) и БХТММ – отличаются главным образом содержанием остаточного лигнина, а отличия в составе гемицеллюлоз и экстрактивных веществ менее существенны.

Таблица 1. Компонентный состав беленых полуфабрикатов

Table 1. Component composition of bleached pulp samples

Компонент	Лиственная беленая целлюлоза	Хвойная беленая целлюлоза	Лиственная (осиновая) БХТММ
Целлюлоза, %	75,0–76,0	80,0–82,0	58–62
Лигнин, %	0,5–1,0	0,5–1,0	20–22
Гемицеллюлозы, %:			
гексозаны	21,9–22,3	14,0–14,5	18–20
пентозаны	0,2–0,3	7,0–7,1	4–5
Экстрактивные вещества, %	21,7–22,0	7,0–7,5	14–16
Зола, %	до 0,5	до 0,5	1,0–1,5
	до 0,3	до 0,3	до 0,5

Изменение композиции отливок бумаги по волокну за счет увеличения доли БХТММ привело к появлению изменений в полученных ИК-спектрах (рис. 2).

ИК-спектр бумаги является сложной суперпозицией полос поглощения множества химических функциональных групп. Кроме того, количественный анализ ИК-НПВО-спектра затруднен тем, что интенсивность поглощения зависит от структуры поверхности и силы прижатия образца к алмазному окну, поэтому для количественного анализа возможно использование только измерения отношений интенсивностей полос при разных длинах волн, которые зависят только от химического состава бумаги. Выделить участок спектра, носящийся к одной группе и не пересекающийся с другой, крайне сложно.

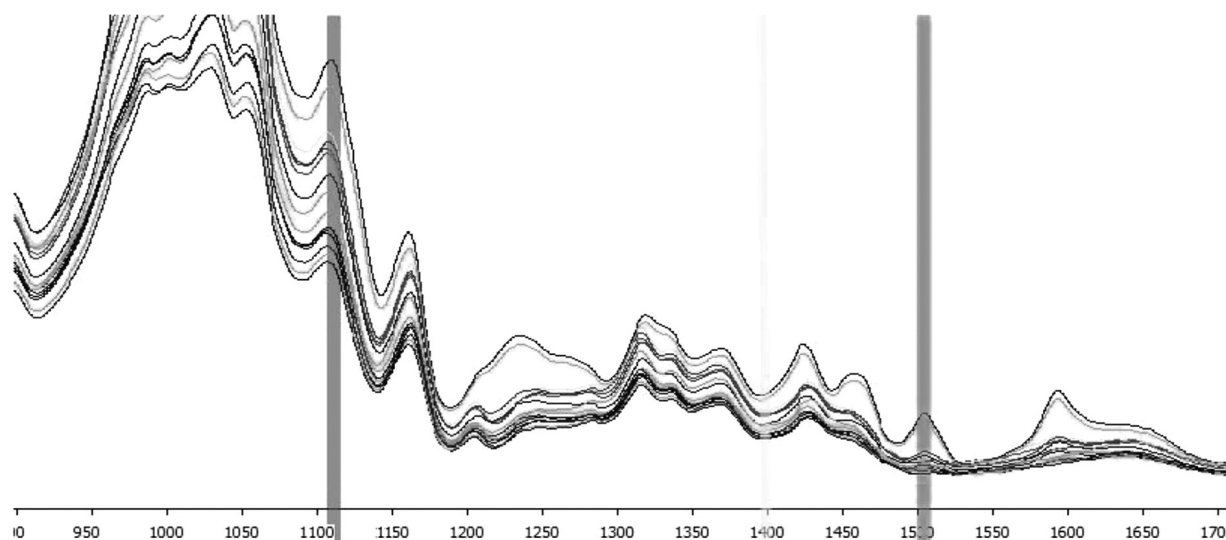


Рис. 2. Фрагмент спектров бумаги из беленой сульфатной целлюлозы с долей БХТММ от 0 до 100 % (выделены области 1 500, 1 400 и 1 110 см^{-1})

Fig. 2. Fragment of spectra of paper made from bleached kraft pulp with a BCTMP fraction from 0 to 100 % (highlighting the regions at 1 500, 1 400 and 1 110 cm^{-1})

Часто оказывается, что такой участок находится не на максимуме пика, а на его склоне. Для обнаружения таких участков разработана программа [16]. В нее загружается серия спектров и некоторая величина, корреляционную связь с которой требуется найти. Проверке подвергаются все области спектра, в нашем случае – процентный состав композиции бумаги с соответствующими спектрами. В результате расчета возможно обнаружение участков спектра, зависящих от процентного состава композиции и некоторого базового участка, относительно которого можно производить расчет.

Для анализа приняты полосы поглощения, соответствующие основным структурам компонентов волокнистых полуфабрикатов. Полоса поглощения 1 500 см^{-1} относится к валентным ароматическим скелетным колебаниям С–С-связей, которые характерны для лигнина, область 1 400 см^{-1} – к деформационным колебаниям С–Н-связей, в большей степени структур углеводов полимеров. Область 1 110 см^{-1} соответствует С–О-колебаниям пиранозного кольца, что характерно для углеводов [17, 20]. При увеличении доли БХТММ изменяется соотношение углеводы / лигнин и происходит изменение отношений D_{1500}/D_{1400} и D_{1500}/D_{1100} , где D – оптическая плотность). Обработка серий спектров с применением программного обеспечения [23] показало наличие прямой корреляционной зависимости между содержанием БХТММ в бумаге и соотношением интенсивностей полос поглощения D_{1500} и D_{1400} , а также D_{1500} и D_{1100} (табл. 2).

Зависимости, представленные на рис. 3, свидетельствуют о существовании тесных корреляционных зависимостей, что подтверждается величиной достоверности аппроксимации R^2 , которая превышает 0,99 для соотношения D_{1500}/D_{1400} , и почти достигает 0,98 для соотношения D_{1500}/D_{1100} .

Таблица 2. Влияние доли БХТММ в композиции бумаги на отношения интенсивностей полос поглощения ИК-спектров

Table 2. The influence of the proportion of BCTMP in the paper composition on the intensity ratios of the absorption bands of the IR spectra

Доля БХТММ в образце, %	Отношения интенсивностей полос ИК-спектров	
	D_{1500}/D_{1400}	D_{1500}/D_{1100}
0	0,08428	0,36371
0	0,09148	0,37833
5	0,10029	0,42244
5	0,09913	0,40340
10	0,10571	0,42269
10	0,10346	0,41568
15	0,10110	0,41777
15	0,09925	0,41526
20	0,11091	0,45597
20	0,10587	0,43991
30	0,11370	0,48574
30	0,11416	0,48606
40	0,12101	0,53097
40	0,12186	0,52769
100	0,18287	0,76874
100	0,18091	0,75120

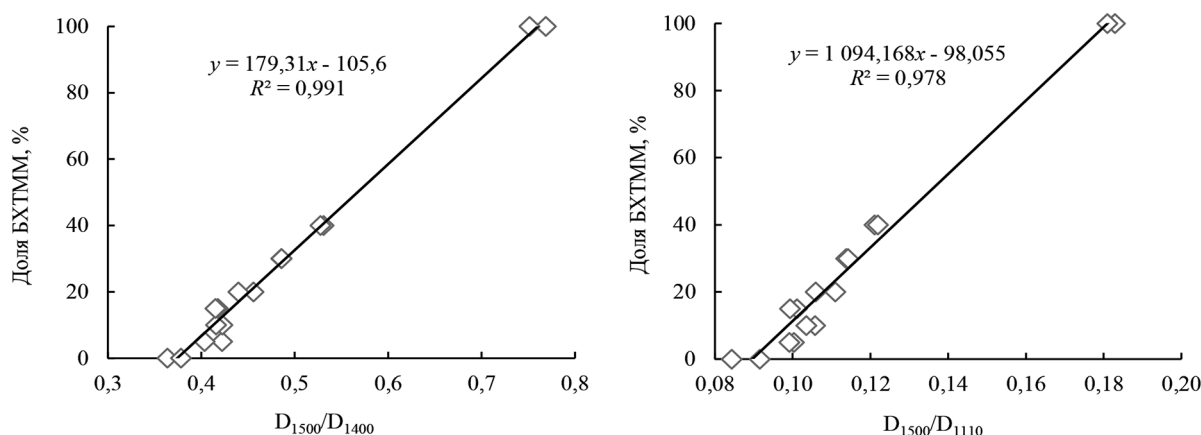


Рис. 3. Калибровочные зависимости для оценки содержания БХТММ в бумаге

Fig. 3. Calibration curves for assessing the BCTMP content in paper

На основании калибровочных графиков получены уравнения регрессии, позволяющие по соотношению интенсивности аналитических полос на ИК-спектрах определить содержание БХТММ в образце бумаги: $\%_{\text{БХТММ}} = 179,3 \cdot D_{1500/1400} - 105,6$; $R^2 = 0,991$; $\%_{\text{БХТММ}} = 1\,094,2 \cdot D_{1500/1100} - 98,1$; $R^2 = 0,978$.

Полученные калибровочные модели открывают возможность неdestructивного экспресс-анализа состава бумаги. Высокие значения R^2 (0,991 и 0,978) подтверждают линейность зависимости между спектральными характеристиками и долей БХТММ в широком диапазоне концентраций (0–100 %). Это позволяет использовать ИК-спектроскопию как альтернативу трудоемким методам, существенно сокращая время анализа и исключая необходимость подготовки проб.

Оценка компонентного состава небеленой упаковочной бумаги с бамбуковой целлюлозой в композиции с применением ИК-НПВО-спектроскопии. Для отечественной ЦБП расширение сырьевой базы возможно за счет использования экономически выгодных волокнистых полуфабрикатов из быстрорастущих растений, обитающих в странах БРИКС и АТЭС.

Так, интересным набором структурно-размерных свойств обладает целлюлоза из бамбука [24]. Исследования небеленой целлюлозы из бамбука *Bambusa blumeana* (Вьетнам) показали, что ее структурно-морфологические свойства отличны от свойств северных лиственных и хвойных целлюлоз. По сравнению с лиственной целлюлозой волокна бамбука более длинные (1,8 мм против 1,0 мм) и менее широкие (17 мкм против 26 мкм), более изогнутые (фактор формы 87,5 против 92,5) и имеют больше изломов (0,42 против 0,29). Волокна бамбука короче хвойной целлюлозы (1,8 против 2,5 мм), с меньшей шириной (17 против 30 мкм), чуть более изогнутые (фактор формы 87,5 против 86) и имеют больше изломов (0,42 против 0,35 на 1 мм) [6]. Таким образом, целлюлоза из бамбука обладает длинными, тонкими и изогнутыми волокнами, которые самостоятельно формируют пухлую структуру, обладающую высоким сопротивлением раздиранию и хорошей растяжимостью.

В табл. 3 приведены литературные данные по компонентному составу небеленых волокнистых полуфабрикатов, использованных в эксперименте [19–22, 25]: небеленая сульфатная хвойная (21 ед. каппа) и лиственная (16 ед. каппа) целлюлоза, к которой вводили небеленую целлюлозу из бамбука (17 ед. каппа) [24].

Таблица 3. Компонентный состав небеленых волокнистых полуфабрикатов

Table 3. Component composition of unbleached fiber pulp samples

Компонент	Лиственная небеленая целлюлоза	Хвойная небеленая целлюлоза	Бамбуковая небеленая
Целлюлоза, %	74–75	79–81	76–82
Лигнин, %	2–3	3–4	3,5–4,5
Гемицеллюлозы, %	21–22	10–11	12–14
Экстрактивные вещества, %	0,5	2–5	1–3
Зола, %	0,5–1,0	0,5–2,0	1,0–2,5

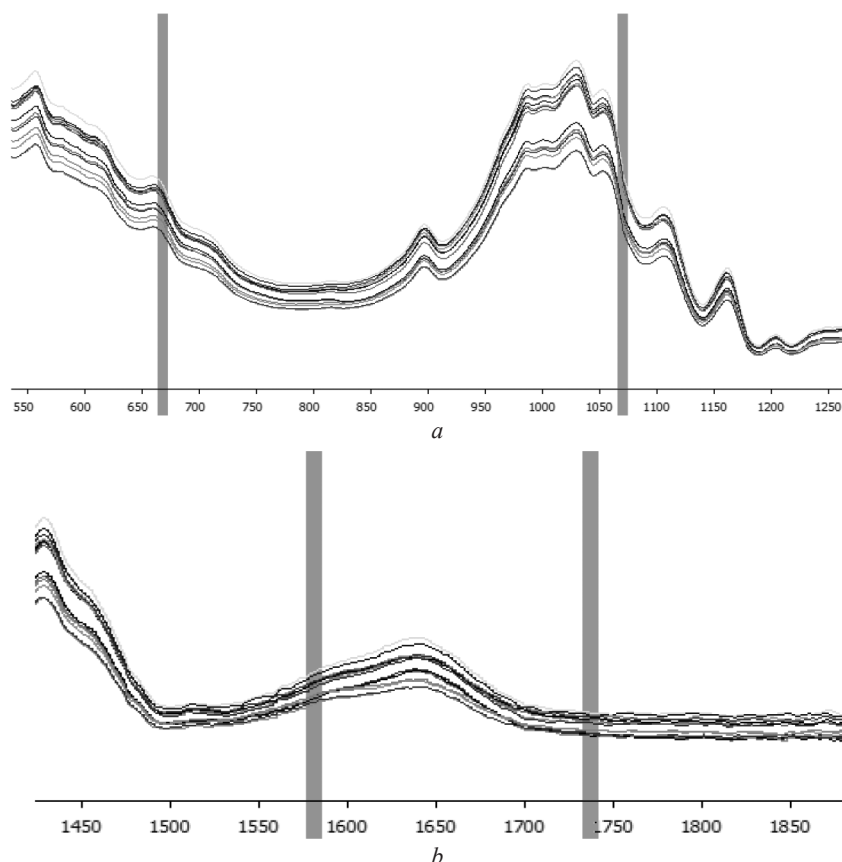


Рис. 4. Фрагменты спектров бумаги из небеленой сульфатной целлюлозы с долей бамбуковой целлюлозы от 0 до 100 %, выделены области: *a* – 667 и 1 070 см^{-1} ; *b* – 1 580 и 1 736 см^{-1}

Fig. 4. Fragments of spectra of paper made from unbleached sulfate pulp with a bamboo pulp fraction from 0 to 100 %, highlighting the regions: *a* – 667 and 1 070 cm^{-1} ; *b* – 1 580 and 1 736 cm^{-1}

При введении в композицию бумаги небеленой целлюлозы из бамбука в ней появляются компоненты, характерные для недревесной целлюлозы, что привело к изменениям в полученных ИК-спектрах (рис. 4). Для анализа приняты полосы поглощения, соответствующие основным структурам компонентов небеленых волокнистых полуфабрикатов. Поскольку использованы целлюлозы с примерно одинаковым выходом и содержанием лигнина, то изменения в спектрах могут быть связаны с другой природой бамбука, который относится к недревесному растительному сырью. Полоса $1\,070\text{ см}^{-1}$ соответствует С–О-скелетным колебаниям глюкопиранозного кольца углеводов. Область 667 см^{-1} относится к деформационным колебаниям С–Н-связей (внеплоскостные О–Н-связи), $1\,736\text{ см}^{-1}$ – к валентным колебаниям С=О-связей в карбонильных и карбоксильных группах, $1\,580\text{ см}^{-1}$ – к скелетным колебаниям бензольного кольца остаточного лигнина.

Зависимости, представленные на рис. 5, свидетельствуют о существовании корреляционных зависимостей, теснота которых несколько меньше, чем в случае смесей с БХТММ, что отражается в величине достоверности аппроксимации R^2 , которая превышает 0,97 для соотношения D_{1079}/D_{667} и для соотношения D_{1736}/D_{1580} .

Таблица 4. Влияние доли бамбуковой целлюлозы в композиции бумаги на отношения интенсивностей полос поглощения ИК-спектров

Table 4. The influence of the proportion of bamboo cellulose in the paper composition on the intensity ratios of the absorption bands of the IR spectra

Доля бамбуковой целлюлозы, %	Отношения интенсивности пиков ИК-спектров	
	D_{1070}/D_{667}	D_{1736}/D_{1580}
0	1,04506	0,55579
0	1,03519	0,56032
10	1,02366	0,57532
10	1,02233	0,58908
30	1,06368	0,62221
30	1,06120	0,61808
40	1,10250	0,64607
40	1,09502	0,64982
50	1,11069	0,65167
50	1,10867	0,65565
100	1,17531	0,67816
100	1,18470	0,67970

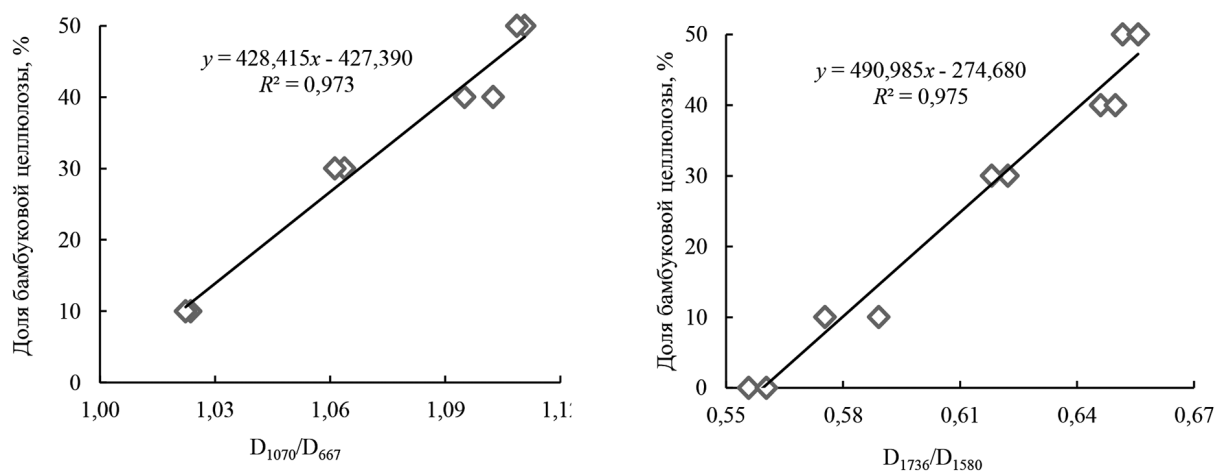


Рис. 5. Калибровочные зависимости для оценки содержания бамбуковой целлюлозы в бумаге

Fig. 5. Calibration curves for assessing the bamboo pulp content in paper

На основании калибровочных графиков (см. рис. 5) получены уравнения регрессии, позволяющие по соотношению интенсивности аналитических полос на ИК-спектрах определить содержание бамбуковой целлюлозы в образце бумаги: $\%_{\text{Бамбук}} = 428,4 \cdot D_{1070/667} - 427,4$; $R^2 = 0,973$; $\%_{\text{Бамбук}} = 491,0 \cdot D_{1736/1580} - 274,7$; $R^2 = 0,975$.

Выводы. Показана применимость ИК-НПВО-спектроскопии для оценки компонентного состава бумаги. Установлены калибровочные зависимости, позволяющие определять в композиции бумаги долю компонентов, отличных от хвойной и лиственной целлюлозы: БХТММ в белой бумаге и целлюлозы из бамбука в небеленой бумаге.

Предложена технология определения состава бумаги по волокну с применением ИК-НПВО-спектроскопии, позволяющая повысить экспрессность и репрезентативность измерения.

Технология включает идентификацию микроскопическим методом волокон определенного вида в композиции бумаги; определение процентного содержания волокон, отличных волокон лиственной и хвойной сульфатной целлюлозы, используя полученные калибровочные зависимости.

Список использованных источников

1. Использование наполнителей в технологии газетной бумаги / А. А. Пенкин, О. А. Новосельская, А. А. Князев [и др.] // Труды БГТУ. Серия IV. Химия, технология органических веществ и биотехнология. – 2010. – Вып. XVIII. – С. 216–219.
2. Флейшер, В. Л. Особенности применения эмульсий димеров алкилкетенов и модифицированных смоляных кислот в целлюлозных и макулатурных суспензиях для получения высококачественных видов бумаги и картона / В. Л. Флейшер, Н. В. Черная, Ж. С. Шашок // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя хімічных навук. – 2022. – Т. 58, № 2. – С. 237–250. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2022-58-2-237-250>
3. Захарчук, Д. Д. Комплексная переработка льна с получением инновационной продукции (обзор) / Д. Д. Захарчук, В. С. Болтовский // Труды БГТУ. Серия 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. – 2024. – № 2. – С. 77–91. <https://doi.org/10.52065/2520-2669-2024-283-10>
4. Лысаченкова, М. М. Бумагообразующие свойства беленых волокнистых полуфабрикатов высокого выхода с пониженной ресурсоемкостью / М. М. Лысаченкова, Я. В. Казаков // Экологические аспекты современных технологий в химико-лесном комплексе : сб. науч. материалов I и II науч.-практ. конф. / Федер. исслед. центр комплексного изучения Арктики им. акад. Н. П. Лаврова УрО РАН. – Архангельск, 2024. – С. 80–85.
5. Термомеханическая масса с использованием в ее композиции сосны обыкновенной, произрастающей на территории Республики Беларусь / Е. В. Дубоделова, С. И. Шпак, А. А. Пенкин [и др.] // Труды БГТУ. Серия 2. Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. – 2020. – № 1 (229). – С. 204–213.
6. Kazakov, Ya. V. Structural-Dimensional Properties of Plant Fibers with Combined Grinding of Conifer, Deciduous, and Bamboo Pulp / Ya. V. Kazakov, M. M. Lysachenkova, H. M. Khoa // Fibre Chemistry. – 2024. – Vol. 55 (6). – P. 380–385. <https://doi.org/10.1007/s10692-024-10496-0>
7. Карклинь, Б. Н. ИК-спектроскопия древесины и ее основных компонентов. VI. Определение содержания лигнина в препаратах сульфатной целлюлозы по ИК-спектрам / Б. Н. Карклинь, А. П. Трейманис, В. С. Громов // Химия древесины. – 1975. – № 2. – С. 52.
8. Карклинь, В. Б. ИК-спектроскопия древесины и ее основных компонентов. XII. Спектрохимические корреляции и их применение к анализу лигнина в древесине / В. Б. Карклинь, Я. А. Эйдус, З. Н. Крейцберг // Химия древесины. – 1977. – № 4. – С. 90.
9. Kaparaju, P. Characterization of lignin during oxidative and hydrothermal pre-treatment processes of wheat straw and corn stover / P. Kaparaju, C. Felby // Bioresource Technology. – 2010. – Vol. 101, № 9. – P. 3175–3181. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.12.008>
10. Wenhao, S. Measuring and Controlling Model of Pulp Kappa Number with Spectroscopy during Batch Sulfite Pulping Process / S. Wenhao, C. Xiaoquan // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2009. – Vol. 48, № 19. – P. 8980–8984. <https://doi.org/10.1021/ie900327a>
11. Варепо, Л. Г. Исследование свойств бумаг методом ИК-спектроскопии / Л. Г. Варепо // Фундаментальные исследования. – 2007. – № 12-3. – С. 463–464.
12. Деркачева, О. Ю. Оценка содержания лигнина в волокнах бумаги по данным ИК-спектроскопии отражения / О. Ю. Деркачева, Д. О. Цыпкин // Журнал прикладной спектроскопии. – 2017. – Т. 84, № 6. – С. 993–999.
13. Окулова, Е. О. Оценка соотношения волокон осины и березы в целлюлозных полуфабрикатах методом ИК-Фурье-спектроскопии / Е. О. Окулова, А. В. Гурьев, М. А. Холмова // Системы. Методы. Технологии. – 2021. – № 3 (51). – С. 122–128.
14. Методы исследования древесины и ее производных : учеб. пособие / Н. Г. Базарнова, Е. В. Карпова [и др.] ; ред. Н. Г. Базарнова. – Барнаул : Изд-во Алт. гос. ун-та, 2002. – 160 с.
15. Окулова, Е. О. Совершенствование технологического контроля породного состава в производстве целлюлозы из лиственной древесины : дис. ... канд. техн. наук : 4.3.4 / Окулова Елена Олеговна ; Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М. В. Ломоносова. – Архангельск, 2023. – 144 с.

16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2018661852. Программа для корреляционного анализа серий ИК-спектров : № 2018616255. Реестр программ для ЭВМ : опубл. 20.08.2018 / Чухчин Д. Г. ; заявитель и правообладатель ФГАОУ ВО САФУ (RU).
17. Практикум по технологии бумаги: часть 1. Анализ полуфабрикатов, химикатов и бумажной массы : учеб. пособие / Е. В. Дернова, В. В. Гораздова, А. В. Гурьев [и др.]. – Архангельск : Изд-во САФУ, 2022. – 88 с.
18. Переработка волокнистых полуфабрикатов высокого выхода / В. Н. Иванова, Д. Ю. Уварова, Л. Г. Махотина, Э. Л. Аким // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2017. – № 6. – С. 145–150. <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.6.145>
19. Midinfrared FT-IR as a tool for monitoring herbaceous biomass composition and its conversion to furfural / A. M. Raspolli Galletti, A. D'Alessio, D. Licursi [et al.] // Journal of Spectroscopy. – 2015. – Vol. 2015. – Art. 719042. <https://doi.org/10.1155/2015/719042>
20. Определение лигнина, целлюлозы и гемицеллюлозы в растительных материалах с помощью ИК-Фурье-спектроскопии / С. Г. Кострюков, Х. Б. Матякубов, Ю. Ю. Мастерова [и др.] // Журнал аналитической химии. – 2023. – Т. 78, № 6. – С. 496–506. <https://doi.org/10.31857/S0044450223040102>
21. Алешина, Л. А. Исследование структуры целлюлоз и лигнинов различного происхождения / Л. А. Алешина, Н. В. Мелех, А. Д. Фофанов // Химия растительного сырья. – 2005. – № 3. – С. 31–59.
22. Биокаталитическая конверсия сульфатной целлюлозы с применением комплекса целлюлоз *Penicillium verruculosum* / Е. В. Новожилов, И. Г. Синельников, А. С. Аксенов [и др.] // Катализ в промышленности. – 2016. – Т. 15, № 5. – С. 78–83.
23. Гляд, В. М. Характеристика остаточного лигнина сульфатной целлюлозы / В. М. Гляд, Д. А. Пономарев, Н. К. Политова // Химия растительного сырья. – 2010. – № 4. – С. 51–56.
24. Хоанг, М. К. Сравнительная характеристика бумагообразующих свойств целлюлозы из бамбука *Bambusa Blumeana* и древесины лиственных пород Вьетнама : дис. ... канд. техн. наук : 4.3.4 / Хоанг Минь Кхоа ; Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М. В. Ломоносова. – Архангельск, 2023. – 176 с.
25. Тышкунова, И. В. Биокаталитическая конверсия сульфатной целлюлозы с использованием комплекса карбогидраз *Penicillium verruculosum* : дис. ... канд. техн. наук : 05.21.03 / Тышкунова Ирина Владимировна ; Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М. В. Ломоносова. – Архангельск, 2018. – 160 с.

References

1. Penkin A. A., Novoselskaya O. A., Knyazev A. A., Snopkova T. A., Solovyova T. V. Use of fillers in newsprint technology. *Trudy BGTU. Seriya IV. Khimiya, tekhnologiya organicheskikh veshchestv i biotekhnologiya = Proceedings of BSTU. Series IV. Chemistry, Technology of Organic Substances, and Biotechnology*, 2010, no. 4, pp. 216–219 (in Russian).
2. Fleisher V. L., Chornaya N. V., Shashok Zh. S. Features of application of alkylketene dimer emulsions and modified resin acids in cellulosic and waste suspensions for obtaining high-quality types of paper and cardboard. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seriya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical Series*, 2022, vol. 58, no. 2, pp. 237–250 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2022-58-2-237-2>
3. Zakharchuk D. D., Boltovsky V. S. Complex processing of flax with the production of innovative products (review). *Trudy BGTU. Seriya 2. Khimicheskie tekhnologii, biotekhnologii, geoecologiya = Proceedings of BSTU. Series 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*, 2024, no. 2 (283), pp. 77–91 (in Russian). <https://doi.org/10.52065/2520-2669-2024-283-10>
4. Lysachenkova M. M., Kazakov Ya. V. Paper-forming properties of bleached high-yield fibrous semi-products with reduced resource intensity. *Ekologicheskie aspekty sovremennykh tekhnologii v khimiko-lesnom komplekse: materialy I i II nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Environmental aspects of modern technologies in the chemical-forest complex. Proceedings of the I and II Scientific and Practical Conference]. Arkhangelsk, Federal Research Center for Comprehensive Study of the Arctic named after Academician N. P. Laverov of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2024, pp. 80–85 (in Russian).
5. Dubodelova E. V., Shpak S. I., Penkin A. A. Thermomechanical mass with the use of Scots pine growing in the Republic of Belarus in its composition. *Trudy BGTU. Seriya 2. Khimicheskie tekhnologii, biotekhnologii, geoecologiya = Proceedings of BSTU. Series 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*, 2020, no. 1, pp. 204–213 (in Russian).
6. Kazakov Ya. V., Lysachenkova M. M., Khoa H. M. Structural-Dimensional Properties of Plant Fibers with Combined Grinding of Conifer, Deciduous, and Bamboo Pulp. *Fibre Chemistry*, 2024, vol. 55 (6), pp. 380–385. <https://doi.org/10.1007/s10692-024-10496-0>
7. Karklin' B. N., Treimanis A. P., Gromov V. S. IR spectroscopy of wood and its main components. VI. Determination of lignin content in sulfate pulp preparations by IR spectra. *Khimiya drevesiny = Wood Chemistry*, 1975, no. 2, pp. 52 (in Russian).
8. Karklin' V. B., Eidus Ya. A., Kreitsberg Z. N. IR spectroscopy of wood and its main components. XII. Spectrochemical correlations and their application to lignin analysis in wood. *Khimiya drevesiny = Wood Chemistry*, 1977, no. 4, p. 90 (in Russian).
9. Kaparaju P., Felby C. Characterization of lignin during oxidative and hydrothermal pre-treatment processes of wheat straw and corn stover. *Bioresource Technology*, 2010, vol. 101, no. 9, pp. 3175–3181. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.12.008>
10. Wenhao S., Xiaoquan Ch. Measuring and Controlling Model of Pulp Kappa Number with Spectroscopy during Batch Sulfite Pulping Process. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2009, vol. 48, pp. 8980–8984. <https://doi.org/10.1021/ie900421r>

11. Varepo L. G. Investigation of paper properties by IR spectroscopy. *Fundamental'nye issledovaniya = Fundamental Research*, 2007, no. 12-3, pp. 463–464 (in Russian).
12. Derkacheva O. Yu., Tsyarkin D. O. Lignin Content in Paper Fibers Assessed Using IR Reflectance Spectroscopy. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2018, vol. 84, pp. 1066–1071. <https://doi.org/10.1007/s10812-018-0588-6>
13. Okulova E. O., Gur'ev A. V., Kholmova M. A. Assessment of the ratio of aspen and birch fibers in cellulose semi-products by FTIR spectroscopy. *Sistemy. Metody. Tekhnologii = Systems. Methods. Technologies*, 2021, no. 3 (51), pp. 122–128 (in Russian).
14. Bazarnova N. G., Karpova E. V., Katrakov I. B. *Methods for studying wood and its derivatives*. Barnaul, Altai State University (ASU), 2002. 160 p. (in Russian).
15. Okulova E. O. *Improvement of technological control of species composition in the production of pulp from hardwood* [dissertation]. Arkhangelsk, 2023. 144 p. (in Russian).
16. Chukhchin D. G. *Program for correlation analysis of IR spectra series*. Certificate of state registration of computer program No. RU 2018661852. Publ. date. 20.08.2018 (in Russian).
17. Dernova E. V., Gorazdova V. V., Gur'ev A. V., Dul'kin D. A., Dernov A. I., Okulova E. O. *Workshop on paper technology: Part I. Analysis of semi-products, chemicals and paper pulp*. Arkhangelsk, SAFU, 2022. 88 p. (in Russian).
18. Ivanova V. N., Uvarova D. Yu., Makhotina L. G., Akim E. L. Processing of high-yield fibrous semi-products. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2017, no. 6, pp. 145–150 (in Russian). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.6.145>
19. Raspolli Galletti A. M., D'Alessio A., Licursi D., Antonetti C., Valentini G., Galia A., Di Nasso N. N. Midinfrared FT-IR as a tool for monitoring herbaceous biomass composition and its conversion to furfural. *Journal of Spectroscopy*, 2015, vol. 2015, art. 719042. <https://doi.org/10.1155/2015/719042>
20. Kostyukov S. G., Matyakubov Kh. B., Masterova Yu. Yu., Kozlov A. Sh., Pryanishnikova M.K., Pynenkov A. A., Khlyuchina N. A. Determination of lignin, cellulose and hemicelluloses in plant materials using FTIR spectroscopy. *Zhurnal analiticheskoi khimii = Journal of Analytical Chemistry*, 2023, vol. 78, no. 6, pp. 496–505 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S0044450223040102>
21. Aleshina L. A., Melekh N. V., Fofanov A. D. Study of the structure of celluloses and lignins of various origins. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya = Chemistry of Plant Raw Material*, 2005, no. 3, pp. 31–59 (in Russian).
22. Novozhilov E. V., Sinel'nikov I. G., Aksenov A. S., Chukhchin D. G., Tyshkova I. V., Rozhkova A. M., Osipov D. O., Zorov I. N., Sinitsyn A. P. Biocatalytic conversion of sulfate pulp using the cellulase complex of *Penicillium verrucosum*. *Kataliz v promyshlennosti = Catalysis in Industry*, 2016, vol. 15, no. 5, pp. 78–83 (in Russian).
23. Glyad V. M., Ponomarev D. A., Politova N. K. Characteristics of residual lignin in sulfate pulp. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya = Chemistry of Plant Raw Material*, 2010, no. 4, pp. 51–56 (in Russian).
24. Khoang Min' Khoa. *Comparative characteristics of paper-forming properties of pulp from bamboo Bambusa Blumeana and hardwood of Vietnam* [dissertation]. Arkhangelsk, 2023. 176 p. (in Russian).
25. Tyshkova I. V. *Biocatalytic conversion of sulfate pulp using the carbohydrase complex of Penicillium verrucosum* [dissertation]. Arkhangelsk, 2018. 160 p. (in Russian).

Информация об авторах

Казакow Яков Владимирович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры. Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова (наб. Северной Двины, д. 17, 163002, Архангельск, Россия). E-mail: j.kazakov@narfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8505-5841>

Чухчин Дмитрий Германович – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры. Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова (наб. Северной Двины, д. 17, 163002, Архангельск, Россия). <https://orcid.org/0000-0003-3250-8469>

Ямова Мария Михайловна – аспирант. Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова (наб. Северной Двины, д. 17, 163002, Архангельск, Россия). E-mail: m.lisachenkova@narfu.ru, <https://orcid.org/0009-0003-1155-0032>

Флейшер Вячеслав Леонидович – доктор технических наук, доцент, проректор. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, Минск, Республика Беларусь). E-mail: v_fleisher@belstu.by, <https://orcid.org/0000-0003-2997-7707>

Information about the authors

Kazakov Yakov V. – Dr. Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Department. Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov (17, Severnaya Dvina Embankment, 163002, Arkhangelsk, Russia). E-mail: j.kazakov@narfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8505-5841>

Chukhchin Dmitry G. – Ph. D., Associate Professor, Professor of the Department. Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov (17, Severnaya Dvina Embankment, 163002, Arkhangelsk, Russia). <https://orcid.org/0000-0003-3250-8469>

Yamova Maria M. – Postgraduate Student. Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov (17, Severnaya Dvina Embankment, 163002, Arkhangelsk, Russia). E-mail: m.lisachenkova@narfu.ru, <https://orcid.org/0009-0003-1155-0032>

Fleisher Viachaslau L. – Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor, Vice-Rector for Research. Belarusian State Technological University (13A, Sverdlov Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: v_fleisher@belstu.by; <https://orcid.org/0000-0003-2997-7707>