

Научная статья

УДК 543.42

<http://doi.org/10.17072/2223-1838-2024-4-142-152>

О возможности количественного определения основных компонентов растительной биомассы методом ИК-Фурье спектроскопии

Сергей Геннадьевич Кострюков, Андрей Юрьевич Асфандеев

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарёва, Саранск, Россия

Аннотация. Предложена методика определения содержания лигнина, целлюлозы и гемицеллюлозы в растительных материалах с использованием ИК-Фурье спектроскопии в среднем спектральном диапазоне в таблетках с KBr. Методика основана на использовании градуировочных функций, учитывающих зависимость интенсивности аналитических полос поглощения от содержания соответствующих компонентов растительной биомассы: лигнина (1512 см^{-1}), целлюлозы (1165 см^{-1}) и гемицеллюлозы (1705 см^{-1}). Градуировочные функции построены с использованием модельных спектров, полученных путем сложения ИК спектров лигнина, целлюлозы и гемицеллюлозы с различными весовыми коэффициентами. Методика была протестирована на нескольких образцах лигноцеллюлозной биомассы. Пригодность предложенного метода для определения лигнина и гемицеллюлозы была подтверждена сравнением полученных результатов с литературными данными. Для определения целлюлозы метод дал завышенные результаты. Показано, что более точное содержание целлюлозы можно получить путём вычитания из 100% суммарного содержания лигнина и гемицеллюлозы.

Ключевые слова: ИК-Фурье спектроскопия, таблетка с KBr, полоса поглощения, растительная биомасса, лигнин, целлюлоза, гемицеллюлоза, градуировочная функция.

Для цитирования: Кострюков С.Г., Асфандеев А.Ю. О возможности количественного определения основных компонентов растительной биомассы методом ИК-Фурье спектроскопии // Вестник Пермского университета. Серия «Химия». 2024. Т. 14, № 4. С. 142–152. <http://doi.org/10.17072/2223-1838-2024-4-142-152>.

Original Article

<http://doi.org/10.17072/2223-1838-2024-4-142-152>

On the possibility of quantitative determination of the main components of plant biomass by the method of FTIR spectroscopy

Sergey G. Kostryukov, Andrey Yu. Asfandeev

National Research Mordovian State University, Saransk, Russia

Abstract. A technique for determining the content of lignin, cellulose, and hemicellulose in plant materials using mid-range FTIR spectroscopy in KBr tablets is proposed. The technique is based on the use of calibration functions that take into account the dependence of the intensity of the analytical absorption bands on the content of the corresponding components of plant biomass: lignin (1512 cm^{-1}), cellulose (1165 cm^{-1}), and hemicellulose (1705 cm^{-1}). The calibration functions are constructed using model spectra obtained by adding the IR spectra of lignin, cellulose, and hemicellulose with different weighting factors. The technique was tested on several samples of lignocellulosic biomass. The suitability of the proposed method for determining lignin and hemicellulose was confirmed by comparing the results with literature data. The method gave overestimated results for determining cellulose. It has been shown that a more accurate cellulose content can be obtained by subtracting the total lignin and hemicellulose content from 100%.

Keywords: FTIR spectroscopy, KBr tablet, absorption band, plant biomass, lignin, cellulose, hemicellulose, calibration function.

For citation: Kostryukov, S.G., and Asfandeev, A.Yu. (2024) “On the possibility of quantitative determination of the main components of plant biomass by the method of FTIR spectroscopy”, *Bulletin of Perm University. Chemistry*, vol. 14, no. 4, pp. 142–152. (In Russ.). <http://doi.org/10.17072/2223-1838-2024-4-142-152>.

ИК-Фурье спектроскопия является эффективным и доступным аналитическим методом для изучения различных объектов благодаря простоте пробоподготовки, экспрессности и небольшого количества материала [1]. В настоящее время этот метод активно применяется для исследования структуры и природы растительных материалов, включая определение их качественного и количественного состава, а также выявление функциональных групп и других специфических структурных особенностей [2–4]. Лигноцеллюлозная биомасса, являясь важным возобновляемым углеродосодержащим ресурсом, требует знания компонентного состава для оптимизации методов её переработки [5–7]. Информация о компонентном составе растительных материалов позволит разработать более эффективные технологии её переработки.

Следует подчеркнуть, что использование ИК спектроскопии для анализа древесины начало развиваться еще во второй половине XX века [8] и продолжается по сей день. Среди исследований выполненных в России можно отметить исследования группы Деркачевой О.Ю., в рамках которых были разработаны методы определения содержания лигнина в бумаге [9], сульфатной целлюлозе [10], а также проведена оценка степени конденсации и осаждения лигнина, происходящих во время варки сульфатной целлюлозы [11]. За рубежом интерес к этой теме еще более высок [12, 13], что объясняется, прежде всего, простотой подготовки проб и доступностью необходимого оборудования. Используя стандартную ИК спектроскопию в средней области, можно оперативно получать как качественные, так и количественные данные [14]. Кроме того, множество исследований

растительных материалов проводятся с использованием ИК спектроскопии в ближней области, что дополнительно подтверждает широкие возможности этого метода [15, 16]. Активно в аналитическую практику в настоящее время внедряется также метод нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) [17,18].

Таким образом, ИК спектроскопия остается незаменимым инструментом в аналитической химии для изучения растительных объектов, что открывает новые перспективы для их переработки и применения.

Целью нашего исследования стало разработка и апробация упрощенной методики для одновременного определения содержания целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина в растительной биомассе с использованием ИК-Фурье спектроскопии. Содержания лигнина, целлюлозы и гемицеллюлозы, полученные при помощи данного метода, сопоставлялись с уже известными данными [6,7]. Такой сравнительный анализ позволяет оценить точность и достоверность разработанной методики, а также выявить ее преимущества и ограничения в контексте существующих методов. Важно подчеркнуть, что полученные результаты могут служить основой для оптимизации процессов переработки растительной биомассы и разработки новых технологий в области сельского хозяйства и материаловедения.

Объекты и методы исследования

Ранее мы описали методику определения лигнина, гемицеллюлозы и целлюлозы, основанную на использовании градуировочных графиков, которые показывают зависимость интенсивности аналитических полос поглощения от содержания компонентов [19]. Градуи-

ровочные графики были построены на основе искусственно приготовленных тройных смесей (лигнин-целлюлоза-гемицеллюлоза) с различным соотношением составляющих. В настоящем исследовании калибровочные графики были построены путем программного сложения ИК спектров эталонных образцов целлюлозы, лигнина и гемицеллюлозы с применением соответствующих весовых коэффициентов. Этот метод значительно упростил процесс создания калибровочных графиков и позволил минимизировать вероятность случайных ошибок при измерениях.

Стандартные соединения. Для получения градуировочных зависимостей были использованы микрокристаллическая целлюлоза (Sigma-Aldrich, 435236), краф-лигнин (Sigma-Aldrich, 471003) и ксилан (получен из березовой древесной муки), согласно [20]. Данные вещества перед регистрацией ИК спектров были высушены при 105°C в течение 5 ч.

Растительные материалы. В качестве объектов исследования были использованы несколько образцов древесины, различные сельскохозяйственные отходы и травянистые остатки, всего 13 образцов. Сельскохозяйственные отходы, в частности, ячменная солома (сорт Казанский 6/4), пшеничная солома (сорт Саратовская 36), овсяная солома (сорт Победа), стебли и початки кукурузы (сорт Стерлинг), стебли и скорлупа семян подсолнечника (сорт Енисей) были предоставлена местными сельскохозяйственными производителями. Образцы рогоза (*Typha latifolia* L.), золотарника канадского (*Solidago canadensis*) и донника белого (*Melilotus albus*) взяты в пойме р. Инсар в июле. Образец ревеня волнистого (*Rheum rhabarbarum* L.), стеблей топинамбура (*Helianthus tuberosus*)

и створок фасоли (сорт Красная шапочка) взяты с дачного участка. Все образцы растительной биомассы вначале высушивали при комнатной температуре в течение недели, затем при температуре 105°C в течение 5 часов в термовентилируемой печи, после чего измельчали до фракции 50 мкм на ультрацентрической мельнице Retsch ZM 200.

ИК-Фурье спектроскопия. Для анализа растительных материалов мы применяли метод просвечивания таблеток, изготовленных из монокристаллического KBr, так как это позволяет удобно контролировать содержание исследуемого образца в таблетке. Все таблетки для анализа были подготовлены с учетом одинаковой массы анализируемого материала и KBr, а также одинаковой толщины и дисперсности. Соблюдение этих условий обеспечивает получение воспроизводимых результатов, характеризующихся стабильной интенсивностью полос поглощения при использовании серии одинаковых образцов. ИК спектры лигнина, целлюлозы, гемицеллюлозы и растительных материалов были получены при комнатной температуре, поддерживая одинаковую концентрацию (0,5 мас. %) и толщину таблеток (0,55 мм), чтобы оставаться в линейном диапазоне закона Бугера – Ламберта – Бера. Для получения твердой смеси KBr и анализируемого образца (0,5 мас. %) сначала проводили механическое измельчение в агатовой ступке, а затем более тщательное измельчение в контейнере из карбида вольфрама полуавтоматической вибрационной мельницы (Herzog HP-M 100) в течение 40 с. Для изготовления таблеток брали навеску 200 мг полученного порошка. Таблетки прессовали на установке «Lab Tools» при давлении до 15 МПа и затем для полученных таблеток реги-

стрировали ИК спектры. Для каждого образца изготавливали по три таблетки, для которых регистрировали спектры, затем полученные спектры усредняли. Усредненные спектры использовались для аналитического определения содержания целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина. Такой подход обеспечивает хорошую воспроизводимость измерений и надежность полученных данных, что критично для дальнейшего анализа и сравнения с литературными значениями.

ИК-Фурье спектры были получены на ИК-Фурье-спектрометре «Инфра ЛЮМ ФТ-08» в диапазоне $400\text{--}4000\text{ см}^{-1}$ с разрешением 4 см^{-1} .

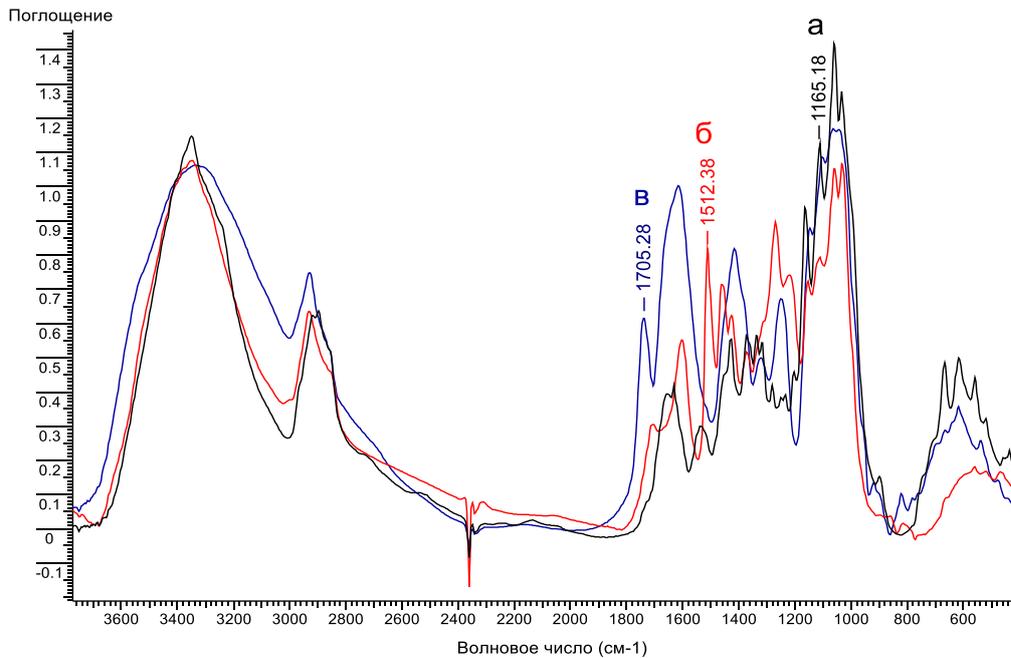


Рис. 1. ИК спектры целлюлозы (а), лигнина (б) и гемицеллюлозы (в)

Для достижения наших целей при анализе спектров каждого из компонент можно отметить различия в интенсивностях и позициях некоторых полос поглощения. В частности, для идентификации гемицеллюлозы была выбрана полоса поглощения на 1705 см^{-1} , соответствующая валентным колебаниям группы $\text{C}=\text{O}$ в ацетильных фрагментах ацетилксилосы. Для анализа лигнина использовалась полоса погло-

щения на 1512 см^{-1} , связанная со скелетными колебаниями ароматического кольца. Для определения целлюлозы была выбрана полоса поглощения на 1165 см^{-1} , которая относится к асимметричным валентным колебаниям связи $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ между глюкопиранозными звеньями. Выбор этих полос поглощения 1705 см^{-1} и 1512 см^{-1} является обоснованным, так как они специфичны для гемицеллюлозы и лигнина. Поло-

Результаты и их обсуждения

ИК-Фурье спектры целлюлозы, лигнина и гемицеллюлозы представлены на рисунке 1. Подробное описание основных полос поглощения целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина имеется в книге [21].

са поглощения 1165 см^{-1} , относящая к целлюлозе частично перекрывается с аналогичной полосой поглощения гемицеллюлозы, что может сказаться на точности результатов.

ИК спектры лигнина, целлюлозы и гемицеллюлозы, использованные для построения модельных спектров, были получены следующим образом. Как было сказано ранее, для каждого образца регистрировались три ИК спектра, из которых операцией «Вычесть» был удален спектр «пустой» таблетки КВг массой 200 мг (Вычисление – Операции Спектр-Спектр – Операция «вычесть»). Затем, в полученных ИК спектрах, была выполнена коррекция базовой линии по двум точкам (850 см^{-1} и 2000 см^{-1}) (Вычисление – Базовая линия – Ручная коррекция), после чего ИК спектры усреднялись (Вычисления – Усреднение спектров). Полученные

таким образом усредненные спектры использовались для построения модельных спектров тройных смесей. Модельные спектры тройных смесей были построены с помощью программы «СпектраЛюм», используя команду «Смесь», представляющую собой операцию сложения нескольких спектров с весовыми коэффициентами (Вычисление – Смесь). Состав модельных тройных смесей и полученные уравнения градуировочных зависимостей приведены в таблице 1.

Таким образом, градуировочные зависимости для определения лигнина, целлюлозы и гемицеллюлозы в тройных смесях представляют линейные функции (уравнения 1-3) с коэффициентами корреляции близкими к единице: для уравнения 1 – 0,994, для уравнения 2 – 0,979, и для уравнения 3 – 0,984.

Таблица 1.

Составы модельных тройных смесей стандартных веществ (мас. %) и уравнения градуировочных зависимостей

Определение целлюлозы в тройных смесях													
Целлюлоза	100	20	60	20	40	33.3	20	40	20	10	0	$y = 0,028542x$ (2), $R = 0,994$	
Лигнин	0	10	20	30	30	33.3	50	60	70	80	100		
Гемицеллюлоза	0	70	20	50	30	33.3	30	20	10	10	0		
Определение лигнина в тройных смесях													
Целлюлоза	0	10	20	30	30	33.3	40	50	60	70	80	100	$y = 0,032662x$ (1), $R = 0,979$
Лигнин	50	40	40	30	60	33.3	30	20	20	10	10	0	
Гемицеллюлоза	50	60	40	60	30	33.3	30	30	20	20	10	0	
Определение гемицеллюлозы в тройных смесях													
Целлюлоза	100	50	60	40	30	33.3	40	30	20	10	0	$y = 0,04559x$ (3), $R = 0,984$	
Лигнин	0	40	20	30	40	33.3	20	20	10	10	0		
Гемицеллюлоза	0	10	20	30	30	33.3	40	50	70	80	100		

Далее полученные градуировки были использованы для количественного анализа лигнина, целлюлозы и гемицеллюлозы в растительных материалах. Для каждого образца растительного материала регистрировались три спектра, из которых операцией «Вычесть» был удален спектр «пустой» таблетки КВг, затем была выполнена коррекция базовой линии по двум точкам (850 см^{-1} и 2000 см^{-1}), после чего

спектры усреднялись (Вычисления – Усреднение спектров) и по усредненному спектру определяли высоту соответствующих пиков и относительное стандартное отклонение. Перечень образцов лигноцеллюлозной биомассы и вычисленное по уравнениям 1–3 содержание лигнина, целлюлозы и гемицеллюлозы приведены в таблице 2.

Как видно из таблицы 2, полученные на основании ИК спектров результаты измерений содержания лигнина и гемицеллюлозы в целом соответствуют литературным значениям [6,7], однако содержание целлюлозы, полученное по нашей методике, в некоторых случаях превышает литературные данные. Данная ошибка, по-видимому, вызвана тем, что полосу поглощения 1165 см^{-1} дает как целлюлоза, так и гемицеллюлоза. Однако для определения со-

держания в растительных материалах лигнина и гемицеллюлозы наша методика является достаточно надежной. Точнее оценить содержание целлюлозы можно путём вычитания из 100% суммарного содержания лигнина и гемицеллюлозы, так как растительные материалы состоят в основном из этих трёх компонентов. Полученные таким образом данные представлены в таблице 3.

Таблица 2.

Перечень образцов лигноцеллюлозной биомассы и найденное содержание лигнина, целлюлозы и гемицеллюлозы

№	Образец	Содержание, мас. %								
		лигнина			целлюлоза			гемицеллюлоза		
		ИК	s_r	Лит.	ИК	s_r	Лит.	ИК	s_r	Лит.
1	Древесина сосны [6]	19,03 $\pm 0,82$	0,04	20,0	66,95 \pm 1,35	0,04	42,0– 50,0	38,41 \pm 1,09	0,04	24,0– 27,0
2	Древесина березы [7]	22,71 $\pm 0,87$	0,04	23,0	54,08 \pm 1,01	0,04	34,0	38,95 \pm 0,98	0,04	40,0
3	Древесина дуба [6]	32,43 $\pm 0,72$	0,03	35,4	64,21 \pm 1,15	0,03	43,2	22,66 \pm 0,85	0,03	21,9
4	Кора дуба	17 $\pm 0,57$	0,03	-	23 $\pm 0,6$ 8	0,03	-	17 \pm 0,62	0,03	-
5	Ячменная солома [6]	10,15 $\pm 0,62$	0,04	6,3– 13,1	61,09 \pm 1,21	0,04	36,0– 43,0	50,09 \pm 1,32	0,04	24,0– 33,0
6	Пшеничная солома [7]	13,15 \pm 0,71	0,03	12,0– 16,0	57,32 \pm 0,94	0,03	35,0– 39,0	54,58 \pm 1,29	0,03	23,0– 30,0
7	Овсяная солома [6]	14,61 \pm 0,75	0,04	10,0– 15,0	52,91 \pm 0,98	0,04	31,0– 35,0	57,71 \pm 1,41	0,04	20,0– 26,0
8	Стебли кукурузы [6]	12,03 \pm 0,62	0,03	7,0– 18,4	57,92 \pm 1,05	0,03	35,0– 39,6	54,02 \pm 1,25	0,03	16,8– 35,0
9	Сердцевины початков кукурузы [6]	7,69 \pm 0,51	0,04	6,1– 15,9	60,05 \pm 1,16	0,04	33,7– 41,2	46,09 \pm 1,13	0,04	31,9– 36,0
10	Стебли подсолнечника [6]	9,16 ± 0 ,59	0,03	7,72– 13,4	61,04 \pm 1,14	0,03	34,1– 42,1	48,73 \pm 1,09	0,03	5,18– 9,71
11	Скорлупа семян подсолнечника [6]	23,45 \pm 1,07	0,04	20– 25	68,04 \pm 1,19	0,04	45– 55	30,93 \pm 0,85	0,04	23– 28
12	Скорлупа фундука [6]	39,21 \pm 1,18	0,04	38	55,42 \pm 1,31	0,04	30	24,47 \pm 0,65	0,04	23
13	Створки фасоли	9,16 \pm 0,59	0,03	-	61,04 \pm 1,14	0,03	-	46,09 \pm 1,13	0,04	-
14	Солома рогоза [7]	9,12 \pm 0,66	0,04	8,7	70,01 \pm 1,58	0,04	49,4	39,76 \pm 0,83	0,04	31,5
15	Ревень волнистый	9,83 \pm 0,73	0,04	-	55,21 \pm 1,32	0,04	-	43,76 \pm 0,45	0,04	-
16	Стебли топинамбура	11,43 \pm 0,86	0,04	-	45,78 \pm 1,21	0,04	-	41,76 \pm 0,37	0,04	-
17	Золотарник канадский	19,51 \pm 0,86	0,04	-	51,01 \pm 1,58	0,04	-	47,34 \pm 0,97	0,04	-

Заключение

Таким образом, разработанная нами методика определения основных компонентов лигноцеллюлозных материалов с помощью ИК-Фурье спектроскопии с использованием стандартного метода взвесей в таблетках КВг является достаточно надежной для определения лигнина и гемицеллюлозы при условии выполнения условий одинаковой массы анализируе-

мого образца, КВг, толщины и дисперсности, что подтверждено её апробацией на широком наборе образцов растительных материалов. Для определения целлюлозы предлагается использовать косвенный метод основанный на вычитании из 100% суммарного содержания лигнина и целлюлозы при условии, что образец растительной био-массы не содержит значительных количеств экстрактивных веществ.

Таблица 3.

Перечень образцов лигноцеллюлозной биомассы и найденное содержание целлюлозы

№	Образец	Содержание целлюлозы	
		100% – Σ (лигнина и гемицеллюлозы)	Лит.
1	Древесина сосны [6]	42,56	42,0–50,0
2	Древесина березы [7]	38,34	34,0
3	Древесина дуба [6]	44,91	43,2
4	Ячменная солома [6]	39,76	36,0–43,0
5	Пшеничная солома [7]	32,27	35,0–39,0
6	Овсяная солома [6]	27,68	31,0–35,0
7	Стебли кукурузы [6]	33,95	35,0–39,6
8	Сердцевины початков кукурузы [6]	46,22	33,7–41,2
9	Стебли подсолнечника [6]	42,11	34,1–42,1
10	Скорлупа семян подсолнечника [6]	45,62	45–55
11	Солома рогоза [7]	51,12	49,4
12	Скорлупа фундука [6]	36,32	30

Список источников

1. Moore A.K., Owen N.L. Infrared spectroscopic studies of solid wood // *Applied Spectroscopy Reviews*. 2001. V. 36, № 1. P. 65–86.
2. Özgenç Ö., Durmaz S., Boyacı I., et al. ATR-FTIR spectroscopic analysis of thermally modified wood degraded by rot fungi // *Drewno*. 2018. V. 61, № 201. P. 91–105.
3. Derkacheva O., Sukhov D. Investigation of lignins by FTIR spectroscopy // *Macromolecular Symposia*. 2008. V. 265, № 1. P. 61–68.
4. Traoré M., Kaal J., Cortizas M.A. Application of FTIR spectroscopy to the characterization of archeological wood // *Spectrochimica Acta. Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2016. V. 153. P. 63–70.
5. Vallejo M., Cordeiro R., Dias P.A.N. et al. Recovery and evaluation of cellulose from agroindustrial residues of corn, grape, pomegranate, strawberry-tree fruit and fava // *Bioresources and Bioprocessing*. 2021. V. 8, № 1. P. 25.
6. Kumar B., Bhardwaj N., Agrawal K., et al. Current perspective on pretreatment technologies using lignocellulosic biomass: An emerging biorefinery concept // *Fuel Processing Technology*. 2020. V. 199. P. 106244.

7. Nanda S., Mohammad J., Reddy S.N. et al. Pathways of lignocellulosic biomass conversion to renewable fuels // Biomass Conversion and Biorefinery. 2013. № 4. P. 157–191.
8. Карклинь В.Б., Трейманис А.П., Громов В.С. ИК-спектроскопия древесины и ее основных компонентов. VI. Определение содержания лигнина в препаратах сульфатной целлюлозы по ИК-спектрам // Химия древесины. 1975. № 2. С. 45–52.
9. Derkacheva O.Y., Tsytkin D.O. Lignin Content in Paper Fibers Assessed Using IR Reflectance Spectroscopy // Journal of Applied Spectroscopy. 2018. V. 84. P. 1066–1071.
10. Afanas'ev N.I., Lichutina T.F., Gusakova M.A. et al. Estimation of the content and assessment of structural transformations of residual lignin and resin in deciduous kraft pulp by Fourier IR spectroscopy // Russian Journal of Applied Chemistry. 2006. V. 79. P. 1686–1689.
11. Деркачева О.Ю., Сухов Д.А., Федоров А.В. Оценка состояния лигнина в сульфатных волокнах по данным ИК спектроскопии // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Химия. 2017. № 1. С. 64–71.
12. Xu F., Yu J., Tesso T., Dowell F., et al. Qualitative and quantitative analysis of lignocellulosic biomass using infrared techniques: a mini-review // Applied Energy. 2013. V. 104. P. 801–809.
13. Vârban R., Crişan I., Vârban D. et al. Comparative FT-IR prospecting for cellulose in stems of some fiber plants: Flax, velvet leaf, hemp and jute // Applied Scientific Research. 2021. V. 11, № 18. P. 8570.
14. Kostryukov S.G., Malov N.A., Masterova Yu.Yu. et al. On the Possibility of Quantitative Determination of Lignin and Cellulose in Plant Materials Using IR Spectroscopy // Russian Journal of Bioorganic Chemistry. 2023. V. 49, № 7. P. 1628–1635.
15. Zhang K., Yuan W., Pei Z. et al. Development of near-infrared spectroscopy models for quantitative determination of cellulose and hemicellulose contents of big bluestem // Renewable Energy. 2017. V. 109. P. 101–109.
16. Huang J., Yu C. Determination of cellulose, hemicellulose and lignin content using near-infrared spectroscopy in flax fiber // Textile Research Journal. 2019. V. 89. № 23–24. P. 4875–4883.
17. Wittner N., Slezsák J., Broos W. et al. Rapid lignin quantification for fungal wood pretreatment by ATR-FTIR spectroscopy // Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. 2023. V. 285. P. 121912.
18. Özgenç Ö., Durmaz S., Boyacı I.H., et al. Determination of chemical changes in heat-treated wood using ATR-FTIR and FT Raman spectrometry // Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Bio-molecular Spectroscopy. 2017. V. 171. P. 395–400.
19. Kostryukov S.G., Matyakubov H.B., Masterova Yu.Yu. et al. Determination of Lignin, Cellulose, and Hemicellulose in Plant Materials by FTIR Spectroscopy // Journal of Analytical Chemistry. 2023. V. 78, № 6. P. 718–727.
20. da Silva Braga R., Poletto M. Preparation and Characterization of Hemicellulose Films from Sugar-cane Bagasse // Materials. 2020. V. 13. P. 941.
21. Базарнова Н.Г., Карпова Е.В., Катраков И.Б., и др. Методы исследования древесины и ее производных. Барнаул: Изд. Алт. гос. ун-та., 2002. 160 с.

Информация об авторах

Сергей Геннадьевич Кострюков, кандидат химических наук, доцент, кафедра аналитической химии и экспертизы, Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарёва (430005, г. Саранск, ул. Большевистская, 68), kostryukov_sg@mail.ru.

Андрей Юрьевич Асфандеев, аспирант, Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарёва (430005, г. Саранск, ул. Большевистская, 68), fyjybv.asdfggh@yandex.ru

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Поступила 16 декабря 2024 г.; принята к публикации 20 декабря 2024 г.

References

1. Moore, A.K. and Owen, N.L. (2001) "Infrared spectroscopic studies of solid wood", *Applied Spectroscopy Reviews*, vol. 36, no 1, pp. 65–86.
2. Özgenç, Ö., Durmaz, S., Boyacı, I. and Ekşi, H. (2018) "ATR-FTIR spectroscopic analysis of thermally modified wood degraded by rot fungi", *Drewno*, vol. 61, no. 201, pp. 91–105.
3. Derkacheva, O. and Sukhov, D. (2008) "Investigation of lignins by FTIR spectroscopy", *Macromolecular Symposia*, vol. 265, no 1, pp. 61–68.
4. Traoré, M., Kaal, J. and Cortizas, M.A. (2016) "Application of FTIR spectroscopy to the characterization of archeological wood", *Spectrochimica Acta. Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, vol 153, pp. 63–70.
5. Vallejo, M., Cordeiro, R., Dias, P.A.N., Moura, C., Henriques, M., Seabra, I.J., Malça, C.M. and Morouço, P. (2021) "Recovery and evaluation of cellulose from agroindustrial residues of corn, grape, pomegranate, strawberry-tree fruit and fava", *Bioresources and Bioprocessing*, vol. 8, no 1, ID 25.
6. Kumar, B., Bhardwaj, N., Agrawal, K., Chaturvedi, V. and Verma, P. (2020) "Current perspective on pretreatment technologies using lignocellulosic biomass: An emerging biorefinery concept", *Fuel Processing Technology*, vol. 199, ID 106244.
7. Nanda, S., Mohammad, J., Reddy, S.N., Kozinski, J.A. and Dalai, A.K. (2013) "Pathways of lignocellulosic biomass conversion to renewable fuels", *Biomass Conversion and Biorefinery*, no 4, pp. 157–191.
8. Karklin', V.B., Trejmanis, A.P. and Gromov, V.S. (1975) ИК-спектроскопија древесине и ње основних компонента. VI. Опредељење садржанија лигнина у препаратима сулфатног целулозо по ИК-спектру [IR spectroscopy of wood and its main components. VI. Determination of lignin content in sulfate cellulose preparations by IR spectra], *Himiya drvesiny*, no 2, pp. 45–52 (in Russian).
9. Derkacheva, O.Y. and Tsyarkin, D.O. (2018) "Lignin Content in Paper Fibers Assessed Using IR Reflectance Spectroscopy", *Journal of Applied Spectroscopy*, vol. 84, pp. 1066–1071.
10. Afanas'ev, N.I., Lichutina, T.F., Gusakova, M.A., Prokshin, G.F., Vishnyakova, A.P., Sukhov, D.A. and Derkacheva, O.Yu. (2006) "Estimation of the content and assessment of structural transformations of

residual lignin and resin in deciduous kraft pulp by Fourier IR spectroscopy”, *Russian Journal of Applied Chemistry*, vol. 79, pp. 1686–1689.

11. Derkacheva, O.Yu., Suhov, D.A. and Fedorov, A.V. (2017) Ocenka sostoyaniya lignina v sul'fatnyh voloknah po dannym IK spektroskopii [Assessment of the state of lignin in sulfate fibers based on IR spectroscopy data], *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Himiya*, no 1, pp. 64–71 (in Russian).

12. Xu, F., Yu, J., Tesso, T., Dowell, F. and Wang, D. (2013) “Qualitative and quantitative analysis of lignocellulosic biomass using infrared techniques: a mini-review”, *Applied Energy*, vol. 104, pp. 801–809.

13. Vârban, R., Crişan, I., Vârban, D., Ona, A., Olar, L., Stoie, A. and Ştefan, R. (2021) “Comparative FT-IR prospecting for cellulose in stems of some fiber plants: Flax, velvet leaf, hemp and jute”, *Applied Scientific Research*, vol. 11, no. 18, ID 8570.

14. Kostryukov, S.G., Malov, N.A., Masterova, Yu.Yu., Matyakubov, Kh.B., Konushkin, I.A., Savrasov, K.V., Pynenkov, A.A. and Khluchina, N.A. (2023) “On the Possibility of Quantitative Determination of Lignin and Cellulose in Plant Materials Using IR Spectroscopy”, *Russian Journal of Bioorganic Chemistry*, vol. 49, no 7, pp. 1628–1635.

15. Zhang K., Yuan W., Pei Z. and Wang D. (2017) “Development of near-infrared spectroscopy models for quantitative determination of cellulose and hemicellulose contents of big bluestem”, *Renewable Energy*, vol. 109, pp. 101–109.

16. Huang, J. and Yu, C. (2019) “Determination of cellulose, hemicellulose and lignin content using near-infrared spectroscopy in flax fiber”, *Textile Research Journal*, vol. 89, no. 23–24, pp. 4875–4883.

17. Wittner, N., Slezsák, J., Broos, W., Geerts, J., Gergely, S., Vlaeminck, S.E. and Cornet, I. (2023) “Rapid lignin quantification for fungal wood pretreatment by ATR-FTIR spectroscopy”, *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, vol. 285, ID 121912.

18. Özgenç, Ö., Durmaz, S., Boyaci, I.H. and Eksi-Kocak, H. (2017) “Determination of chemical changes in heat-treated wood using ATR-FTIR and FT Raman spectrometry”, *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, vol. 171, pp. 395–400.

19. Kostryukov, S.G., Matyakubov, H.B., Masterova, Yu.Yu., Kozlov, A.Sh., Pryanichnikova, M.K., Pynenkov, A.A. and Khluchina, N.A. (2023) “Determination of Lignin, Cellulose, and Hemicellulose in Plant Materials by FTIR Spectroscopy”, *Journal of Analytical Chemistry*, vol. 78, no 6, pp. 718–727.

20. da Silva Braga, R. and Poletto, M. (2020) “Preparation and Characterization of Hemicellulose Films from Sugarcane Bagasse”, *Materials*, vol. 13, ID 941.

21. Bazarnova, N.G., Karpova, E.V., Katrakov, I.B., Markin, V.I., Mikushina, I.V., Ol'hov, Yu.A., Gen'sh K.V. and Kolosov P.V. (2002) *Metody issledovaniya drevesiny i ee proizvodnyh* [Research methods for wood and its derivatives], Barnaul. (in Russian).

Information about the authors

Sergey G. Kostryukov, Candidate of Chemistry Sciences, Associate professor, National Research Mordovian State University (68, Bolshevistskaya st., Saransk, Russia, 430005), kostryukov_sg@mail.ru.

Andrey Yu. Asfandeev, Postgraduate student, National Research Mordovian State University (68, Bolshevistskaya St., Saransk, Russia, 430005), asdfggh@yandex.ru.

Conflicts of interests

The authors declare no conflicts of interests.

Submitted 16 December 2024; accepted 20 December 2024