

Научная статья

УДК 543.4:54-4

DOI: 10.17586/2310-1164-2024-17-1-25-34

Метод Фурье ИК-спектроскопии в исследовании аномерной чистоты α - и β -форм кристаллической $D(+)$ -глюкопиранозы

А.П. Нечипоренко^{1*}, Л.В. Плотникова², О.С. Везо², В.Е. Ситникова¹¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

*allanech2512@yandex.ru

Аннотация. Методом Фурье ИК-спектроскопии проведено исследование серии образцов α - и β -форм кристаллической $D(+)$ -глюкопиранозы с целью оценки возможности выявления примеси сопутствующего аномера. Показано, что в отличие от α - $D(+)$ -глюкопиранозы, для спектра которой характерен интенсивный максимум 1009 см^{-1} , в спектре β - $D(+)$ -глюкопиранозы в этой области присутствует сложная полоса с максимумом 993 см^{-1} и дифференцированным дублетом $1020/1013\text{ см}^{-1}$. Важным признаком принадлежности структуры глюкопиранозы к β -форме является наличие полосы 838 см^{-1} , а для α - $D(+)$ -глюкопиранозы – полосы 851 см^{-1} . Отмечено, что широкие структурированные полосы в области $(1500...1400)\text{ см}^{-1}$ наглядно передают изменения в оптических характеристиках ОН-групп в результате инверсии пиранозного цикла – пологий наклон правой структурированной ветви полосы с максимумом 1459 см^{-1} у β -формы и крутой подъем левой структурированной ветви полосы с максимумом 1424 см^{-1} . Полученные данные показали эффективность метода Фурье ИК-спектроскопии при анализе аномерной чистоты кристаллической $D(+)$ -глюкопиранозы, широко используемой в медицинской и фармакологической практике, косметологии, пищевой промышленности.

Ключевые слова: моносахариды; Фурье ИК-спектроскопия; аномеры глюкопиранозы

Original article

Fournier method of IR-spectroscopy in the study of the anomeric purity of α - and β -forms of crystalline $D(+)$ -glucopyranoses

Alla P. Nechiporenko^{1*}, Ludmila V. Plotnikova², Olga S. Vezo², Vera E. Sitnikova¹¹ITMO University, Russia, St. Petersburg²St. Petersburg State University, Russia, St. Petersburg

*allanech2512@yandex.ru

Abstract. A series of samples of α - and β -forms of crystalline $D(+)$ -glucopyranose was studied by Fourier IR spectroscopy to assess the possibility of detecting an admixture of a concomitant anomer. It is shown that, unlike α - $D(+)$ -glucopyranose, whose spectrum is characterized by an intense maximum of 1009 cm^{-1} , in the spectrum of β - $D(+)$ -glucopyranose in this region there is a complex band with a maximum of 993 cm^{-1} and a differentiated doublet of $1020/1012\text{ cm}^{-1}$. An important sign of the belonging of the structure of glucopyranose to the β -form is the presence of a band of 838 cm^{-1} , and for α - $D(+)$ -glucopyranose – the presence of a band of 851 cm^{-1} . It is noted that wide structured bands in the region of $(1500...1400)\text{ cm}^{-1}$ clearly convey changes in the optical characteristics of OH groups as a result of the inversion of the pyranose cycle – a gentle slope of the right structured branch of the band with a maximum of 1460 cm^{-1} in the β -form and a steep rise of the left structured branch of the band with a maximum of 1424 cm^{-1} . The obtained data showed the effectiveness of the Fourier method of IR spectroscopy in the analysis of the anomeric purity of crystalline $D(+)$ -glucopyranose widely used in medical and pharmacological practice, cosmetology, and the food industry.

Keywords: monosaccharides; Fourier IR spectroscopy; anomers of glucopyranose

Введение

Химикам потребовалось более ста лет для выяснения строения, стереохимии, конфигурации и конформации моносахаридов, открытия спонтанных явлений таутомерии и мутаротации. Но вопрос об особенностях их тонкой структуры, во многом определяющей свойства, функциональное назначение, механизм поведения и структурной трансформации в зависимости от состава и параметров среды, остается актуальным и по сей день, о чем свидетельствуют работы последних лет [1–6].

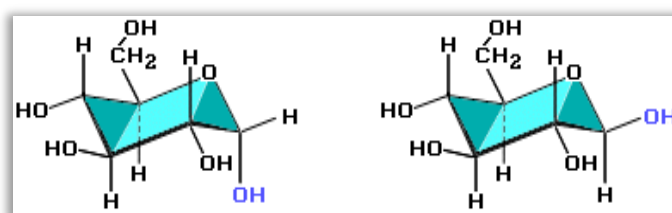
Сегодня изучение тонкостей конфигурационно-конформационной структуры моносахаридов и характеристик связей как структурных элементов циклов, так и функциональных группировок проводится с использованием спектроскопии ЯМР и масс-спектроскопии [7–9], КР-спектроскопии [10], Фурье ИК-спектроскопии [11–13]. В целом метод колебательной спектроскопии признан наиболее эффективными и широко используемым в практике научно-исследовательских лабораторий разной направленности [14–18]. Его существенным ограничением в приложении к углеводам является низкое разрешение полос в информативных областях спектров, что затрудняет возможность наблюдения тонких эффектов особенностей структуры. Однако, все же предпочтение отдается перспективным вариантам спектроскопии высокого разрешения – методу Фурье ИК-спектроскопии в сочетании с методом деконволюции спектров [19, 20], обусловленное высокой информативностью, экспрессностью, доступностью. А также возможностью разделения контуров полос в областях спектров, характеризующихся низкой разрешенностью сигналов – диапазон волновых чисел (1500...600) см⁻¹, объединяющий разные типы валентных и деформационных колебаний С-О-С, С-О, С-С, С-Н, С-ОН, позволяя в отдельных случаях получить весьма важные сведения об их строении, конфигурации и конформациях.

Целью данной работы явилось выявление возможностей метода Фурье ИК-спектроскопии при исследовании аномерной чистоты кристаллических образцов α - и β -форм глюкопиранозы разных производителей и года выпуска, широко используемых в медицинской и фармацевтической практике, косметологии, научно-исследовательских лабораториях различного профиля, разных сферах пищевых технологий, в химической, текстильной промышленности и др.

В медицине и фармакологии глюкоза используется в виде стерильных растворов для инъекций или инфузий при интоксикации, как компонент кровозаменяющих противошоковых жидкостей, для разведения многих препаратов при их внутривенном введении, а также в виде лечебно-профилактических растительных сиропов, порошков и таблеток. Основными показаниями к применению глюкозы являются: гипогликемия, инфекционные заболевания, гепатиты, дистрофии, обезвоживание, атрофии печени, нарушения сердечной деятельности, отеки легких и многое другое.

В пищевой промышленности глюкоза широко используется при выпечке хлеба, как заменитель сахара в изготовлении кондитерской продукции, консервов, соков, ликеров, вин, безалкогольных напитков и др. В качестве питательной среды – при выращивании дрожжевых культур для пищевой промышленности и различных видов микроорганизмов для микробиологии и медицины.

Известно [21], что пиранозный цикл обоих аномеров в кристаллическом состоянии имеет конформацию «кресло»



α -D(+)-глюкопираноза

β -D(+)-глюкопираноза

Основное отличие этих двух структур состоит в относительном положении гликозидного гидроксила при первом углеродном атоме (C₁) и группировки CH₂OH – аксиальное для α -формы и экваториальное для β -формы. Однако оно обуславливает не только изменение направления вращения плоскости поляризации света в растворах при переходе одной формы в другую, но и большинство физических – коэффициента преломления, объема, ИК-, ЯМР-, КР-спектров и т.д., многих химических и биохимических свойств [22, 23].

Следует отметить, что несмотря на значительное количество публикаций с использованием метода Фурье ИК-спектроскопии, имеют место разночтения в интерпретации природы полос поглощения и отсутствуют данные по сравнительному исследованию двух аномеров. Кроме того, сам характер спектров образцов кристаллической глюкозы, приводимый разными авторами, заметно отличается, что во многом обусловлено как разницей в категории используемых спектральных приборов, так и технологической предысторией исследуемых объектов.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования являлись шесть образцов кристаллической правовращающей $D(+)$ -глюкопиранозы разных производителей и года выпуска и один образец левовращающей $D(-)$ -глюкопиранозы:

№ 1 – $D(+)$ -глюкоза (АО «Химреактив», 1988 г.)

№ 2 – $D(+)$ -глюкоза (ООО «НеваРеактив», 2020 г., для медицины)

№ 3 – $D(+)$ -глюкоза (ООО «НеваРеактив», 2018 г.)

№ 4 – $D(+)$ -глюкоза (АО «Химреактив», 1978 г.)

№ 5 – $D(+)$ -глюкоза (АО «Химреактив», 1998 г.)

№ 6 – $D(+)$ -глюкоза (АО «Химреактив», 1997 г.)

№ 7 – $D(-)$ -глюкоза (г. Киев, 1989 г.)

Колебательные спектры (32 скана) кристаллических образцов моносахарида получали на Фурье-спектрометре Tensor 37 (Bruker, Германия) с алмазным НПВО элементом в диапазоне волновых чисел $4000\text{--}600\text{ см}^{-1}$. Полученные данные обрабатывались в программе Origin.

Результаты и их обсуждение

Спектры пяти первых кристаллических образцов $D(+)$ -глюкозы, представленных в диапазоне $(3700\text{--}680)\text{ см}^{-1}$ (рисунок 1), позволяют отметить, что как и спектры всех углеводов, они разбиваются на две области: $(3700\text{--}2800)$ и $(1500\text{--}680)\text{ см}^{-1}$. В высокочастотной области электромагнитного спектра проявляются валентные колебания гидроксильных групп $(3700\text{--}3020)\text{ см}^{-1}$, в том числе и молекул кристаллизационной воды. Серия полос в интервале $(2972\text{--}2882)\text{ см}^{-1}$ обусловлена валентными асимметричными и симметричными колебаниями CH_n -групп.

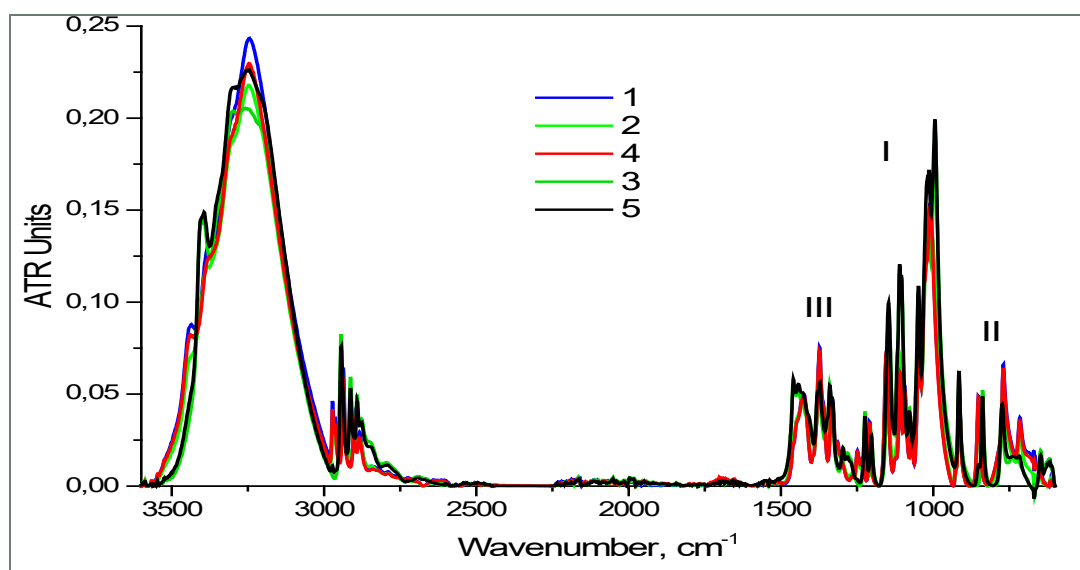


Рисунок 1 – ИК-спектры пяти кристаллических образцов $D(+)$ -глюкозы

Figure 1. IR spectra of five crystalline samples of $D(+)$ -glucose

Однако инфракрасный спектр основных структурных и функциональных группировок углеводов расположен в диапазоне $(1500\text{--}680)\text{ см}^{-1}$, условно представленном тремя помеченными областями, в которых преимущественно проявляются колебания C-O , C-O-C , C-C , C-OH , C-H , CH_2 -связей. Увеличенные фрагменты двух областей спектров, представленные на рисунке 2, говорят о том, что анализируемые образцы подразделяются на две группы: α - $D(+)$ -глюкопиранозы (№ 1–№ 3) и β - $D(+)$ -глюкопиранозы (№ 4 и № 5), заметно различающиеся по оптическим свойствам во всем рассматриваемом диапазоне электромагнитного спектра.

Из общих полос, присутствующих в спектрах всех образцов, выделяется одна – 915 см^{-1} , ответственная за колебания C-C -связей шестичленного кольца глюкопираноз обоого типа. Важным и определяющим является различие в положении максимумов глобальной полосы: 1009 см^{-1} для

α -D(+)-глюкопираноз и 993 см^{-1} для β -D(+)-глюкопираноз. В области высоких частот так же единственная полоса является общей – 3306 см^{-1} (рисунок 2б).

Следует отметить, что различия обнаружены между образцами и в пределах каждой группы. Из пяти образцов D(+)-глюкозы только первые два оказались «чистыми» формами (без примеси другой) α -D(+)-глюкопиранозы; образец № 3 в небольшом количестве содержал примесь β -D(+)-глюкопиранозы.

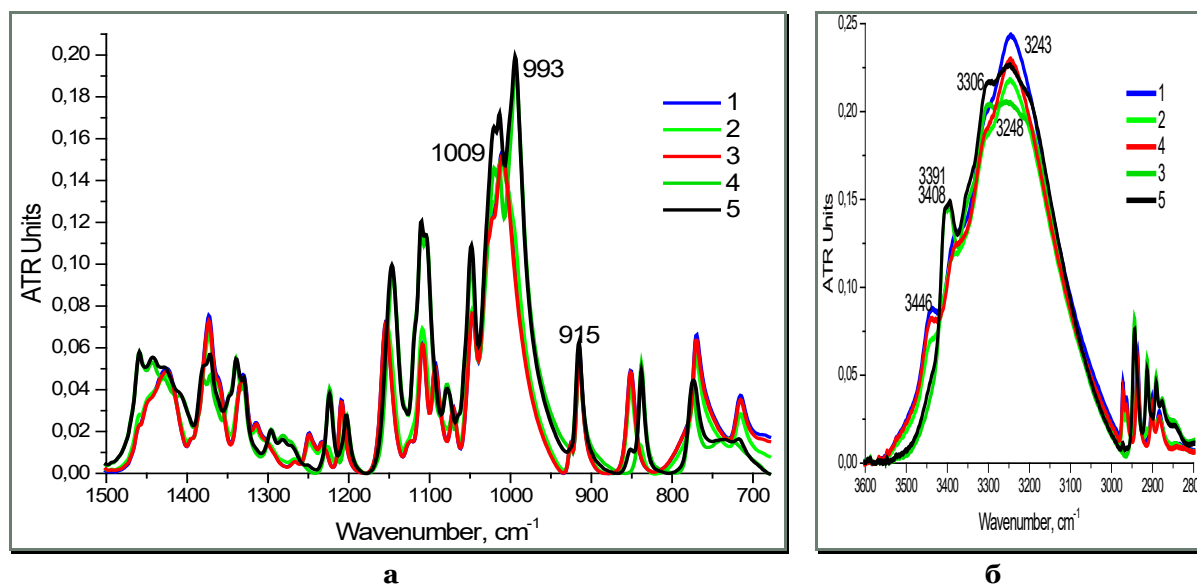


Рисунок 2 – Фрагменты ИК-спектров пяти кристаллических образцов D(+)-глюкозы: а) $1500\text{--}680$, б) $3600\text{--}2800\text{ см}^{-1}$
 Figure 2. Fragments of the IR spectra of five crystalline samples of D(+)-glucose: a) $1500\text{--}680$, b) $3600\text{--}2800\text{ см}^{-1}$

Образцы № 4 и № 5 представлены β -D(+)-глюкопиранозой, из которых № 4 являлся чистой формой, а № 5 содержал примесь α -D(+)-глюкопиранозы. Образцы № 6 и № 7 вынесены за пределы рассмотренных выше групп, поскольку в образце № 6 отмечено наличие атмосферной влаги (увлажненный), а в составе левовращающего образца № 7 (α -D(-)-глюкопираноза в значительном количестве присутствовала примесь β -D(+)-глюкопиранозы.

Рисунок 3 представляет ИК-спектры двух чистых образцов α -D(+)-глюкопиранозы, демонстрируя прекрасную сходимость по положению всех полос, отличаясь лишь по их интенсивности, несмотря на существенную разницу по времени производства.

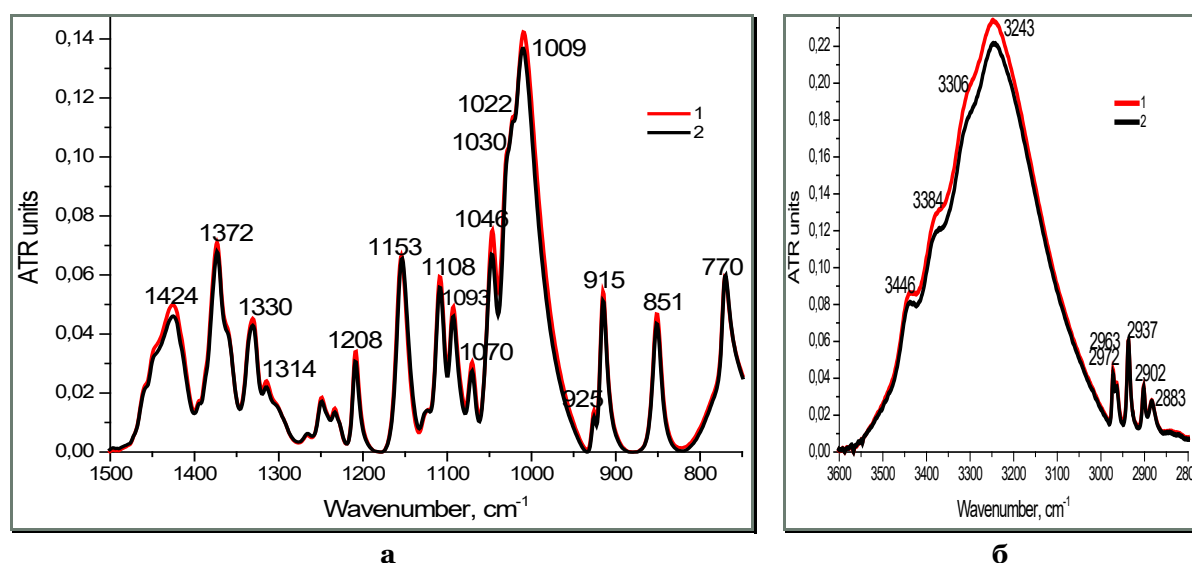


Рисунок 3. Фрагменты ИК-спектров двух образцов α -D(+)-глюкопиранозы:
 1 – № 1, 2 – № 2; а) $1500\text{--}750$, б) $3600\text{--}2800\text{ см}^{-1}$
 Figure 3. Fragments of the IR spectra of two samples of α -D(+)-glucopyranose:
 1 – no. 1, 2 – no. 2; а) $1500\text{--}750$, б) $3600\text{--}2800\text{ см}^{-1}$

К основным характеристическим полосам спектра α -D(+)-глюкопиранозы следует отнести – 1424; 1372; 1208; 1009; 915; 851; 770 cm^{-1} . В области поглощения валентных колебаний гидроксильных групп регистрируются полосы – 3243; 3306; 3384; 3446 cm^{-1} и 2972; 2963; 2937; 2907; 2883 cm^{-1} в области поглощения C-H -группировок (рисунок 3б).

Сопоставление спектров чистых образцов № 1 и № 4 – α -D(+)- и β -D(+)-глюкопиранозы (рисунок 4) позволило визуализировать очень яркие изменения взаимобратимых оптических свойств двух D(+)-глюкоз в результате инверсии пиранозного цикла во всем диапазоне волновых чисел и отметить полосы, наиболее характерные для β -формы. В отличие от α -D(+)-глюкопиранозы, для спектра которой характерен интенсивный максимум 1009 cm^{-1} , в спектре β -D(+)-глюкопиранозы в этой области присутствует сложная полоса с максимумом 993 cm^{-1} и дифференцированным дублетом 1020/1013 cm^{-1} .

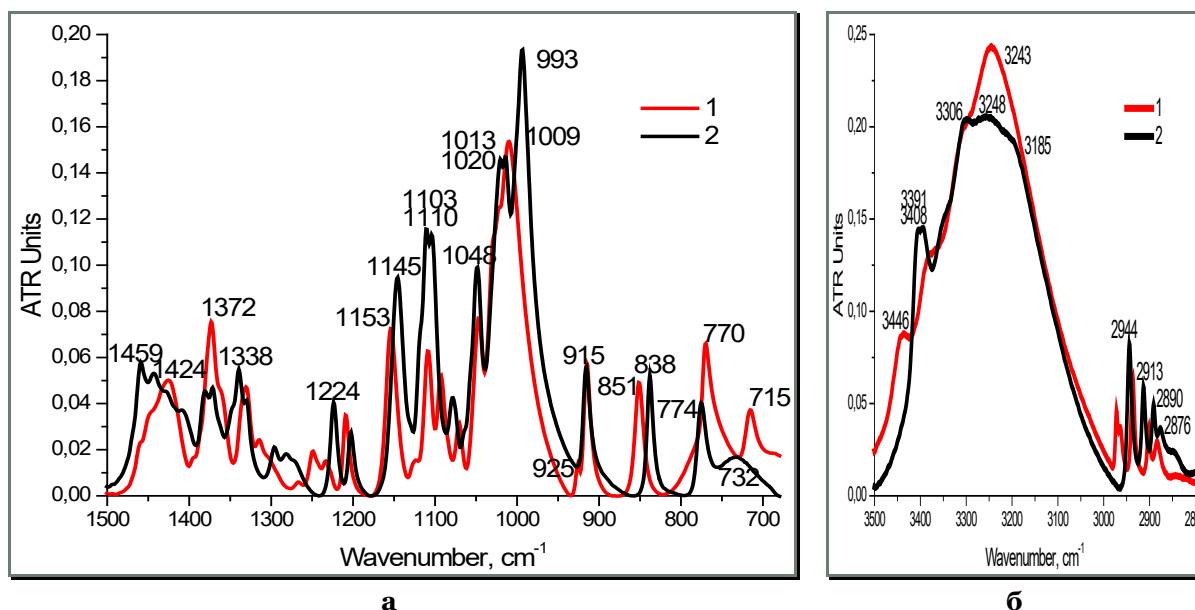


Рисунок 4 – Фрагменты ИК-спектров кристаллических образцов:
 1 – α -D(+)-глюкопиранозы (№ 1), 2 – β -D(+)-глюкопиранозы (№ 4); а) 1500–680, б) 3500–2800 cm^{-1}
 Figure 4. Fragments of IR spectra of crystalline samples:
 1 – α -D(+)-glucopyranoses (no. 1), 2 – β -D(+)-glucopyranoses (no. 4); а) 1500–680, б) 3500–2800 cm^{-1}

Кроме того, в спектре β -формы наблюдаются еще три полосы с близко расположенными максимумами в дублетах: 1110/1103, 1382/1372 cm^{-1} (рисунок 4а) и 3408/3391 cm^{-1} (рисунок 4б), которых нет в спектрах α -формы. Важным признаком принадлежности структуры глюкопиранозы к β -форме является присутствие полосы 838 cm^{-1} . Интересна полоса в области (1500...1400) cm^{-1} с плавающими максимумами, хорошо передающая изменения в оптических характеристиках ОН-групп (рисунок 4а) в результате переворота пиранозного цикла при обратимом переходе α - и β -форм глюкопиранозы. Пологий наклон правой ветви широкой структурированной полосы с максимумом 1459 cm^{-1} для β -формы и подъем структурированной левой ветви полосы с максимумом 1424 cm^{-1} в спектре α -формы. Однако положение более выраженных плечей на правой ветви максимума 1459 cm^{-1} в спектре β -формы полностью совпадает с положением плечей на левой ветви максимума 1424 cm^{-1} в спектре α -формы – 1459; 1442; 1424 cm^{-1} , за исключением плеча 1404 cm^{-1} . Для спектра β -формы глюкопиранозы характерны полосы – 1459; 1224; 993; 838; 774; 732 cm^{-1} . Из близко расположенных полос, которые при совместном присутствии обеих форм могут накладываться или давать уширение общей полосы, следует выделить – 1372(1370); 1146 (1148); 1108 (1110); 770 (774) cm^{-1} . В высокочастотной области наблюдается трансформация максимума и формирование характерного дублета 3408/3391 cm^{-1} .

Проявление β -формы глюкопиранозы, присутствующей в качестве примеси в структуре α -формы, хорошо видно по полосе 838 cm^{-1} , представленной как плечо на правой ветви полосы 851 cm^{-1} в спектре α -формы глюкопиранозы, а также по смещению глобального максимума в положение 1012 cm^{-1} при сопоставлении спектров образцов № 1 и № 3 (рисунок 5). Во всех остальных диапазонах, в том числе и высокочастотном (рисунок 5б), явных отличий не отмечено.

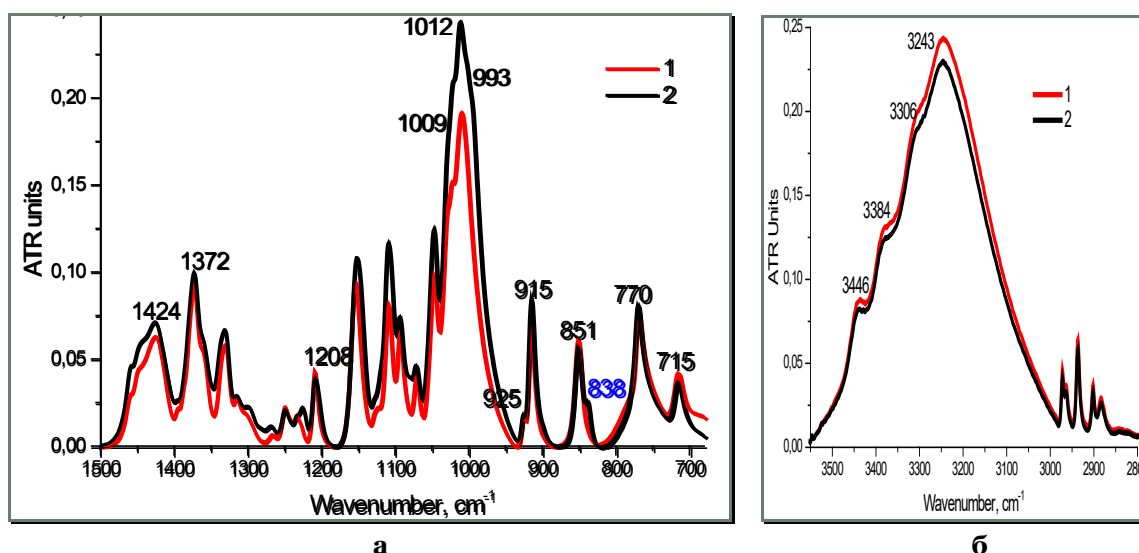


Рисунок 5 – Фрагменты ИК-спектров: 1 – α -D(+)-глюкопиранозы (№ 1), 2 – α -D(+)-глюкопиранозы с примесью β -формы (№ 3); а) 1500–680, б) 3550–2800 cm^{-1}

Figure 5. Fragments of IR spectra: 1 – α -D(+)-glucopyranoses (no. 1), 2 – α -D(+)-glucopyranoses with an admixture of β -form (no. 3); a) 1500–680, b) 3550–2800 cm^{-1}

Однако с увеличением количества β -формы в составе образца α -D(-)-глюкозы (№ 7), как показано на рисунке 6а, картина заметно меняется. Плечо 838 cm^{-1} трансформируется в полосу, максимум 1009 cm^{-1} расщепляется на два – 1013 и 993 cm^{-1} , левая ветвь полосы с максимумом 1424 cm^{-1} испытывает подъем, а на левой ветви максимума 3245 cm^{-1} (рисунок 6б), дифференцируясь, вырисовываются более четко полосы 3391 и 3306 cm^{-1} и убывает полоса 3446 cm^{-1} . Кроме того, более выражены изменения и в области поглощения C-H -группировок. Все отмеченные признаки, характерны для β -формы глюкопиранозы. Направление оптического вращения мономеров спектрально не проявляется.

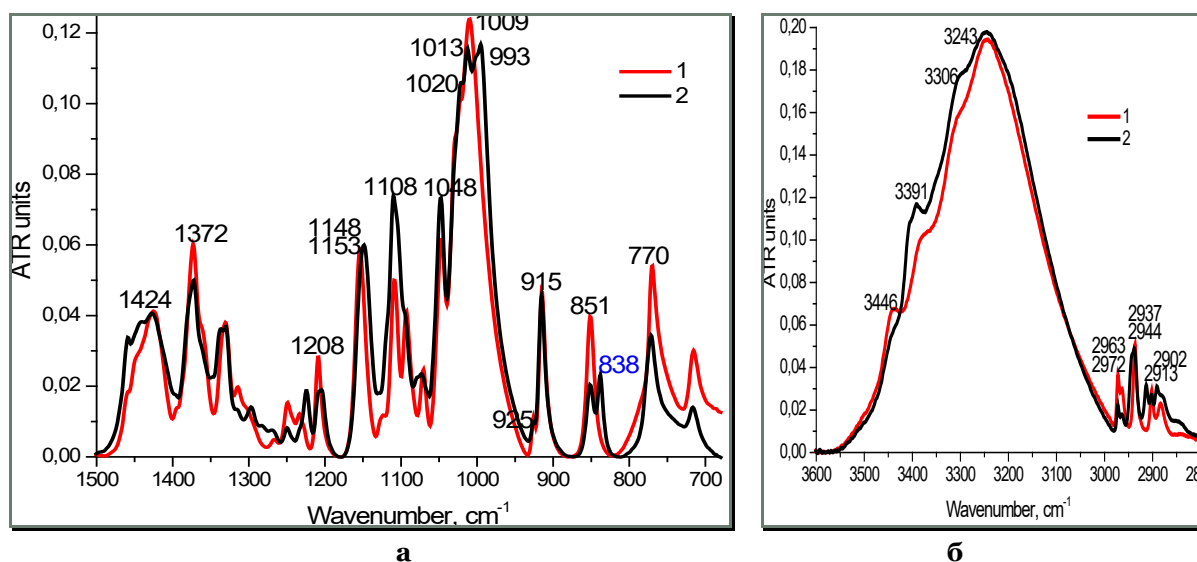


Рисунок 6 – Фрагменты ИК-спектров: 1 – α -D(+)-глюкопираноза (№ 1), 2 – α -D(-)-глюкопираноза с примесью β -формы D(+)-глюкопиранозы (№ 7); а) 1500–680, б) 3600–2800 cm^{-1}

Figure 6. Fragments of IR spectra: 1 – α -D(+)-glucopyranose (no. 1), 2 – α -D(-)-glucopyranose with an admixture of β -form D(+)-glucopyranose (no. 7); a) 1500–680, b) 3600–2800 cm^{-1}

На рисунке 7 показано влияние примеси α -D(+)-глюкопиранозы на характер изменения спектра β -D(+)-глюкопиранозы (№ 5). В этом случае наиболее показательно появление небольшой полоски 851 cm^{-1} , характерной для α -формы глюкопиранозы, на левой ветви полосы 838 cm^{-1} β -формы. Небольшой подъем левой ветви максимума 1459 cm^{-1} и сглаживание полосы 1408 cm^{-1} на ней так же указывает на факт присутствия примеси α -формы. Наименее проявлены признаки вмешательства примеси в области (1200...950) cm^{-1} , ответственной за колебания структурных элементов пиранозных

колец. В области высоких частот (рисунок 7б) можно отметить снижение максимума 3248 см⁻¹ и появление слабоинтенсивной полосы 2972 см⁻¹, присутствующей в спектре α-формы.

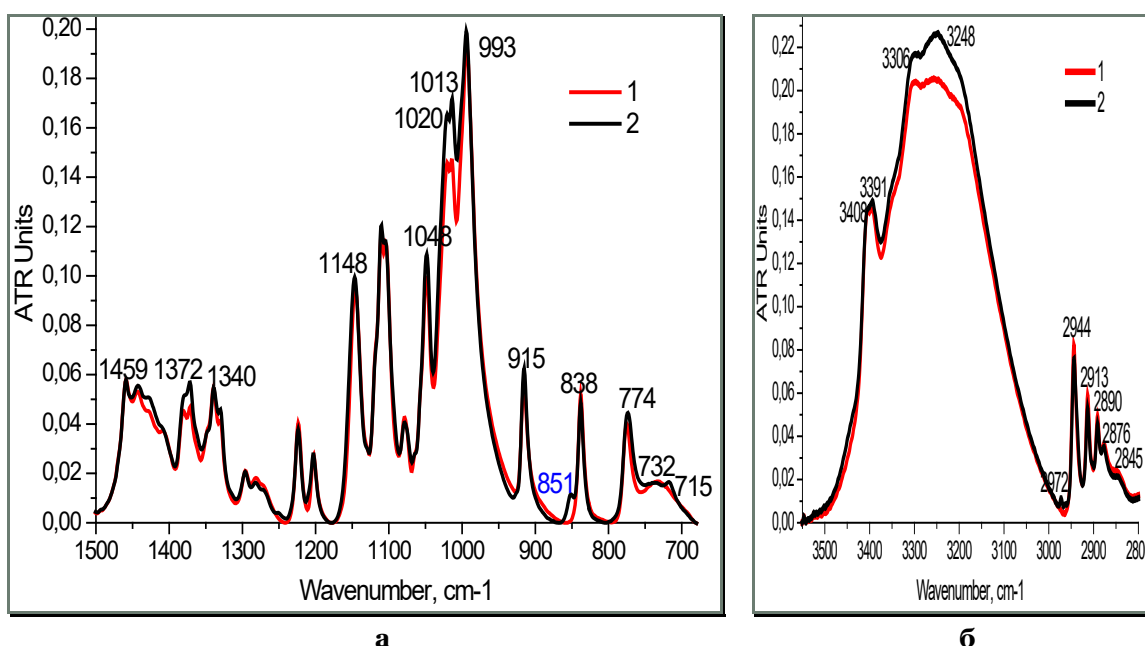


Рисунок 7 – Фрагменты ИК-спектров: 1 – β-D(+)-глюкопираноза (№ 4), 2 – β-D(+)-глюкопираноза с примесью α-D(+)-глюкопиранозы (№ 5); а) 1500–680, б) 3550–2800 см⁻¹

Figure. 7. Fragments of IR spectra: 1 – β-D(+)-glucopyranose (no. 4), 2 – β-D(+)-glucopyranose with an admixture of α-D(+)-glucopyranose (no. 5); а) 1500–680, б) 3550–2800 cm⁻¹

В этом случае, очевидно, как и в случае образца № 3 (рисунок 5), количество примеси второго аномера недостаточно для его более ярких проявлений в спектре основного компонента. Однако данная экспериментальная серия показала возможности метода ИКС НПВО при контроле глюкозы на аномерную чистоту полученного продукта.

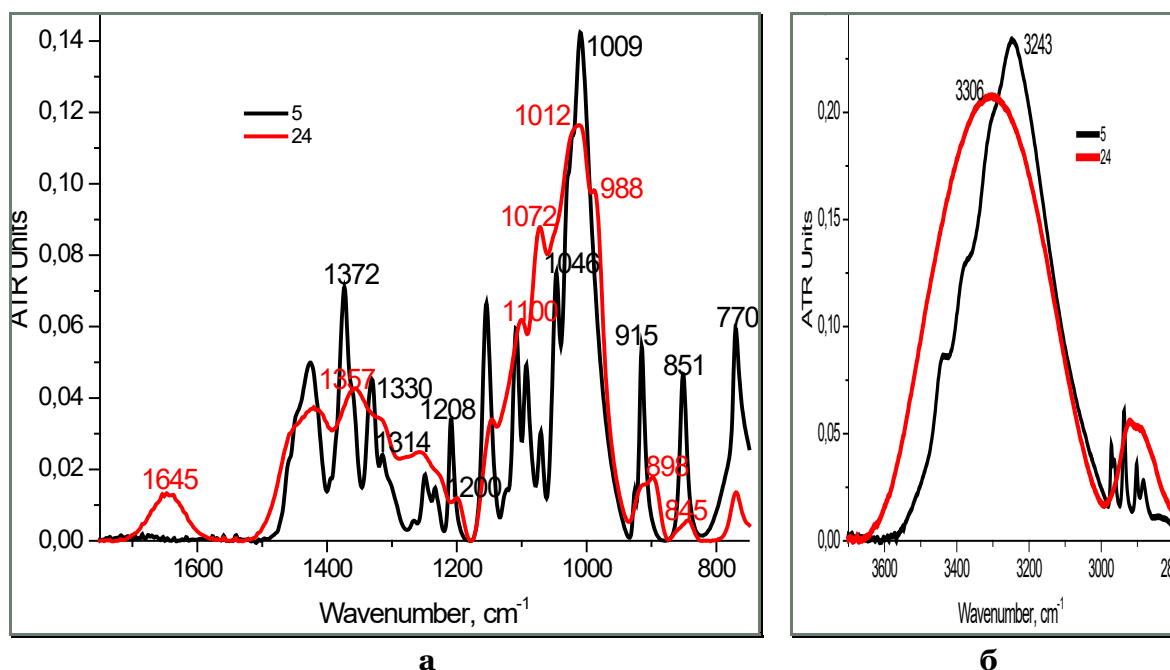


Рисунок 8 – Фрагменты ИК-спектров кристаллических образцов α-D(+)-глюкопиранозы:

1 – № 2, 2 – № 6; а) 1750–700, б) 3550–2800 см⁻¹

Figure 8. Fragments of IR spectra of crystalline samples of α-D(+)-glucopyranose:

1 – no. 2, 2 – no. 6; а) 1750–700, б) 3550–2800 cm⁻¹

Результаты, представленные на рисунке 8, позволяют проиллюстрировать влияние поглощенной атмосферной влаги (неправильное хранение, частое или длительное открывание емкости с образцом) на спектр кристаллической α -D(+)-глюкопиранозы (№ 7). То, что влага в нем присутствует видно по наличию полосы деформационных колебаний ОН-групп воды 1645 см^{-1} , отсутствующей в спектрах остальных образцов. А ее влияние бесспорно и значимо.

Увлажненность образца, как следует из представленных данных, существенным образом изменяет его оптические свойства, сглаживая спектр и маскируя большинство полос слева от максимума 1009 см^{-1} по сравнению со спектром безводного образца № 2. При этом сам глобальный максимум смещается с небольшим повышением частоты колебаний – 1012 см^{-1} и, уширяясь (рисунок 8а), формирует левую структурированную ветвь, в состав которой входят все ранее дифференцированные полосы. Следует особо отметить образование новой полосы 988 см^{-1} на его правой ветви, ранее не встречавшейся в спектрах рассмотренных образцов. Индивидуальны и выразительны проявления влаги в низкочастотной области. Здесь, наряду со снижением интенсивности полосы 915 см^{-1} , так же появляется новая полоса 898 см^{-1} и наблюдается смещение полосы 851 см^{-1} в положение 845 см^{-1} .

Сглаживается и смещается в область более высоких частот полоса 3243 см^{-1} (рисунок 8б). Нарушена дифференциация полос и в области поглощения CH_n -группировок ($2000\text{--}2800\text{ см}^{-1}$). Стабильным остается положение полос 915 и 770 см^{-1} . Отмеченные факты приобретают значимость при рассмотрении водных растворов глюкозы. Увлажненный образец представляет своего рода промежуточное состояние между кристаллической α -формой и раствором, где глюкопираноза присутствует преимущественно в β -конфигурации.

Выводы

Исследование серии кристаллических образцов D(+)-глюкозы методом Фурье ИК-спектроскопии показало его возможности при анализе на аномерную чистоту α - и β -форм глюкопиранозы. Отмечено, что примесь β -структуры регистрируется по наличию плеча 838 см^{-1} на правой ветви полосы 851 см^{-1} α -D(+)-глюкопиранозы. Напротив, примесь α -формы – в виде плеча при 851 см^{-1} на левой ветви полосы 838 см^{-1} в спектре β -D(+)-глюкопиранозы. Дополнительную информацию позволяет получить фактура широкой структурированной полосы в области ($1500\text{--}1400\text{ см}^{-1}$) с плавающими максимумами при 1424 см^{-1} (α -D(+)-глюкопираноза) и 1459 см^{-1} (β -D(+)-глюкопираноза). Полученные данные могут быть полезны при производстве продукции с маркировкой, указывающей α - или β -форму D(+)-глюкопиранозы и ее аномерную чистоту.

Литература

1. Smith B.C. An IR spectral interpretation potpourri: Carbohydrates and alkynes. *Spectroscopy*. 2017, V. 32, no. 7, pp. 18–24.
2. Черепанов И.С., Красноперова О.С. О возможности количественной оценки структуры продуктов карамелизации сахаров методом ИК Фурье- спектроскопии // Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов. 2019. № 3. С. 3–8.
3. Kanou M., Nakanishi K., Yashimoto A., Kameoka T. Influences of monosaccharides and its glycosidic linkages on infrared spectral characteristics of disaccharides in aqueous solutions. *Appl. Spectrosc.* 2005, V. 59, no. 7, pp. 885–892. DOI: 10.1366/0003702054411760
4. Long Y., Yu Y., Song B., Wu H. Polymerization of glucose during acid catalyzed pyrolysis at low temperatures. *Fuel*. 2018, V. 230, pp. 83–88. DOI:10.1016/j.fuel.2018.05.022
5. Черепанов И.С. Процессы О-гликозилирования при карамелизации D-глюкозы и D-галактозы в этанольных средах // Сахар. 2018. № 9. С. 30–33.
6. Haghparast S., Shabanpour B., Kashiri H., Alipour Gh., Sodagar M. A comparative study on antioxidative properties of carameled reducing sugars; Inhibitory effect on lipid oxidative and sensory improvement of glucose carameled products in shrimp flesh. *J. Agr. Sci. Tech.* 2013, V. 15, Is. 1, pp. 87–99.
7. Иванова И.К., Корякина В.В., Шиц Е.Ю., Федорова А.И. Применение метода ^{13}C ЯМР-спектроскопии для определения термической преобразованности меда // Химия растительного сырья. 2011. № 4. С. 153–156.
8. Дроздов К.А., Вшивкова Т.С. Выявление фальсификатов меда методом ядерно-магнитной спектроскопии // Вестник Приамурского гос. ун-та им. Шолом-Алейхема. 2020. № 3. С. 35–40. DOI: 10.24412/2227-1384-2020-10035

9. Golon A., Kuhnert N. Characterization of "caramel-type" thermal decomposition products of selected monosaccharides including fructose, mannose, galactose, arabinose and ribose by advanced electrospray ionization mass spectrometry methods. *Food & Function*. 2013, V. 4, pp. 1040–1050. DOI: 10.1039/c3fo30352g
10. Stuart D.A., Yuen J.M., Shah N., Lyandres O., Yonzon C.R., Glucksberg M.R., Walsh J.T., van Duyn R.P. In vivo glucose measurement by surface-enhanced Raman spectroscopy. *Anal. Chem.* 2006, V. 78, no. 20, pp. 7211–7215. DOI: 10.1021/ac061238u
11. Schrader W., Meuer P., Popp J., Kiefer W., Menzebach J.-U., Schrader B. Non-invasive glucose determination in the human eye. *J. Mol. Struct.* 2005, V. 735-736, no. 3, pp. 299–306. DOI: 10.1016/j.molstruc.2004.10.115
12. Shen Y.S., Davies A.G., Linfield E.H., Elsey T.S., Taday P.F., Arnone D.D. The use of Fourier-transform infra-red spectroscopy for the quantitative determination of glucose concentration in whole blood. *Phys. Med. Biol.* 2003, V. 48, no. 13, pp. 2023–2032. DOI: 10.1088/0031-9155/48/13/313
13. Нечипоренко А.П., Орехова С.М., Нечипоренко У.Ю., Плотникова Л.В. Биофизика. Оптические свойства биологических тканей животного и растительного происхождения. СПб.: Лань, 2022. 404 с.
14. Седакова В.А., Громова Е.С. Исследование качественного состава сопутствующих сахаров в пектине различного происхождения // Вестник фармации. 2011. Т. 54. № 4. С. 17–23.
15. Wang J., Rlirs M., Jun S., Jackson M., Li Q. Rapid analysis of glucose, fructose, sucrose and maltose in honeys from different geographic regions using Fourier transform infrared spectroscopy. *J. Food Sci.* 2010, V. 75, no. 2, pp. C208–214. DOI: 10.1111/j.1750-3841.2009.01504.x
16. Longas M., Cheairs K., Puchalski M.M., Park J.I. Reliability of Fourier transform infrared spectroscopy in the characterization of human skin. *Advances in Biological Chemistry*. 2011, no. 1, pp. 24–28. DOI: 10.4236/abc.2011.12004
17. Abramovich A., Shulzinger A. Diagnostic and analysis of human sperm characteristics using Fourier transform infrared spectroscopy. *Open Journal of Urology*. 2015, no. 5, pp. 97–101. DOI: 10.4236/oju.2015.56015
18. Нечипоренко А.П., Везо О.С., Нечипоренко У.Ю., Плотникова Л.В., Украинцева П.И. Влияние термообработки на оптические свойства меда // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2022. № 3. С. 30–45. DOI: 10.17586/2310-1164-2022-15-3-30-45
19. Черепанов И.С. Изучение структурных особенностей продукта карамелизации D-глюкозы методом производной ИК-Фурье спектроскопии // Ползуновский вестник. 2019. № 1. С. 137–141. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2019.01.025
20. Буслов Д.К., Никоненко Н.А., Сушко Н.И., Жбанков Р.Г. Анализ структуры полос ИК спектра β -D-глюкозы регуляризованным методом деконволюции // Журнал прикладной спектроскопии. 2002. Т. 69. № 6. С. 712–718.
21. Тюкавкина Н.А., Бауков Ю.И. Биоорганическая химия. М.: Дрофа, 2005. 542 с.
22. Черепанов И.С. Структурные параметры продуктов термодеструкции углеводных систем и их взаимосвязь с биоактивностью // Инновации и продовольственная безопасность. 2021. № 3. С. 40–47. DOI: 10.31677/2072-6724-2021-33-3-40-47
23. Schultz T.W., Yarbrough J.W. Trends in structure-toxicity relationship for carbonyl-containing α , β -unsaturated compounds. *SAR QSAR Environ. Res.* 2004, V. 15, Is. 2, pp. 139–146. DOI: 10.1080/10629360410001665839

References

1. Smith B.C. An IR spectral interpretation potpourri: Carbohydrates and alkynes. *Spectroscopy*. 2017, V. 32, no. 7, pp. 18–24.
2. Cherepanov I.S., Krasnoperova O.S. To the problem of quantitative estimation of carbohydrate caramelization product's structure using infrared-fourier transform spectroscopy. *Technology and Merchandising of the Innovative Foodstuff*. 2019, no. 3, pp. 3–8. (In Russian)
3. Kanou M., Nakanishi K., Yashimoto A., Kameoka T. Influences of monosaccharides and its glycosidic linkages on infrared spectral characteristics of disaccharides in aqueous solutions. *Appl. Spectrosc.* 2005, V. 59, no. 7, pp. 885–892. DOI: 10.1366/0003702054411760
4. Long Y., Yu Y., Song B., Wu H. Polymerization of glucose during acid catalyzed pyrolysis at low temperatures. *Fuel*. 2018, V. 230, pp. 83–88. DOI: 10.1016/j.fuel.2018.05.022
5. Cherepanov I.S. The processes of O-glycosylation during caramelization of D-glucose and D-galactose in ethanol media. *Sahar*. 2018, no.9, pp. 30–33. (In Russian)
6. Haghparast S., Shabanpour B., Kashiri H., Alipour Gh., Sodagar M. A comparative study on antioxidative properties of carameled reducing sugars; Inhibitory effect on lipid oxidative and sensory improvement of glucose carameled products in shrimp flesh. *J. Agr. Sci. Tech.* 2013, V. 15, Is. 1, pp. 87–99.
7. Ivanova I.K., Koryakina V.V., Shits E.Yu., Fedorova A.I. Application of the ^{13}C NMR spectroscopy method to determine the thermal transformation of honey. *Chemistry of Plant Raw Material*. 2011, no. 4, pp. 153–156. (In Russian)
8. Drozdov K. A., Vshivkova T. S. Detection of counterfeit honey by nuclear magnetic resonance spectroscopy. *Vestnik Priamurskogo gosudarstvennogo universiteta im. Sholom-Aleikhema*. 2020, no. 3, pp. 35–40. DOI: 10.24412/2227-1384-2020-10035 (In Russian)

9. Golon A., Kuhnert N. Characterization of "caramel-type" thermal decomposition products of selected monosaccharides including fructose, mannose, galactose, arabinose and ribose by advanced electrospray ionization mass spectrometry methods. *Food & Function*. 2013, V. 4, pp. 1040–1050. DOI: 10.1039/c3fo30352g
10. Stuart D.A., Yuen J.M., Shah N., Lyandres O., Yonzon C.R., Glucksberg M.R., Walsh J.T., van Duyn R.P. In vivo glucose measurement by surface-enhanced Raman spectroscopy. *Anal. Chem.* 2006, V. 78, no. 20, pp. 7211–7215. DOI: 10.1021/ac061238u
11. Schrader W., Meuer P., Popp J., Kiefer W., Menzebach J.-U., Schrader B. Non-invasive glucose determination in the human eye. *J. Mol. Struct.* 2005, V. 735-736, no. 3, pp. 299–306. DOI: 10.1016/j.molstruc.2004.10.115
12. Shen Y.S., Davies A.G., Linfield E.H., Elsey T.S., Taday P.F., Arnone D.D. The use of Fourier-transform infra-red spectroscopy for the quantitative determination of glucose concentration in whole blood. *Phys. Med. Biol.* 2003, V. 48, no. 13, pp. 2023–2032. DOI: 10.1088/0031-9155/48/13/313
13. Nechiporenko A.P., Orekhova S.M., Nechiporenko U.Yu., Plotnikova L.V. Biophysics. Optical properties of biological tissues of animal and plant origin: a textbook for universities. St. Petersburg, Lan' Publ., 2022. 404 p. (In Russian)
14. Sedakova V.A., Gromova E.S. Investigation of quality content of co-sugars in pectin from different origin. *Vestnik farmatsii*. 2011, no. 4, pp. 17–23. (In Russian)
15. Wang J., Rlirs M., Jun S., Jackson M., Li Q. Rapid analysis of glucose, fructose, sucrose and maltose in honeys from different geographic regions using Fourier transform infrared spectroscopy. *J. Food Sci.* 2010, V. 75, no. 2, pp. C208–214. DOI: 10.1111/j.1750-3841.2009.01504.x
16. Longas M., Cheairs K., Puchalski M.M., Park J.I. Reliability of Fourier transform infrared spectroscopy in the characterization of human skin. *Advances in Biological Chemistry*. 2011, no. 1, pp. 24–28. DOI: 10.4236/abc.2011.12004
17. Abramovich A., Shulzinger A. Diagnostic and analysis of human sperm characteristics using Fourier transform infrared spectroscopy. *Open Journal of Urology*. 2015, no. 5, pp. 97–101. DOI: 10.4236/oju.2015.56015
18. Nechiporenko A.P., Vezo O.S., Nechiporenko U.Yu., Plotnikova L.V., Ukraintseva P.I. The effect of heat treatment on the optical properties of honey. *Processes and Food Production Equipment*. 2022, no. 3, pp. 30–45. DOI: 10.17586/2310-1164-2022-15-3-30-45 (In Russian)
19. Cherepanov I.S. Study of the structural features of the D-glucose caramelization product by the method of derivative IR-Fourier spectroscopy. *Polzunovskiy vestnik*. 2019, no. 1, pp. 137–141. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2019.01.025 (In Russian)
20. Buslov D.K., Nikonenko N.A., Sushko N.I., Zhbankov R.G. Analysis of the structure of the bands in the IR spectrum of β -D-glucose by the regularized method of deconvolution. *Journal of Applied Spectroscopy*. 2002, V. 69, no. 6, pp. 817–824. (In Russian)
21. Tyukavkina N. A., Baukov Yu. I. *Bioorganic chemistry*. Moscow, Drofa Publ., 2005. 542 p. (In Russian)
22. Cherepanov I.S. Structural parameters of the products of thermal degradation of carbohydrate systems and their relationship with bioactivity. *Innovation and Food Safety*. 2021, no. 3, pp. 40–47. DOI: 10.31677/2072-6724-2021-33-3-40-47 (In Russian)
23. Schultz T.W., Yarbrough J.W. Trends in structure-toxicity relationship for carbonyl-containing α , β -unsaturated compounds. *SAR QSAR Environ. Res.* 2004, V. 15, Is. 2, pp. 139–146. DOI: 10.1080/10629360410001665839

Информация об авторах

Алла Павловна Нечипоренко – д-р хим. наук, профессор

Людмила Валерьевна Плотникова – биофизик

Ольга Сергеевна Везо – инженер центра диагностики функциональных материалов для медицины, фармакологии и нанoeлектроники

Вера Евгеньевна Ситникова – канд. хим. наук, доцент

Information about the authors

Alla P. Nechiporenko, Dr. Sci. (Chem.), Professor

Liudmila V. Plotnikova, Biophysicist

Olga S. Vezo, Engineer of the Center for diagnostics of functional materials for medicine, pharmacology and nanoelectronics

Vera E. Sitnikova, Ph.D. (Chem.), Associate Professor

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests

Статья поступила в редакцию 16.02.2024

Одобрена после рецензирования 07.03.2024

Принята к публикации 11.03.2024

The article was submitted 16.02.2024

Approved after reviewing 07.03.2024

Accepted for publication 11.03.2024