

DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-1-106-118>



Поступила 26.09.2025

Поступила после рецензирования 16.03.2026

Принята в печать 19.03.2026

© Кудинов Р. Е., Кременевская М. И., Ситникова В. Е., Федоров А. В., 2026

<https://www.fsjour.com/jour>

Научная статья

Открытый доступ

ВЛИЯНИЕ ПРИРОДЫ СТАБИЛИЗАТОРА И ВРЕМЕНИ КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ НА ХРАНЕНИЕ СВЕКОЛЬНОГО СОКА

Кудинов Р. Е.^{1*}, Кременевская М. И.¹, Ситникова В. Е.¹, Федоров А. В.^{1,2}

¹ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

² Всероссийский научно-исследовательский институт жиров, Санкт-Петербург, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АННОТАЦИЯ

сок свеклы,
концентрат,
стабилизатор,
бетанин,
натуральный
краситель,
ИК-спектроскопия

Учитывая возросший интерес к природным свекольным беталаинам, остро стоит вопрос о производстве природных пигментов этого класса. Применение концентратов, вырабатываемых из сока корнеплодов столовой свеклы, востребовано в пищевой, фармацевтической и медицинской отраслях. Заданные отраслевым потребителем свойства предполагают получение стабильной системы в процессе длительного хранения с сохранением бетанина, обладающего антиоксидантной активностью. Изучали стабилизирующие свойства лимонной кислоты (0,5%) и смеси лимонной (0,25%) и аскорбиновой (0,25%) кислот на оптические свойства свекольного сока сорта «Бордо-237» в процессах концентрирования и последующего хранения при температуре $4 \pm 0,5^\circ\text{C}$ методами химического анализа, электронной и Фурье-ИК-спектроскопии. Определено влияние природы стабилизирующих агентов на кинетику изменений содержания бетанина и состав белково-углеводных компонентов в процессе концентрирования свекольного сока. Установлено, что природа стабилизатора при незначительном изменении pH свекольного сока в процессе концентрирования, оказывает стабилизирующее действие на бетанин. Увеличение его содержания по отношению к образцу без стабилизатора (0,20%) достигает 0,39% в образце сока с лимонной кислотой и 0,35% в образце сока, стабилизированного лимонной и аскорбиновой кислотами. Введение лимонной кислоты заметно изменяло кинетику концентрирования. При смещении максимума полосы 540 нм в положение 535 нм снижалась выраженность полосы 490 нм и больше проявлялась слабая по интенсивности полоса 455 нм. Определено, что деградация бетанина в концентратах свекольного сока зависит от времени концентрирования. Изменение спектральных характеристик от времени концентрирования характеризуется задержкой до 10 минут процесса, с последующим резким подъемом. Наилучшие показатели системы достигаются в процессе концентрирования в течении 15 минут при температуре $60 \pm 0,2^\circ\text{C}$ и давлении 72 ± 10 мбар. Минимальные потери бетанина в концентратах, стабилизированных лимонной кислотой, после четырех месяцев холодильного хранения при температуре $4 \pm 0,5^\circ\text{C}$, составили 5%.

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают благодарность доктору химических наук, профессору А. П. Нечипоренко за консультативную помощь в интерпретации спектральных данных в исследовании по Фурье ИК спектроскопии.

Received 26.09.2025

Accepted in revised 16.03.2026

Accepted for publication 19.03.2026

© Kudinov R. E., Kremenevskaya M. I., Sitnikova V. E., Fedorov A. V., 2026

Available online at <https://www.fsjour.com/jour>

Original scientific article

Open access

EFFECT OF STABILIZER NATURE AND CONCENTRATION TIME ON STORAGE OF BEET JUICE

Roman E. Kudinov^{1*}, Marianna I. Kremenevskaya¹, Vera E. Sitnikova¹, Alexander V. Fedorov^{1,2}

¹ ITMO University, Saint Petersburg, Russia

² All-Russian Scientific Research Institute of Fats, Saint Petersburg, Russia

KEYWORDS:

beetroot juice,
concentrate, stabilizer,
betanin, natural dye,
IR spectroscopy

ABSTRACT

Given the growing interest in natural beetroot betalains, the production of natural pigments of this class is a pressing issue. Concentrates produced from beetroot juice are in demand in the food, pharmaceutical, and medical industries. The properties specified by industry consumers require a stable system during long-term storage, preserving betanin, which has antioxidant activity. The stabilizing properties of citric acid (0.5%) and a mixture of citric (0.25%) and ascorbic (0.25%) acids on the optical properties of Bordeaux-237 beet juice were studied during concentration and subsequent storage at $4 \pm 0.5^\circ\text{C}$ using chemical analysis, electron microscopy, and Fourier transform infrared spectroscopy. The influence of the nature of the stabilizing agents on the kinetics of changes in betanin content and the composition of protein-carbohydrate components during beet juice concentration was determined. It was found that the nature of the stabilizer exerts a stabilizing effect on betanin, even with minor changes in beetroot juice pH during concentration. The increase in betanin content relative to the sample without the stabilizer (0.20%) reached 0.39% in the juice sample with citric acid and 0.35% in the juice sample stabilized with citric and ascorbic acids. The addition of citric acid significantly altered the concentration kinetics. As the 540 nm band maximum shifted to 535 nm, the 490 nm band decreased in intensity, and the weaker 455 nm band became more prominent. Betanin degradation in beetroot juice concentrates was determined to depend on concentration time. The change in spectral characteristics with concentration time is characterized by a delay of up to 10 minutes, followed by a sharp increase. The best system performance is achieved with a 15-minute concentration at a temperature of $60 \pm 0.2^\circ\text{C}$ and a pressure of 72 ± 10 mbar. The minimum betanin loss in concentrates stabilized with citric acid after four months of refrigerated storage at $4 \pm 0.5^\circ\text{C}$ was 5%.

ACKNOWLEDGEMENTS: The authors are deeply grateful to the Doctor of Chemical Sciences, Professor A. P. Nechiporenko for help in conducting research on Fourier IR spectrometry.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Кудинов, Р. Е., Кременевская, М. И., Ситникова, В. Е., Федоров, А. В. (2026). Влияние природы стабилизатора и времени концентрирования на хранение свекольного сока. *Пищевые системы*, 9(1), 106–118. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-1-106-118>

FOR CITATION: Kudinov, R. E., Kremenevskaya, M. I., Sitnikova, V. E., Fedorov, A. V. (2026). Effect of stabilizer nature and concentration time on storage of beet juice. *Food Systems*, 9(1), 106–118. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-1-106-118>

1. Введение

Сроки холодильного хранения сока или концентратов сока из овощного сырья зависят от выбора стабилизаторов и режимов концентрирования, позволяющих сохранить цвет продукта [1]. Особенности предварительной обработки сокодержущего сырья предполагают знание влияния веществ и процессов, стабилизирующих цвет в течение длительного времени. Для решения задач, связанных с применением полученных красящих пищевых продуктов, необходимы дополнительные исследования с использованием различных методов.

Цветовые характеристики представляются одними из важнейших в логистике продвижения продуктов на рынке питания. Исследования пластидных и непластидных пигментов растительных ресурсов направлены на учёт индивидуальной сенсорной оценки человеческого глаза. Его достаточно узкий спектр информационного восприятия световых частот определяет граничные условия при создании продуктов заданных цветовых оттенков. В кондитерских изделиях наиболее часто применяют различные оттенки красного цвета. Наибольший интерес представляют красители, полученные из органического сырья. Пигменты плодовых, ягодных и овощных культур, обладающих цветовой гаммой розово-фиолетовой, оранжево-жёлто-красной и зелёной окраски наиболее изучены. Антоциан-, каротин- и хлорофиллсодержащие растения благодаря наличию биологически активных веществ, обладают доказанным влиянием на состояние организма человека [2,3].

Бетаниносодержащее сырьё в пищевых системах может рассматриваться не только, как красящее, но и содержащее полезные для здоровья вещества [4–7]. Поступающие с пищей биоактивные соединения обладают антиоксидантной [8,9] и противоопухолевой [10–13] активностью. Отмечается интерес в их применении для пищевых [14], фармакопейных [15–17] и медицинских [18–20] нужд. Междисциплинарный интерес способствует проведению дополнительных исследований и получению новых сведений о продукте с использованием различных методов. Наряду с традиционной спектрофотометрией в УФ и видимой областях, все шире начинают использоваться такие высокочувствительные и информативные инструментальные методы анализа, как ИК-, ЯМР-, Масс-спектроскопия [21–23].

Сегодня ИК-спектроскопия представлена в формате классической и экспресс-версии, не требующей специальной предварительной пробоподготовки образца — Фурье ИК-спектроскопии. Метод позволяет идентифицировать совокупность данных физических, химических и биологических факторов воздействия на исследуемые ингредиенты. Это важно при создании эмульсий или дисперсий белково-полисахаридных структур, где определяющими являются стабильность системы и ее биологически активных веществ [24,25]. Спектральные исследования не всегда имеют систематизированный характер. Наблюдаются разночтения фрагментарного описания спектров красящих веществ по форме, структуре, интенсивности и положению полос по шкале волновых чисел [21–23]. Различие результатов исследований во многом связано с нестандартными условиями получения спектра, что вносит значительную погрешность в их интерпретацию.

Важнейшими факторами стабильности продукции из бетаниносодержащего сырья являются его физико-химические показатели, способы технологической и термической обработки, агрегатное состояние конечного продукта [26]. Предотвращение инактивации биологически активных веществ (БАВ) является первоочередной задачей при разработке функциональных продуктов питания. Отмечается, что применение распылительной сушки [27], ультразвука [28], использование гомогенизаторов высокого давления [29] способствуют уменьшению содержания БАВ и увеличивают стоимость продукции. Для стабильности беталаинов сока и его концентратов, полученных из *Beta Vulgaris*, применяют и органические кислоты. Предпочтение отдают лимонной кислоте по ряду причин. Ее наличие способствует ускорению метаболических процессов в организме человека, связанных с липидно-углеводным обменом [30,31].

Для усиления красящей способности пищевой системы применяют концентрирование свекольного сока. Определение параметров данного процесса должно быть направлено не только на сохранение бетанина и других БАВ. Необходимо учитывать высокое содержание моно- и дисахаридов в соке во избежание реакции карамелизации. Режимы концентрирования должны обеспечивать максимальное сохранение пигмента, качество концентрата и необходимую длительность его холодильного хранения [32]. Концентрирование сока осуществляют в выпарных установках. В зависимости от их конструктивных особенностей и режимов процесс осуществляется

в температурном диапазоне 5–60 °С [33] до содержания сухих веществ (СВ) 55–75 % [34].

Цель работы заключалась в исследовании влияния природы стабилизатора и времени концентрирования на оптические свойства свекольного сока и его концентратов в процессе холодильного хранения с использованием методов химического анализа, электронной и Фурье ИК-спектроскопии.

2. Объекты и методы

2.1. Сок свеклы

Для получения сока использовали корнеплоды столовой свеклы сорта «Бордо 237», выращенные в юго-западном регионе Ленинградской области. Вымытые и очищенные корнеплоды разрезали на кусочки и пропускали через соковыжималку JU655 (Moulinex, Китай) при скорости вращения ротора $n = 12000$ об/мин. Для удаления возможных твердых фракционных включений проводили фильтрование с помощью вакуумного электронасоса VE215N (Value, Китай) и сита из нержавеющей стали, с диаметром отверстий 0,1 мм.

2.2. Стабилизация

Для стабилизации красящего пигмента (бетанина) в соке использовали лимонную кислоту (99,8 %) (ТТСА. Со., LTD, Китай) и аскорбиновую кислоту (99,7 %) (Hugestone Enterprise Co., LTD, Китай).

Объектами исследований являлись 3 серии образцов свекольного сока и концентратов:

- 1 — свекольный сок и концентраты без стабилизатора;
- 2 — свекольный сок и концентраты с добавлением лимонной кислоты (0,5 %);
- 3 — свекольный сок и концентраты с добавлением смеси лимонной (0,25 %) + аскорбиновой кислот (0,25 %).

2.3. Определение pH

Для определения pH полученного сока использовали цифровой pH-метр/кондуктометр S213 (серия SevenCompact Duo, METTLER TOLEDO, Швейцария). Перед измерением pH-метр был откалиброван с использованием стандартных буферных растворов со значениями pH 3,56 и 9,14.

2.4. Определение содержания сухих веществ (СВ)

Определение содержания СВ в образцах свекольного сока проводили ускоренным инфракрасным термогравиметрическим методом при температуре 120 ± 5 °С. Масса образца составила $0,5 \pm 0,05$ г. Измерения осуществляли на анализаторе влажности галогенного HR-83 (METTLER TOLEDO, Швейцария).

2.5. Концентрирование

Концентрирование сока свеклы осуществляли на ротационном испарителе марки RV 10 (ИКА, Германия) при температуре $60 \pm 0,2$ °С, давлении 72 ± 10 мбар, в течение 5,10,15 минут. После концентрирования образцы хранили при температуре $4 \pm 0,5$ °С в течении 4-х месяцев.

2.6. Определение содержания бетанина

Содержание бетанина в 0,1 % растворах образцов сока свеклы определяли на спектрофотометре UNICO 2100 (United Products & Instruments, США), согласно ТР ТС 029/2012¹ (Приложение 28). Расчет массовой доли (С, %) бетанина определяли по формуле:

$$C = \frac{A_{535} \times 100}{1120 \times l \times m}, \quad (1)$$

где: А — оптическая плотность при $\lambda = 535$ нм; 1120 — удельное поглощение 1 % раствора бетанина в 1 см; l — длина кюветы, равная 1 см; m — масса образца, г.

2.7. Спектрометрический анализ

Исследование оптических свойств образцов свекольного сока и его концентратов проводили методами электронной (в диапазоне длин волн 200–700 нм) и Фурье ИК-спектроскопии (в диапазоне частот 4000–600 см⁻¹). Для записи электронных спектров 0,1 % растворов сока и концентратов в кварцевых кюветках с длиной оптического пути 1,0 см использовали спектрофлуориметр CM 2203 (СОЛАР, Беларусь).

Для визуализации и сравнения спектральных характеристик по фактуре полос сока и его концентратов в УФ области спектра использовали вспомогательные вещества: 20 и 40 % растворы сахарозы (Россия), 0,75; 0,50; 0,25; 0,125; 0,0625 % растворы яичного альбумина

¹ ТР ТС 029/2012 «Требования безопасности пищевых добавок, ароматизаторов и технологических вспомогательных средств» (Утвержден решением Совета Евразийской экономической комиссии 20 июля 2012 г., № 58. Электронный ресурс <https://docs.cntd.ru/document/902359401> Дата обращения 21.08.2025.

(РОСКАР, Россия), нативный яичный белок куриных яиц, купленных на местном рынке и его 0,5 и 1% растворы.

Колебательные спектры (32 скана) образцов получали на Фурье-спектрометре Tensor 37 (Bruker, Германия) с алмазным НПВО элементом, управляемым программным пакетом OPUS со стандартными градуировочными возможностями в формате поглощения. Полученные результаты обрабатывались в программе Origin 2021.

2.7.1. Подготовка образцов для Фурье ИК-спектроскопии

Образцы свекольного сока и концентратов с помощью пипетки Пастера наносили на предметные стекла размером 75×25×1,2 мм (Микромед, Россия), которые оставляли в изолированном от света месте при температуре 23±0,5°C до полного высыхания. Такая пробоподготовка позволяет чётко идентифицировать результаты, исключая погрешности их разночтения, вносимые водой.

2.8. Статистический анализ

Исследования проводили с необходимой кратностью, обеспечивающей доверительный интервал случайной погрешности результата измерения $P \geq 0,95$. Различия средних значений выборок с применением критерия Стьюдента признавали статистически достоверными при доверительной вероятности $P < 0,05$. При статистической обработке экспериментальных результатов использовали программы Microsoft Excel Office 2019 и OriginPro (пробная версия, OriginLab), США. Анализ спектральных данных интерпретировали после предварительной обработки, сопоставления спектров в библиотеке прибора и коррекции базовой линии.

3. Результаты и обсуждение

Использование свекольного сока или его концентратов в качестве ингредиента в составе функциональных пищевых продуктов, в том числе эмульсий, связано с увеличением сроков хранения [35]. Определение стабилизаторов цвета и режимы процесса концентрирования соков играют решающую роль в изменении красящих веществ и продолжительности хранения продукта.

3.1. Химический анализ

Влияние природы стабилизатора оценивали по содержанию красящего вещества — бетанина, который отвечает за цвет свекольного сока и является определяющим показателем его качества. Концентрирование трех серий образцов свекольного сока проводили до содержания СВ 57–59% [33]. Анализ данных в Таблице 1 показал, что природа стабилизатора не оказывает существенного влияния

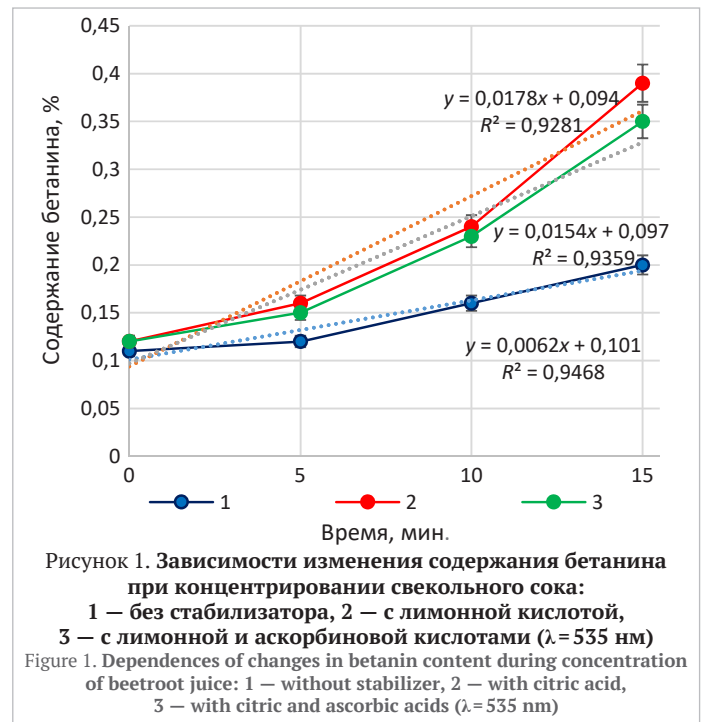


Рисунок 1. Зависимости изменения содержания бетанина при концентрировании свекольного сока: 1 — без стабилизатора, 2 — с лимонной кислотой, 3 — с лимонной и аскорбиновой кислотами ($\lambda = 535$ nm)
 Figure 1. Dependences of changes in betanin content during concentration of beetroot juice: 1 — without stabilizer, 2 — with citric acid, 3 — with citric and ascorbic acids ($\lambda = 535$ nm)

на кислотность свекольного сока в процессе концентрирования. Но стабилизирующую роль кислот подтверждает содержание бетанина после концентрирования (15 минут), которое почти в 2 раза больше по сравнению с соком без стабилизатора.

Кинетика процесса концентрирования, представленная на Рисунке 1 также показала стабилизирующую роль кислот. Скорость концентрирования после 10 минут резко возрастает в образцах сока со стабилизирующими компонентами в отличие от образца без стабилизатора.

Деградация бетанина в процессе холодильного хранения в течение 1–2–4 месяцев (Рисунок 2) напрямую зависела от консистенции образцов свекольного сока, которая определялась временем концентрирования и присутствием стабилизатора. Только концентрирование

Таблица 1. Влияние природы стабилизатора на показатели свекольного сока

Table 1. The influence of the nature of the stabilizer on the properties of beetroot juice

| Стабилизатор | рН | | Содержание СВ, % | | Содержание бетанина, % | |
|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------|--------------------------|--------------------------|
| | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| Без стабилизатора | 6,10±0,11 ^a | 6,15±0,11 ^a | 13,4±0,20 ^a | 58±1 ^a | 0,110±0,002 ^a | 0,200±0,005 ^a |
| Кислоты: | | | | | | |
| Лимонная | 4,30±0,10 ^b | 4,35±0,10 ^b | 13,9±0,20 ^a | 58±1 ^a | 0,120±0,003 ^b | 0,390±0,005 ^b |
| Лимонная+аскорбиновая | 4,50±0,11 ^b | 4,55±0,11 ^b | 13,9±0,20 ^a | 58±1 ^a | 0,120±0,003 ^b | 0,350±0,005 ^c |

1 — до концентрирования; 2 — после 15 минут концентрирования.

Примечание: Одинаковыми надстрочными латинскими буквами обозначены статистически не различающиеся между собой и по сравнению с контролем при $P < 0,05$ (по критерию Стьюдента).

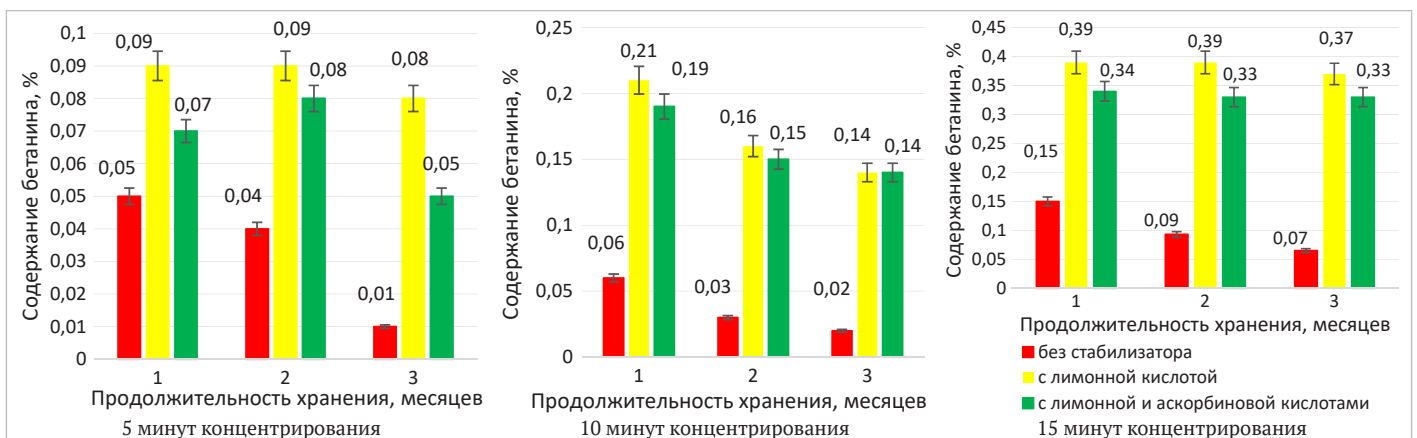


Рисунок 2. Изменение содержания бетанина в образцах свекольного сока в зависимости от времени концентрирования и природы стабилизирующих веществ в процессе хранения: 1 — 1; 2 — 2; 3 — 4 месяцев

Figure 2. Changes in betanin content in beetroot juice samples depending on the concentration time and the nature of stabilizing substances during storage: 1 — 1; 2 — 2; 3 — 4 months

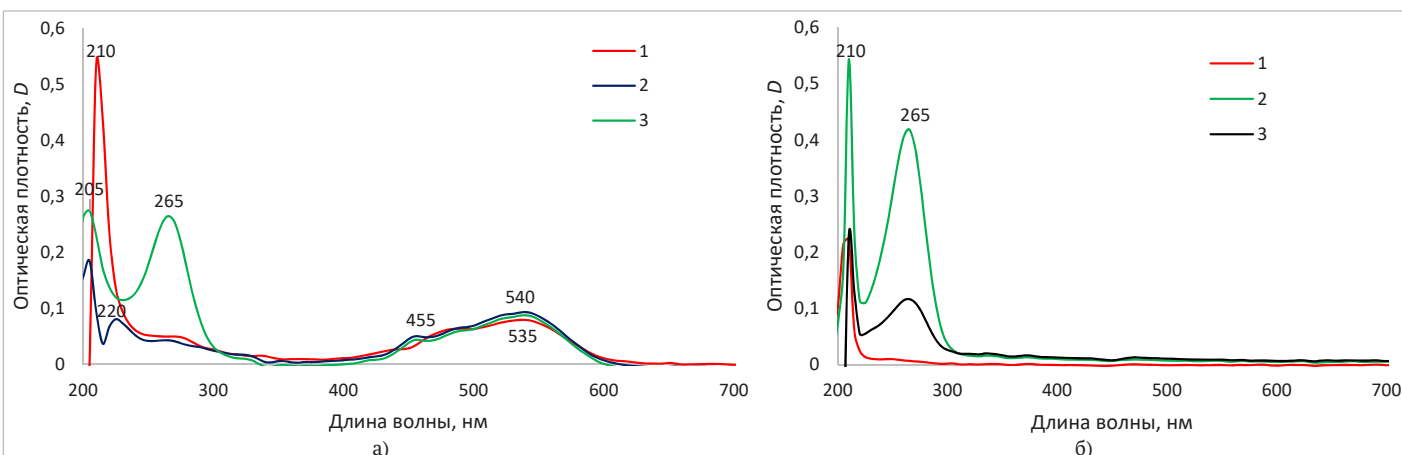


Рисунок 3. Электронные спектры свекольного сока: а) 1 – без стабилизатора, 2 – с лимонной кислотой, 3 – с лимонной и аскорбиновой кислотами; б) растворов: 1 – лимонная кислота (0,5%); 2 – аскорбиновая кислота (0,5%); 3 – лимонная (0,25%) и аскорбиновая (0,25%) кислоты

Figure 3. Electronic spectra of beetroot juice: а) 1 – without stabilizer, 2 – with citric acid, 3 – with citric and ascorbic acids; б) solutions: 1 – citric acid (0.5%); 2 – ascorbic acid (0.5%); 3 – citric (0.25%) and ascorbic (0.25%) acids

в течение 15 минут свекольного сока, стабилизированного лимонной кислотой, лимонной и аскорбиновой кислотами сохраняет бетанин в течение 4-х месяцев. Деградация бетанина составила 5%. В соке без стабилизатора содержание бетанина снизилось на 67,5%.

Добавление аскорбиновой кислоты в количестве 0,25% к лимонной не оказало значительного влияния на изменения содержания бетанина при концентрировании, поэтому целесообразно использовать в качестве стабилизатора лимонную кислоту [30,36]. Исследователями в [37] было установлено, что добавление 1% аскорбиновой кислоты обеспечивает максимальную стабильность бетаина. Основываясь на представленных нами результатах, можно заключить, что использование 0,5% более дешевой для производственных нужд лимонной кислоты является достаточным условием для сохранения бетанина в концентратах из свеклы.

3.2. Электронная спектроскопия

Добавление в свекольный сок лимонной кислоты и смеси лимонной и аскорбиновой кислот (Рисунок 3), незначительно изменило фактуру полосы красителя, проявляясь в появлении небольшой полосы 455 нм и смещении максимума бетанина 535 нм в положение 540 нм. Введение стабилизаторов незначительно увеличило содержание бетанина, что подтверждает химический анализ.

Основные изменения наблюдались в УФ области спектра. Введение в свекольный сок лимонной кислоты резко снижало интенсивность полосы 210 нм в спектре сока и ее распад на две – 205 и 220 нм, не затрагивая слабо выраженную полосу 265 нм. При добавлении в систему аскорбиновой кислоты, полоса 205 нм возрастала по интенсивности, а в области 265 нм дифференцировалась достаточно интенсивная полоса. Обе полосы могут свидетельствовать о присутствии в образцах сока как стабилизатора, так и протеиновых компонентов – пептидная связь в области 190–210 нм и ароматические аминокислоты (триптофан, тирозин) в области 260–275 нм [38]. Кроме того, в данном диапазоне могут поглощать и сахара, присутствующие в свекольном соке в большом количестве.

Анализ спектров растворов стабилизаторов (Рисунок 3б) показал, что для них, как и для свекольного сока характерна полоса 210 нм. В спектре раствора лимонной кислоты полоса 265 нм отсутствовала, а в спектре аскорбиновой кислоты ее наличие обусловлено кольцевой структурой в составе молекулы (Рисунок 4б).

Изменение спектральных характеристик от времени концентрирования иллюстрирует Рисунок 5. Для всех трех серий образцов свекольного сока отмечена задержка в изменении спектра до 10 минут процесса концентрирования и резкий подъем после. При этом

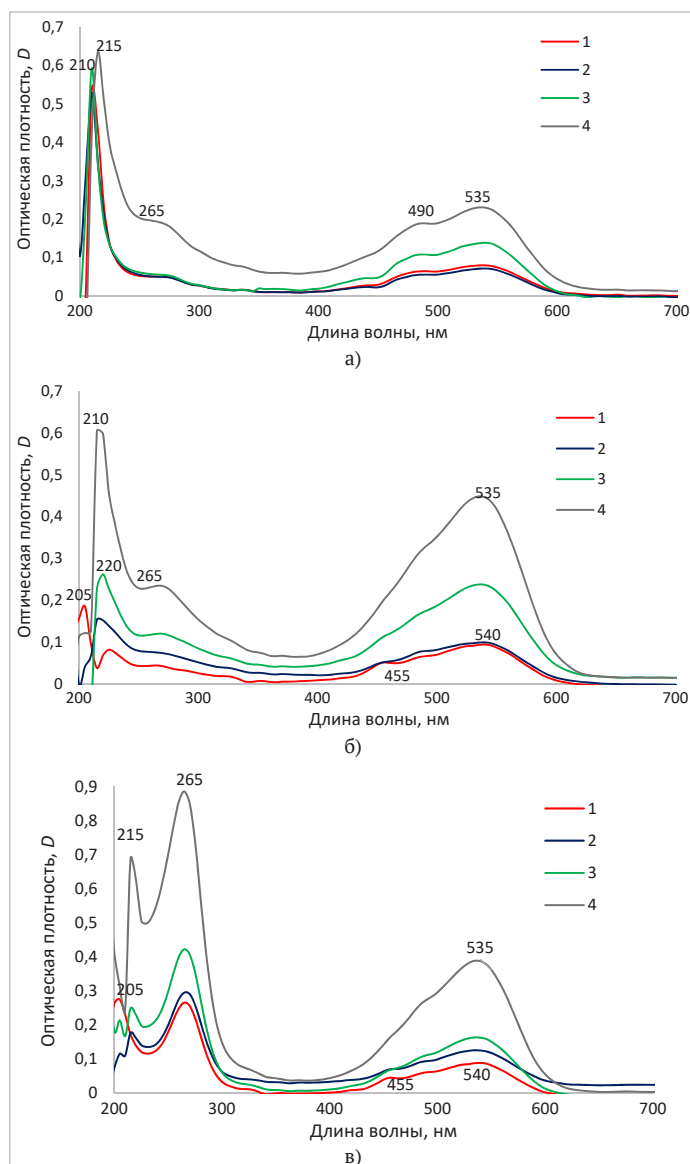


Рисунок 5. Электронные спектры концентратов свекольного сока: а) без стабилизатора, б) с лимонной кислотой, в) с лимонной и аскорбиновой кислотами; время концентрирования: 1 – 0, 2 – 5, 3 – 10, 4 – 15 минут

Figure 5. Electronic spectra of beetroot juice concentrates: а) without stabilizer, б) with citric acid, в) with citric and ascorbic acids; concentration time: 1 – 0, 2 – 5, 3 – 10, 4 – 15 minutes

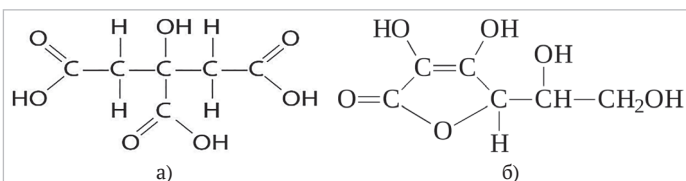


Рисунок 4. Структурная формула кислот: а) лимонная, б) аскорбиновая

Figure 2. Structural formula of acids: а) citric, б) ascorbic

основные полосы бетанина 535 и 490 нм не меняли своего положения по шкале длин волн [32], а полоса 210 нм в спектре-4 занимает положение 215 нм.

Введение лимонной кислоты заметно изменяло кинетику концентрирования (Рисунок 5б). При смещении максимума полосы 540 нм в положение 535 нм снижалась выраженность полосы 490 нм и больше проявлялась слабая по интенсивности полоса 455 нм. В УФ области полоса 220 нм, заметно увеличивалась по интенсивности, в спектре последнего образца переходила в положение 210 нм, а полоса 205 нм при этом, снижаясь по интенсивности, последовательно смещалась в зону вакуумного ультрафиолета.

Добавление в систему аскорбиновой кислоты (Рисунок 5в) также существенно отражалось на кинетике концентрирования, отличаясь от кинетики концентрирования сока с одной лимонной кислотой по изменению интенсивности всех полос. Следует обратить внимание, во-первых, на то, что максимум 540 нм перешел в положение 535 нм, как и в спектрах последних концентратов сока с лимонной кислотой [21]. В данном случае также проявлялась полоса 455 нм и сглаживалась 490 нм. И, во-вторых, характер изменения интенсивности полос 215/265 нм и состава полос в области 205–215 нм в ходе процесса концентрирования. В спектре 1 в этой области имелась небольшая, несколько уширенная полоса 205 нм, которая через 5 минут концентрирования преобразовывалась в дублет 205/215 нм и снижалась по интенсивности. К 10 минутам интенсивность дублета возрастала, но через 15 минут дублет распадался. Полоса 215 нм сохраняла свое положение, а полоса 205 нм смещалась в область вакуумного ультрафиолета. Отмеченное указывает на то, что природа стабилизатора заметно сказывается не только на кинетике изменения содержания бетанина (Рисунок 1), но и на характере изменений в составе сопутствующих компонентов системы сока.

Исследования изменений в оптических характеристиках свекольного сока без стабилизатора и его концентратов при хранении (Рисунок 6) показали возможности метода электронной спектроскопии при контроле свойств бетанина, а также состояния сопутствующих и существенно преобладающих углеводно-протеиновых компонентов, претерпевающих заметные изменения.

При хранении свекольного сока без стабилизатора и его концентратов происходила деградация бетанина, что подтверждает резкое снижение интенсивности максимума его красной формы (535 нм) в спектрах образца-4 (Рисунок 6г). В данном эксперименте на при-

мере 4-х образцов свекольного сока без стабилизатора прослеживалось неоднозначное влияние их консистенции на скорость деградации бетанина.

Изменения в УФ части спектра позволили говорить о существенных разрушениях в общей системе свекольного сока при концентрировании. А также об увеличении скорости достижения равновесия, как в любой жидкой биологической системе, спонтанно стремящейся к энергетической стабильности с увеличением степени концентрирования. Неустойчивость состояния в системе первых двух концентратов сока (Рисунок 6б и Рисунок 6в) прослеживалась на протяжении всего срока хранения по хаотичности полос и фактуре самих спектральных кривых в данном регионе.

И совсем иную картину показал образец-4 на Рисунке 6 г. Четкий стабильный привычный спектр свекольного сока, который полностью изменял свой вид через 2 недели хранения. Полоса 215 нм смещалась в вакуумный ультрафиолет и формировалась интенсивная стабильная полоса с двумя максимумами — 240 и 250 нм и структурированной правой ветвью, в которой просматривались первые признаки проявления протеиновых конструкций. Признаки сахарозы при этом ретушировались образующимися протеиновыми агрегатами, но не исключено, что инициатором их образования являлась та же сахароза.

Данный эксперимент позволил установить влияние основного фактора — консистенции, на скорость и степень деградации бетанина и трансформацию вещественного состава свекольного сока без стабилизатора при хранении, которая задается временем концентрирования. Кроме того, было отмечено явно выраженное последовательное формирование в УФ области структурированной полосы 240–270 нм, имеющей протеиновую природу. Причем происходило это именно при хранении концентратов и не наблюдалось при концентрировании сока. Это позволило говорить о том, что при хранении в системе соков имеют место спонтанные преобразования протеиновых структур с укрупнением их глобул, характер которых определяется консистенцией концентрата.

Очень показателен стабилизирующий эффект обеих кислотных систем в отношении бетанина по сравнению со спектром сока без стабилизатора на протяжении всего срока хранения (Рисунок 7). Однако в УФ области стабилизация оптических свойств в обоих случаях была отмечена только через 2 месяца. Это проявлялось в формировании двух стабильных по положению полос — 215 и 265 нм, характерных для сахарозы (Рисунок 7б и Рисунок 7в).

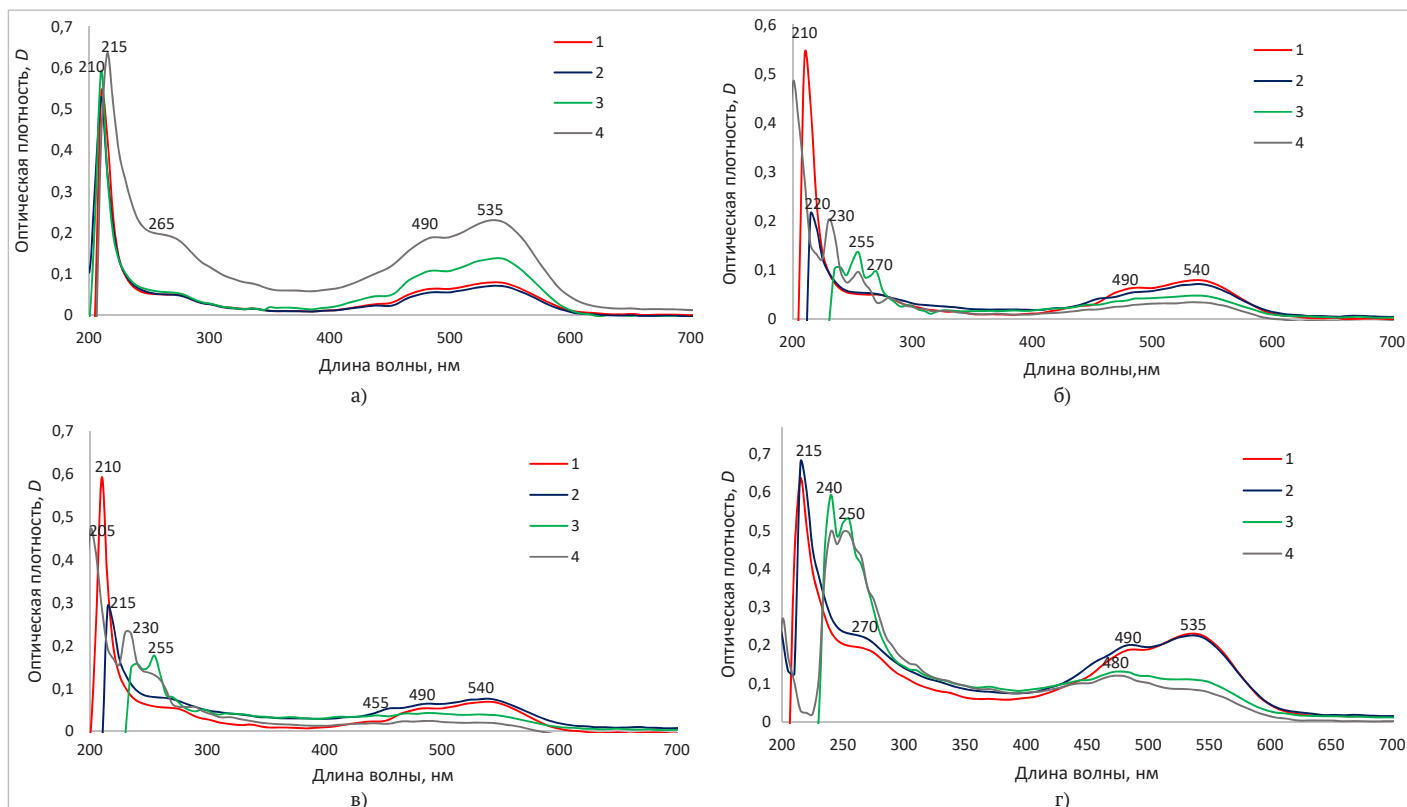


Рисунок 6. Электронные спектры свекольного сока без стабилизатора:

а) исходный, б) 5, в) 10, г) 15 минут концентрирования; 1 — 0, 2 — 1, 3 — 2, 4 — 4 недели хранения

Figure 6. Electronic spectra of beetroot juice without stabilizer: а) initial, б) 5, в) 10, г) 15 minutes of concentration; 1 — 0, 2 — 1, 3 — 2, 4 — 4 weeks of storage

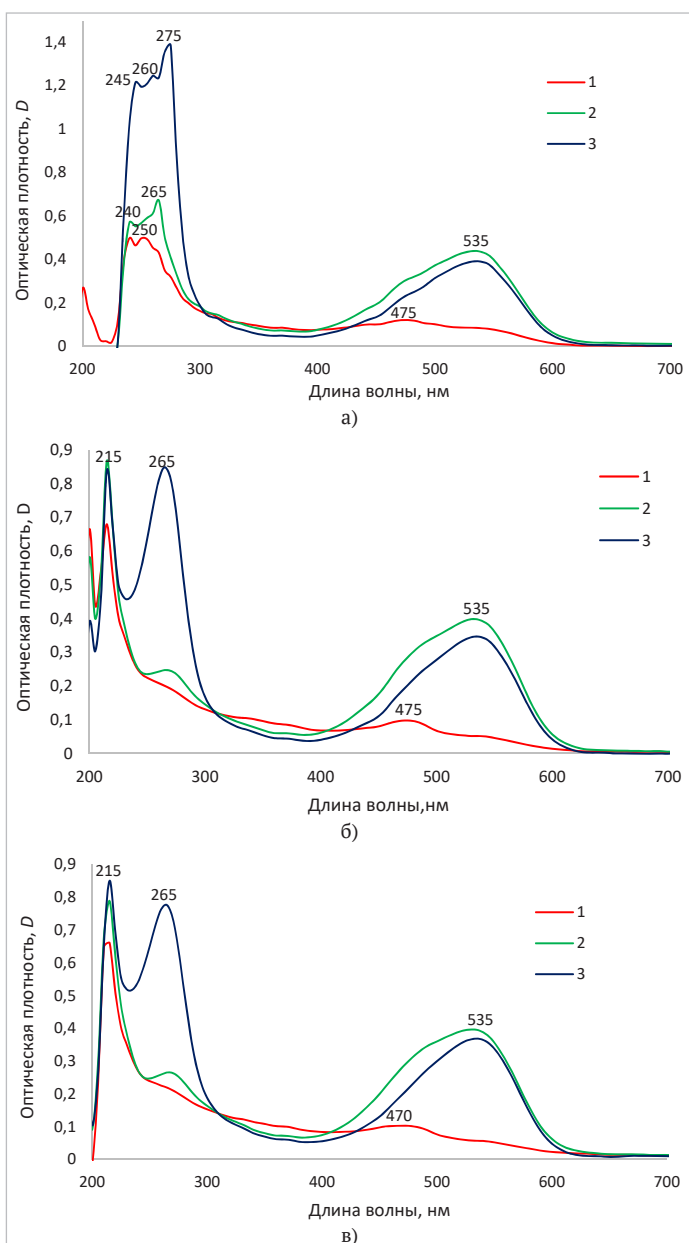


Рисунок 7. Электронные спектры концентратов (15 минут) свекольного сока через: а) один, б) два, в) четыре месяца хранения; 1 – без стабилизатора, 2 – с лимонной кислотой, 3 – с лимонной и аскорбиновой кислотами

Figure 7. Electronic spectra of beetroot juice concentrates (15 minutes) after: a) one, б) two, в) four months of storage; 1 – without stabilizer, 2 – with citric acid, 3 – with citric and ascorbic acids

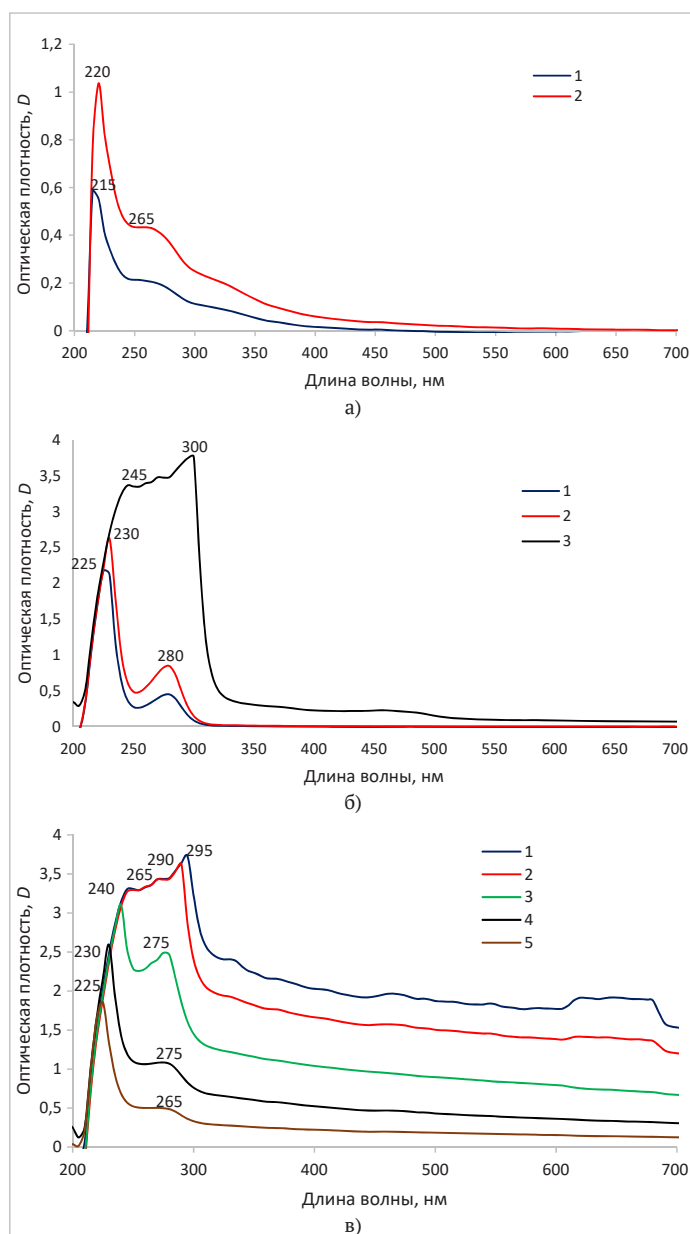


Рисунок 8. Электронные спектры растворов: а) сахарозы: 1 – 20, 2 – 40%; б) яичного белка: 1 – 0,5%, 2 – 1%, 3 – нативный яичный белок; в) яичного альбумина: 1 – 0,75; 2 – 0,50; 3 – 0,25; 4 – 0,125; 5 – 0,0625%

Figure 8. Electronic spectra of solutions: а) sucrose: 1 – 20, 2 – 40%; б) egg white: 1 – 0.5%, 2 – 1%, 3 – native egg white; в) egg albumin: 1 – 0.75; 2 – 0.50; 3 – 0.25; 4 – 0.125; 5 – 0.0625%

В спектрах всех рассматриваемых концентратов в УФ области (240–275 нм) через месяц хранения отмечались структурированные полосы. Их наличие говорит о проявленности электронных переходов в молекулах ароматических аминокислот протеиновых компонентов. Однако в течение последующего месяца хранения они исчезали. Отмеченный экспериментальный факт убедителен в иллюстрации серьезных нарушений в целом в системе компонентов свекольного сока в результате процесса концентрирования.

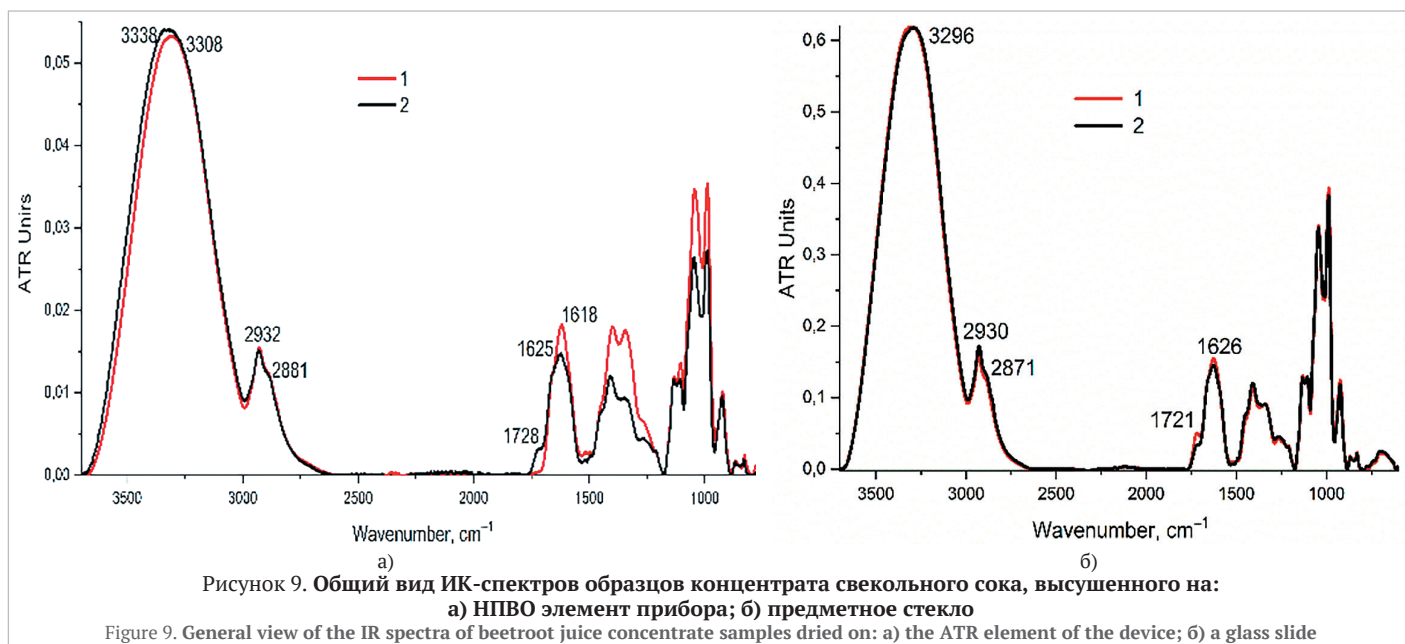
Электронные спектры вспомогательных веществ на Рисунке 8 способствовали визуализации процессов, имеющих место в биологической системе свекольного сока при его хранении. Электронные спектры растворов сахарозы (Рисунок 8а) показали небольшой bathochromный (215→220 нм) сдвиг основного максимума с увеличением концентрации, что соответствовало сдвигу максимума в спектрах при хранении концентратов исходного сока (Рисунки 6а, 6б и 6в) и его стабилизации в положении 215 нм в спектрах образца-4 (Рисунок 6г). Полоса 265 нм при этом, возрастала по интенсивности и сохраняла свое положение. На Рисунке 6 она наблюдалась только в спектрах сока, не подвергнувшегося концентрированию. Однако, как следует из спектров на Рисунке 7б и Рисунке 7в обе полосы –

215 и 265 нм присутствовали в спектрах обеих серий стабилизированного сока с увеличением срока хранения до 2–4 месяцев.

Спектры растворов яичного белка (Рисунок 8б) и яичного альбумина (Рисунок 8в) при низких концентрациях также показали в области дальнего ультрафиолета две полосы. Накладываясь на полосы в спектрах концентратов свекольного сока, они мешали идентификации. Стоит обратить внимание на контур широкого структурированного максимума интенсивной полосы в спектрах образцов высокой концентрации для обоих протеиновых объектов. Такого характера полосы наблюдались в спектрах концентратов (15 минут) всех трех исследуемых серий свекольного сока через месяц хранения (Рисунок 7а).

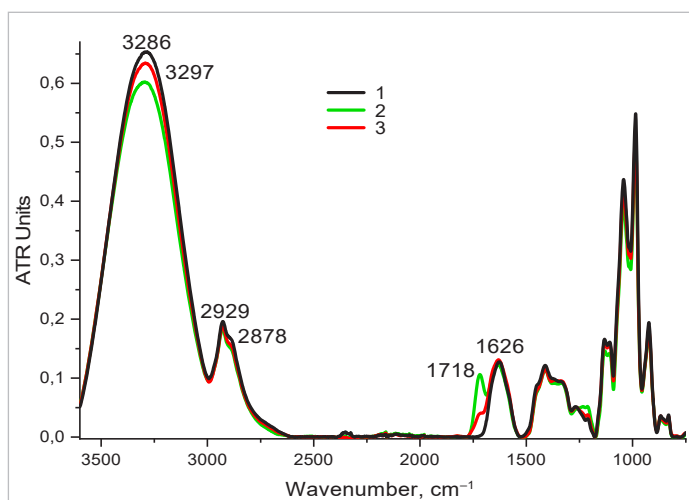
3.3. Фурье ИК-спектроскопия

Качество и информативность спектров в методе Фурье ИК-спектроскопии во многом определяется консистенцией образцов [21,23,39]. Для стандартизации условий их записи проведено сравнительное исследование двух способов сушки одного и того же образца концентрата свекольного сока: с использованием воздушной сушки на НПВО элементе прибора с привлечением микро-вентилятора и на предметном стекле при комнатной температуре.



Сопоставление спектров показало, что неполное удаление влаги (Рисунок 9а) по-разному отражается на ИК-спектрах образцов в зависимости от их состава, затрудняя интерпретацию. Более четкая проявленность всех полос, воспроизведение их фактуры в спектрах обоих образцов, указывающие на близость по свойствам, и увеличение интенсивности полос на порядок (в 10 раз) при сушке на предметном стекле (Рисунок 9б) послужили основанием для ее использования в эксперименте.

В отличие от электронной спектроскопии метод ИК-спектроскопии не позволил идентифицировать бетанин, содержащий в своей структуре молекулу глюкозы, на фоне высокого содержания сахаразы. На Рисунок 10 представлен общий вид ИК-спектров свекольного сока без стабилизатора и со стабилизаторами. На присутствие стабилизаторов указывает полоса 1718 см^{-1} C=O-группировок лимонной кислоты, заметно снижающаяся по интенсивности после добавления аскорбиновой кислоты. Высокочастотная область спектра ($3700\text{--}2800\text{ см}^{-1}$) в данном случае мало информативна. Здесь суммарно регистрируются гидроксильные группы, в том числе и молекул воды, и C-H_2 -группировки всех компонентов сложной системы свекольного сока. Высокое содержание сахаразы (до 80%), маскирующей любые проявления оптических свойств других составных частей сока, делает его спектр неинформативным. Полоса 1626 см^{-1} , принадлежащая деформационным колебаниям молекул воды, расположена в той же области, где традиционно регистрируются колебания протеиновых структур.



Фрагментирование полученных ИК-спектров и увеличение выделенных фрагментов (Рисунок 11) позволило увидеть доминирование спектрального образа сахаразы по всем ее ярко выраженным индивидуальным оптическим показателям в исходном соке (кр. 1) — дублиты полос $1135/1108$, $1044/988$, $868/831$ и полоса 924 см^{-1} (Рисунок 11а, и Рисунок 11б) [40,41]. На положение их максимумов по шкале волновых чисел не оказывало заметного влияния введение стабилизаторов (кр. 2 и 3), но оно проявлялось в изменении положения полос ($1375\text{--}1370\text{ см}^{-1}$) в составе дублета $1375/1335\text{ см}^{-1}$ (Рисунок 11в), также характерного для сахаразы.

Основные изменения спектральных характеристик сока при введении стабилизаторов наблюдались в диапазонах спектра, где могут проявляться колебания протеиновых компонентов. Это прежде всего область (Рисунок 11г) наиболее характерная для белковых (1631 , 1626 см^{-1}) и пептидных (1576 см^{-1}) структур. Слабо выраженное плечо 1654 см^{-1} на левой ветви центральной полосы может указывать на наличие фрагментов белковых структур α -спирального типа [42]. Более наглядно данную ситуацию иллюстрирует полоса $1268/1210\text{ см}^{-1}$ (Рисунок 11д) в спектре сока без стабилизатора, которая при добавлении лимонной кислоты уширяется с образованием структурированного максимума $1268/1233/1210\text{ см}^{-1}$. Это может говорить о частичной деструкции протеин-сахарозных агломератов с выделением как пептид-углеводных комплексов, так и возможных фосфолипид-углеводных образований ($1240\text{--}1230\text{ см}^{-1}$ [43]). Добавление аскорбиновой кислоты приводит к ее деструкции и формированию полосы очень близкой по фактуре полосе в соке без стабилизатора.

Характеристической полосой 1210 см^{-1} в данном диапазоне проявляла себя и сахараза, что иллюстрирует фрагмент «д» Рисунка 12. Здесь же (Рисунки 12а, 12б и 12в) наилучшим образом представлены и отчетливые выше типичные для сахаразы дублиты полос. Была отмечена симметричная полоса деформационных колебаний воды 1646 см^{-1} (Рисунок 12г), на обеих ветвях которой отсутствуют признаки протеиновых компонентов, как это наблюдалось в спектрах свекольного сока (Рисунок 11г).

Фрагменты ИК-спектров трех серий образцов свекольного сока в процессе концентрирования (Рисунок 13), показали непоследовательность в их расположении, хотя фактура основных полос при этом изменялась незначительно. Это говорит о разной степени устойчивости связей между компонентами системы к внешним воздействиям в процессе концентрирования.

Стабилизирующее влияние лимонной и аскорбиновой кислот при концентрировании лучше всего просматривалось по сохранению формы дублетов сахаразы $1375/1335\text{ см}^{-1}$ (фрагменты «б») и $868/831\text{ см}^{-1}$ (фрагменты «в») по сравнению с образцом свекольного сока без стабилизатора. А структуризация полосы 1628 см^{-1} (фрагменты «г»), где возможно проявление колебаний протеиновых структур, и некоторое увеличение ее интенсивности с введением стабилизаторов, могут указывать на меньшую устойчивость их связей в структуре свекольного сока с повышением кислотности. И здесь наглядно проявляется влияние природы стабилизаторов.

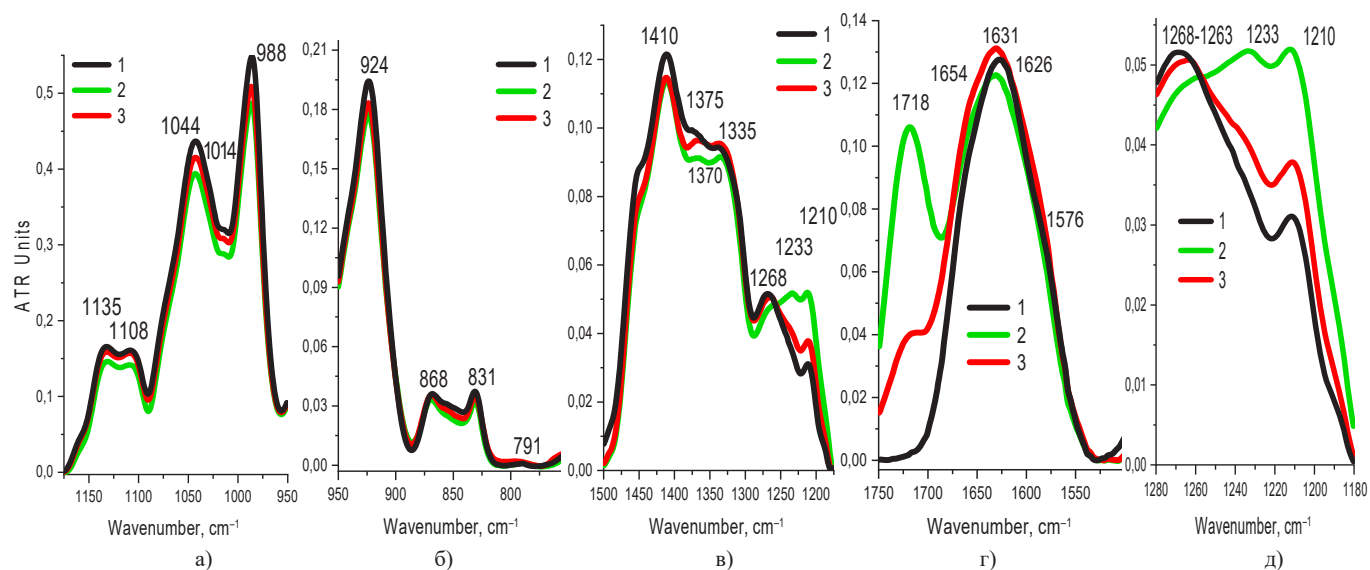


Рисунок 11. Фрагменты ИК-спектров свекольного сока: а) 1175–950, б) 950–750, в) 1500–1175, г) 1700–1560, д) 1280–1180 cm^{-1} ; 1 – без стабилизатора, 2 – с лимонной кислотой, 3 – с лимонной и аскорбиновой кислотами

Figure 11. Fragments of the IR spectra of beetroot juice: а) 1175–950, б) 950–750, в) 1500–1175, г) 1700–1560, д) 1280–1180 cm^{-1} ; 1 – without stabilizer, 2 – with citric acid, 3 – with citric and ascorbic acids

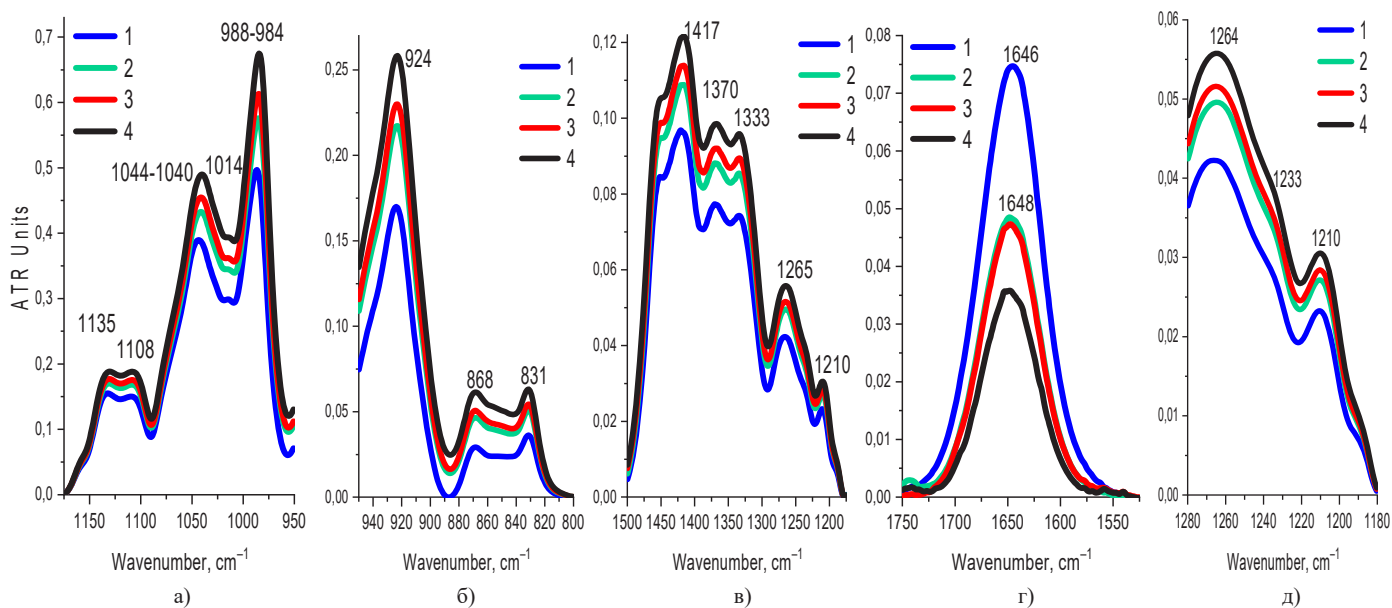
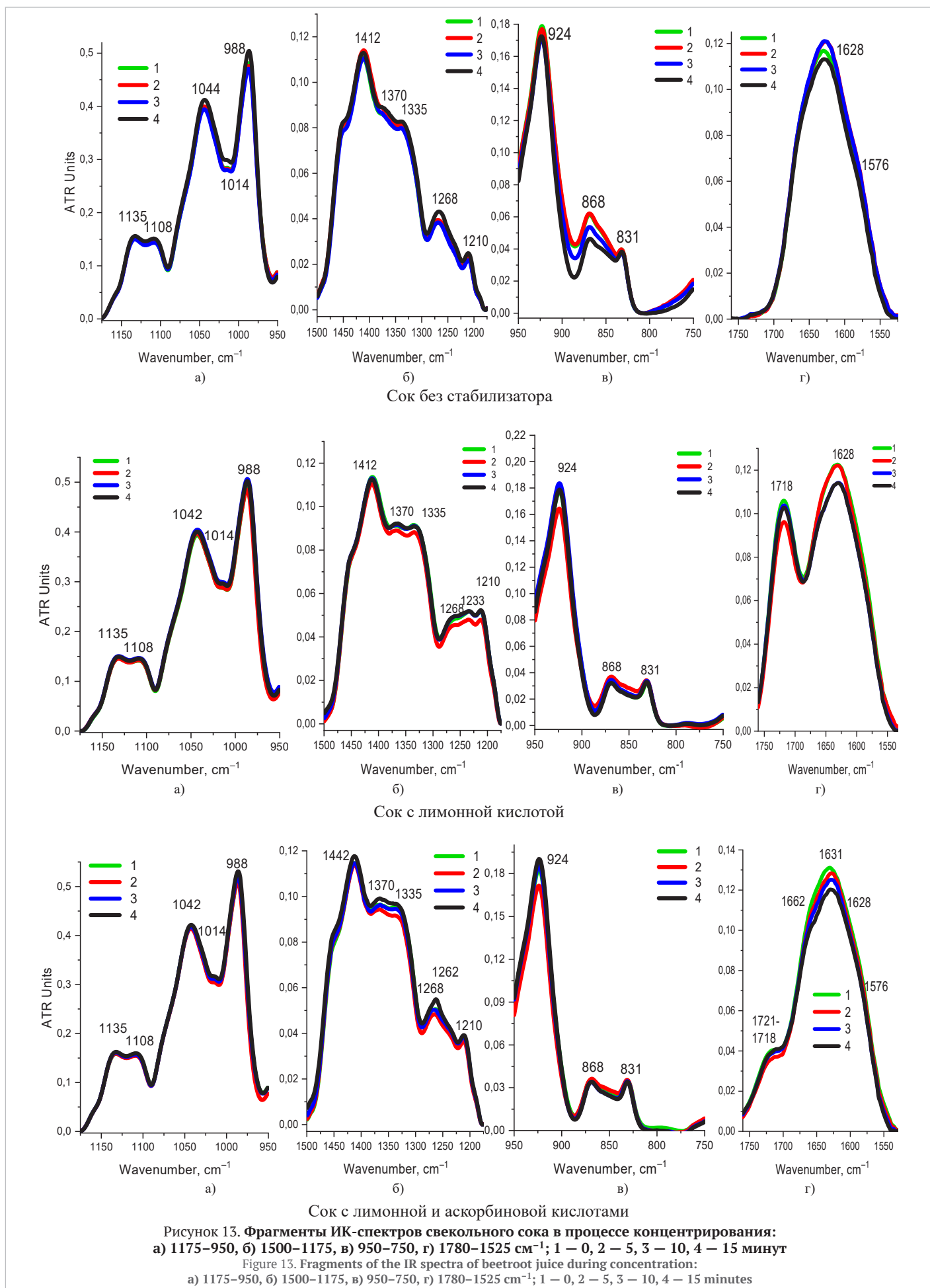


Рисунок 12. Фрагменты ИК-спектров растворов препарата сахарозы: 1–20, 2–40, 3–50, 4–60%; а) 1175–950, б) 950–750, в) 1500–1175, г) 1750–1500, д) 1280–1180 cm^{-1}

Figure 12. Fragments of the IR spectra of sucrose preparation solutions: 1–20, 2–40, 3–50, 4–60%; а) 1175–950, б) 950–750, в) 1500–1175, г) 1750–1500, д) 1280–1180 cm^{-1}



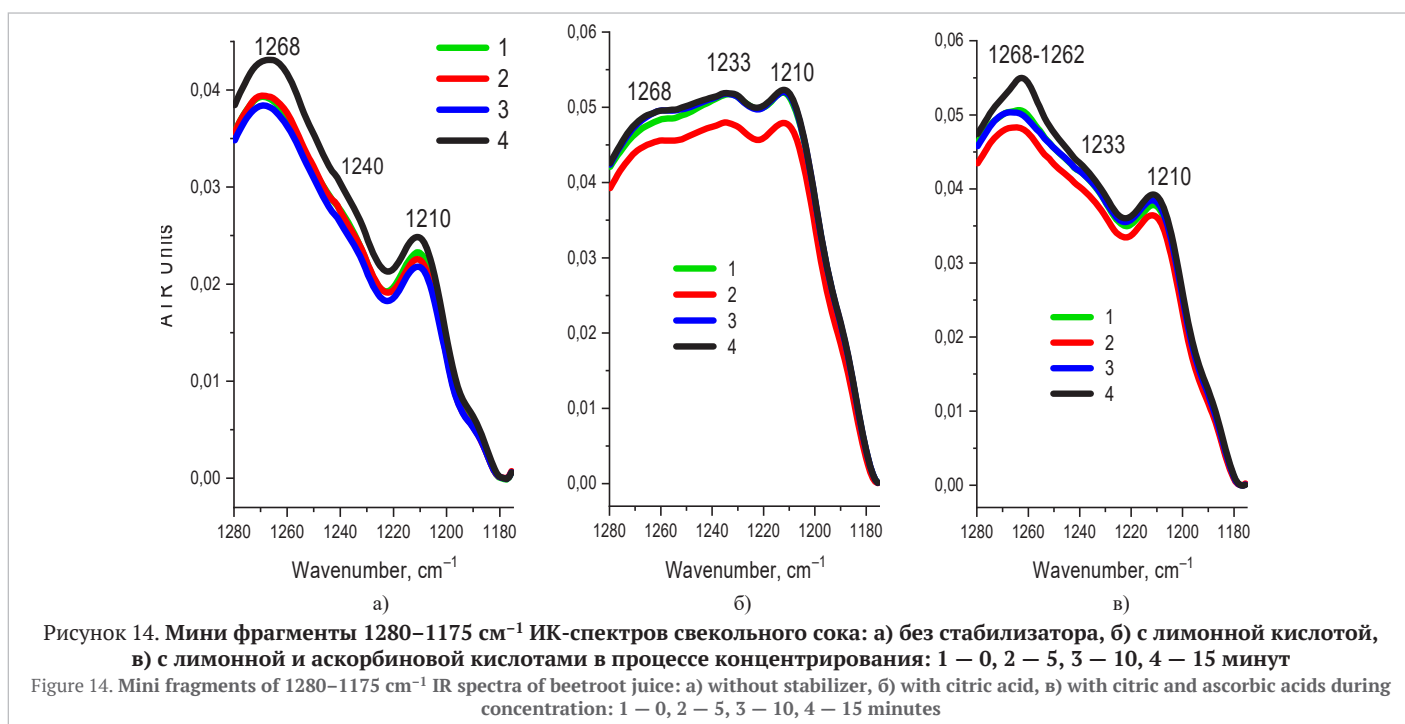


Рисунок 14. Мини фрагменты 1280–1175 cm^{-1} ИК-спектров свекольного сока: а) без стабилизатора, б) с лимонной кислотой, в) с лимонной и аскорбиновой кислотами в процессе концентрирования: 1 – 0, 2 – 5, 3 – 10, 4 – 15 минут

Figure 14. Mini fragments of 1280–1175 cm^{-1} IR spectra of beetroot juice: а) without stabilizer, б) with citric acid, в) with citric and ascorbic acids during concentration: 1 – 0, 2 – 5, 3 – 10, 4 – 15 minutes

Лучше всего об этом говорят мини фрагменты спектров 1280–1175 cm^{-1} на Рисунке 14, иллюстрируя различия в состоянии протеин-углеводной системы трех серий образцов свекольного сока, отмеченные выше (Рисунок 11д), и во всех случаях подчеркивая:

- разницу в оптических свойствах между системой, подвергнутой механическому воздействию (Рисунок 14а) и системами (Рисунок 14б и Рисунок 14в) после суммарного воздействия — кислотного и механического;
- ее качественную стабильность независимо от степени концентрирования образцов;
- роль аскорбиновой кислоты, снижающей реконструктивную эффективность лимонной кислоты;
- разницу в динамике концентрирования, которая достаточно хорошо прослеживается по относительному расположению и интенсивности кривых светопоглощения.

Рисунок 15, представляя фрагменты спектров последних концентратов (15 минут) трех серий образцов свекольного сока после хранения через 1, 2 и 4 месяца, не показал каких-либо существенных изменений в областях проявления характеристичных признаков сахарозы (фрагменты «а, б»), обусловленных колебаниями структурных элементов циклов глюкозы и фруктозы. Но позволил отметить некоторые изменения в положении ее функциональных группировок в дублете 1375/1335 cm^{-1} (фрагменты «в»), формы самого дублета, относительному расположению спектральных кривых в составе полосы 1412 cm^{-1} и смещении ее максимума в положение 1409 cm^{-1} через 4 месяца хранения образцов.

Сопоставляя фрагменты «г» Рисунков 13 и 15 были отмечены изменения как в форме, так и положении максимума основной полосы в спектрах всех образцов в процессе хранения, не наблюдавшиеся при концентрировании. Менее выражено, но аналогичный эффект имел место и на фрагментах «д» Рисунка 15 при сохранении общего контура спектральных кривых.

Данные проявления в изменении оптических свойств концентратов свекольного сока могут объясняться способностью биомолекул к спонтанной самоорганизации и трансформации в процессах структурной и энергетической стабилизации его системы в период хранения после ряда разрушительных механических и химических вмешательств. Причем в зависимости от вещественного состава системы [34,44,45] могут последовательно реализовываться разные естественные механизмы самоорганизации, влияя на динамику процесса ее стабилизации при хранении.

Однако при всех структурных преобразованиях в концентратах свекольного сока при хранении, стабилизирующее влияние введенных кислот хорошо визуализируют электронные спектры красителя на Рисунке 6.

4. Заключение

Комплексное исследование сока от плодов свеклы сорта «Бордо-237» двумя спектральными методами с контролем методами химического анализа позволило отметить:

- стабилизирующий эффект лимонной и смеси лимонной (0,25%) и аскорбиновой (0,25%) кислот на оптические свойства бетанина (535 нм) и систему концентратов свекольного сока в целом. Установлено, что использование смеси аскорбиновой и лимонной кислоты оказывает меньшее влияние на стабильность бетанина при концентрировании и холодильном хранении. Достаточным количеством использования стабилизатора в технологии бетанинодержающих концентратов является содержание 0,5% лимонной кислоты;
- различие в действии стабилизаторов более наглядно проявляется в реструктуризации протеин-фосфолипид-углеводных комплексов, составляющих основу системы свекольного сока. Выявлено, что уже через две недели холодильного хранения образца, стабилизированного лимонной кислотой и концентрированного в течение 15 минут, полоса 215 нм смещалась в вакуумный ультрафиолет. Формировалась интенсивная стабильная полоса с двумя максимумами — 240 и 250 нм и структурированной правой ветвью, в которой просматривались первые признаки проявления протеиновых конструкций. Признаки сахарозы при этом ретушировались образующимися протеиновыми агломератами. Установлено, что на скорость, степень деградации бетанина и трансформацию вещественного состава свекольного сока без стабилизатора при хранении влияет консистенция. Данный фактор является основным и определяется продолжительностью концентрирования. В УФ области при холодильном хранении концентратов отмечено явно выраженное последовательное формирование структурированной полосы 240–270 нм, имеющей протеиновую природу. Это позволило говорить о том, что имеют место спонтанные преобразования протеиновых структур с укрупнением их глобул, характер которых определяется консистенцией концентрата;
- вариabильность оптических свойств концентратов при хранении обусловлена естественными процессами спонтанной самоорганизации всех компонентов для структурной и энергетической стабилизации системы. Отмечено проявление природы кислой среды и консистенции образца, которые предопределяют механизм и скорость спонтанной самоорганизации сопутствующих биомолекул в процессах структурной стабилизации системы при хранении концентратов свекольного сока в течение 4-х месяцев;
- концентрирование на роторном испарителе в течение 15 минут при температуре $60 \pm 0,2$ °C и давлении 72 ± 10 мбар позволяет достичь продолжительности хранения концентратов при $4 \pm 0,5$ °C до 4 месяцев с 5% потерями красящего вещества — бетанина.

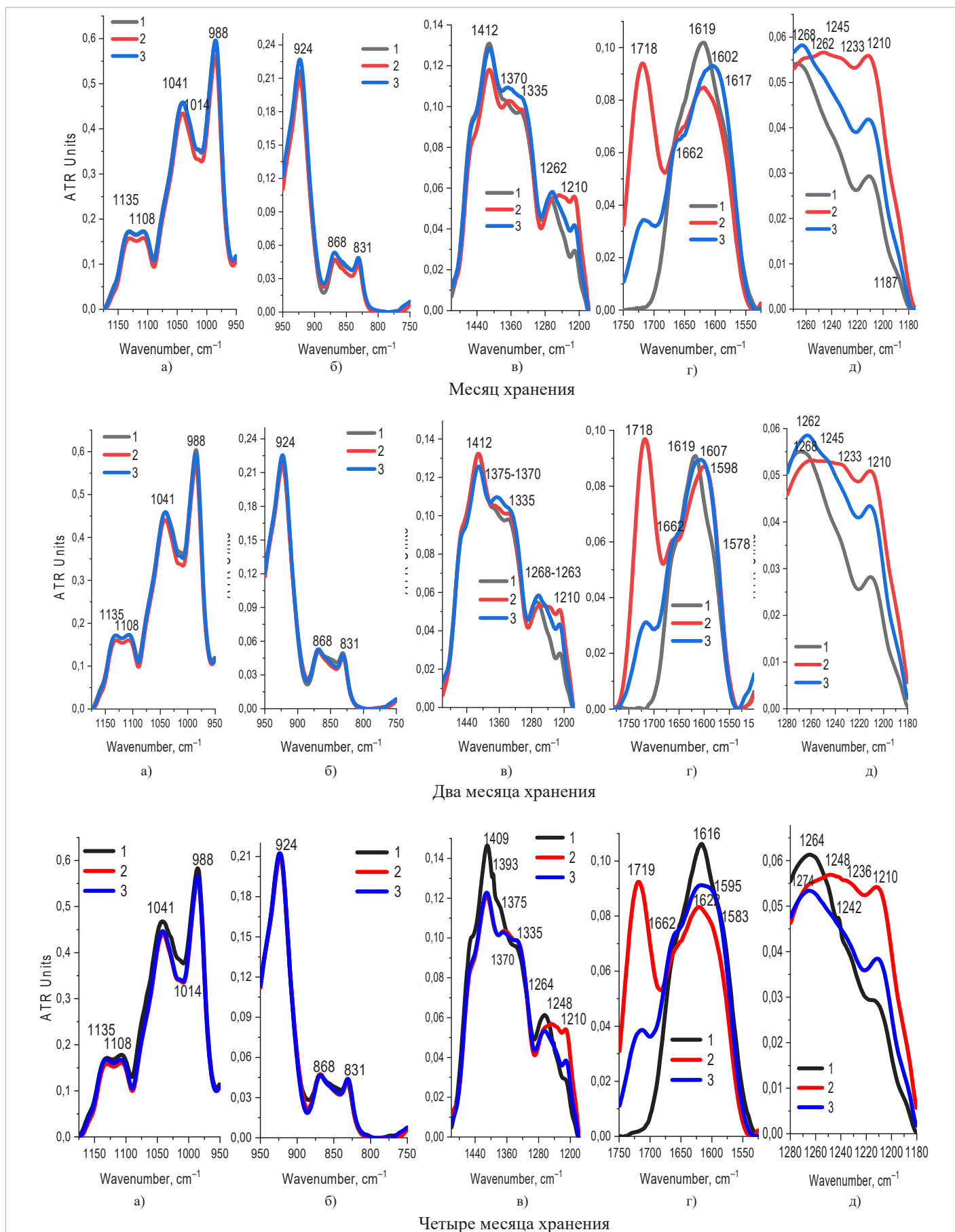


Рисунок 15. Фрагменты ИК-спектров концентратов (15 минут) свекольного сока: 1 – без стабилизатора, 2 – с лимонной кислотой, 3 – с лимонной и аскорбиновой кислотами после 4-х месяцев хранения; а) 1175–950, б) 950–750, в) 1500–1175, г) 1750–1500, д) 1280–1180 см⁻¹

Figure 15. Fragments of the IR spectra of beetroot juice concentrates (15 minutes): 1 – without stabilizer, 2 – with citric acid, 3 – with citric and ascorbic acids after 4 months of storage; а) 1175–950, б) 950–750, в) 1500–1175, г) 1750–1500, д) 1280–1180 cm⁻¹

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИ СПИСОК / REFERENCES

- Sangeeta, A., Barman, M., Mishra, P. (2025). Beverages and Concentrates. Chapter in a book: Fruits and Vegetables Technologies: Postharvest Processing and Packaging. Singapore: Springer Nature Singapore, 2025. https://doi.org/10.1007/978-981-96-8433-5_9
- Saini, A., Hamid, Shams, R., Dash, K. K., Shaikh, A. M., Kovács, B. (2025). Anthocyanin extraction from black carrot: Health promoting properties and potential applications. *Journal of Agriculture and Food Research*, 19, Article 101533. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101533>
- Li, B., Lee, J.-Y., Luo, Y. (2023). Health benefits of astaxanthin and its encapsulation for improving bioavailability: A review. *Journal of Agriculture and Food Research*, 14, Article 100685. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100685>
- Deshmukh, G. P., Priyanka, Sindhav, R., Jose, N. (2018). Application of beetroot as natural coloring pigment and functional ingredient in dairy and food products. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 7(12), 2010–2016. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2018.712.231>
- Saw, P. E., Lee, S., Jon, S. (2019). Naturally occurring bioactive compound-derived nanoparticles for biomedical applications. *Advanced Therapeutics*, 2(5), Article 1800146. <https://doi.org/10.1002/adtp.201800146>
- Küçüköğöz, K., Venema, K., Chamorro, F., Cassani, L., Donn, P., Prieto, M. A. et al. (2025). Unlocking the potential of fermented beetroot ketchup: Enhancing polyphenol recovery and gut microbiota interactions. *Food Chemistry*, 463 (Part 1), Article 141141. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.141141>
- Gengatharan, A., Dykes, G. A., Choo, W. S. (2015). Betalains: Natural plant pigments with potential application in functional foods. *LWT-Food Science and Technology*, 64(2), 645–649. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.06.052>
- Huang, D. (2018). Dietary antioxidants and health promotion. *Antioxidants*, 7(1), Article 9. <https://doi.org/10.3390/antiox7010009>
- Sawicki, T., Bączek, N., Wiczkowski, W. (2016). Betalain profile, content and antioxidant capacity of red beetroot dependent on the genotype and root part. *Journal of Functional Foods*, 27, 249–261. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2016.09.004>
- Czylkowska, A., Rogalewicz, B., Szczesio, M., Raducka, A., Gobis, K., Szymański, P. et al. (2022). Antitumor activity against A549 cancer cells of three novel complexes supported by coating with silver nanoparticles. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(6), Article 2980. <https://doi.org/10.3390/ijms23062980>
- Bhat, S. A., Chandramohan, S., Krishna, G. S., Hiranmaya, C., Pajaniradje, S., Nair, A. S. et al. (2024). Betanin-encapsulated starch nanoparticles: Synthesis and cytotoxic effect on colon cancer. *3 Biotech*, 14(10), Article 233. <https://doi.org/10.1007/s13205-024-04078-4>
- Yin, S., Yang, Y., Guo, T., Veeraraghavan, V. P., Wang, X. (2021). Potential chemotherapeutic effect of betalain against human non-small cell lung cancer through PI3K/Akt/mTOR signaling pathway. *Environmental Toxicology*, 36(6), 1011–1020. <https://doi.org/10.1002/etox.23100>
- Farabegoli, F., Scarpa, E. S., Frati, A., Serafini, G., Papi, A., Spisni, E. et al. (2017). Betalains increase vitexin-2-O-xyloside cytotoxicity in CaCo-2 cancer cells. *Food Chemistry*, 218, 356–364. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.09.112>
- Singh, T., Pandey, V. K., Dash, K. K., Zanwar, S., Singh, R. (2023). Natural bio-colorant and pigments: Sources and applications in food processing. *Journal of Agriculture and Food Research*, 12, Article 100628. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100628>
- Küçüköğöz, K., Venema, K., Trzaskowska, M. (2024). Beetroot ketchup as a stable carrier of potential probiotic *Lactisacibacillus rhamnosus* K3 and *Lactobacillus johnsonii* K4: A study on sensory attributes, storage viability, and *in vitro* gastrointestinal survival. *Food and Bioproducts Processing*, 148, 519–526. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2024.10.004>
- Hadipour, E., Taleghani, A., Tayarani-Najaran, N., Tayarani-Najaran, Z. (2020). Biological effects of red beetroot and betalains: A review. *Phytotherapy Research*, 34(8), 1847–1867. <https://doi.org/10.1002/ptr.6653>
- Madadi, E., Mazloum-Ravasan, S., Yu, J. S., Ha, J. W., Hamishehkar, H., Kim, K. H. (2020). Therapeutic application of betalains: A review. *Plants*, 9(9), Article 1219. <https://doi.org/10.3390/plants9091219>
- Amjadi, S., Abbasi, M. M., Shokouhi, B., Ghorbani, M., Hamishehkar, H. (2019). Enhancement of therapeutic efficacy of betanin for diabetes treatment by liposomal nanocarriers. *Journal of Functional Foods*, 59, 119–128. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2019.05.015>
- Di, S., Yu, M., Guan, H., Zhou, Y. (2021). Neuroprotective effect of Betalain against Aβ1-3-induced Alzheimer's disease in Sprague Dawley Rats via putative modulation of oxidative stress and nuclear factor kappa B (NF-κB) signaling pathway. *Biomedicine and Pharmacotherapy*, 137, Article 111369. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2021.111369>
- Wang, J., Zhang, D., Cao, C., Yao, J. (2020). Betalain exerts a protective effect against glaucoma is majorly through the association of inflammatory cytokines. *AMB Express*, 10(1), Article 125. <https://doi.org/10.1186/s13568-020-01062-y>
- Azizati-Ruggerio, L., Granados-Balbuena, S. Y., Zainos-Cuapio, Y., Ocaranza-Sánchez, E., Rojas-López, M. (2019). Analysis of the degradation of betanin obtained from beetroot using Fourier transform infrared spectroscopy. *Journal of Food Science and Technology*, 56(8), 3677–3686. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03826-2>
- Ahmadi, H., Nayeri, Z., Minucmehr, Z., Sabouni, F., Mohammadi, M. (2020). Betanin purification from red beetroots and evaluation of its anti-oxidant and anti-inflammatory activity on LPS-activated microglial cells. *PLoS One*, 15(5), Article e0233088. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0233088>
- Devadiga, D., Ahipa, T. N. (2020). Betanin: A Red-Violet Pigment — Chemistry and Applications. Chapter in a book: Chemistry and Technology of Natural and Synthetic Dyes and Pigments. IntechOpen, 2020.
- Hu, T., Dai, T., He, X., Deng, L., Li, T., Sun, J. et al. (2023). Non-covalent interaction of complex plant protein and betanin: Mechanism of improving thermal stability of betanin. *Food Hydrocolloids*, 138, Article 108456. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108456>
- Racz, C. -P., Racz, L. Z., Floare, C. G., Tomoaia, G., Horovitz, O., Riga, S. (2023). Curcumin and whey protein concentrate binding: Thermodynamic and structural approach. *Food Hydrocolloids*, 139, Article 108547. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108547>
- Janiszewska-Turak, E., Walczak, M., Rybak, K., Pobiega, K., Gniewosz, M., Woźniak, Ł. et al. (2022). Influence of fermentation beetroot juice process on the physico-chemical properties of spray dried powder. *Molecules*, 27(3), Article 1008. <https://doi.org/10.3390/molecules27031008>
- Murugesan, R., Orsat, V. (2012). Spray drying for the production of nutraceutical ingredients — A review. *Food and Bioprocess Technology*, 5(1), 3–14. <https://doi.org/10.1007/s11947-011-0638-z>
- Koshani, R., Jafari, S. M. (2019). Ultrasound-assisted preparation of different nanocarriers loaded with food bioactive ingredients. *Advances in Colloid and Interface Science*, 270, 123–146. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2019.06.005>
- Martínez-Sánchez, A., Tarazona-Díaz, M. P., García-González, A., Gómez, P. A., Aguayo, E. (2016). Effect of high-pressure homogenization on different matrices of food supplements. *Food Science and Technology International*, 22(8), 708–719. <https://doi.org/10.1177/1082013216642887>
- Nagai, R., Nagai, M., Shimasaki, S., Baynes, J. W., Fujiwara, Y. (2010). Citric acid inhibits development of cataracts, proteinuria and ketosis in streptozotocin (type 1) diabetic rats. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 393(1), 118–122. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2010.01.095>
- Yadikar, N., Ahmet, A., Zhu, J., Bao, X., Yang, X., Han, H. et al. (2022). Exploring the mechanism of citric acid for treating glucose metabolism disorder induced by hyperlipidemia. *Journal of Food Biochemistry*, 46(12), Article e14404. <https://doi.org/10.1111/jfbc.14404>
- Miyagawa, Y., Fujita, H., Adachi, S. (2021). Kinetic analysis of thermal degradation of betanin at various pH values using deconvolution method. *Food Chemistry*, 361, Article 150165. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.150165>
- Trishitman, D., Negi, P. S., Rastogi, N. K. (2021). Concentration of beetroot juice colorant (betalains) by forward osmosis and its comparison with thermal processing. *LWT*, 145, Article 111522. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111522>
- Bazaria, B., Kumar, P. (2016). Compositional changes in functional attributes of vacuum concentrated beetroot juice. *Journal of Food Processing and Preservation*, 40(6), 1215–1222. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12705>
- Theba, T., Nayi, P., Ravani, A. (2024). Beetroot-based blended juice: Process development, physico-chemical analysis and optimization of novel health drink. *Food Chemistry Advances*, 4, Article 100607. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2024.100607>
- Monono, E. M., Wiesenborn, D. P., Vargas-Ramirez, J. M., Zhou, R. (2019). Preserving juice from industrial beets using organic acids. *Transactions of the ASABE*, 62(1), 177–185. <https://doi.org/10.13031/trans.13051>
- Thippeswamy, B., Joshi, A., Sethi, S., Dahuja, A., Kaur, C., Tomar, B. S. et al. (2022). Chemical additives for preserving the betalain pigment and antioxidant activity of red beetroot. *Sugar Tech*, 24(3), 890–899. <https://doi.org/10.1007/s12355-021-01104-0>
- York, J. L., Roberts, M. P. (1976). The iron and subunit binding sites of hemerythrin. The role of histidine, tyrosine and tryptophan. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Protein Structure*, 420(2), 265–278. [https://doi.org/10.1016/0005-2795\(76\)90318-4](https://doi.org/10.1016/0005-2795(76)90318-4)
- Pawade, S. S., Vilbaste, M., Siiman, A., Toom, L., Herodes, K., Leito, I. (2026). A quantitative approach to determine water and moisture content of different types of lignin using attenuated total reflectance Fourier transform infrared spectroscopy combined with partial least squares regression. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, Early View. <https://doi.org/10.1002/bbb.70124>
- Cengiz, M. F., Durak, M. Z. (2019). Rapid detection of sucrose adulteration in honey using Fourier transform infrared spectroscopy. *Spectroscopy Letters*, 52(5), 267–275. <https://doi.org/10.1080/00387010.2019.1615957>
- Wang, J., Kliks, M. M., Jun, S., Jackson, M., Li, Q. X. (2010). Rapid analysis of glucose, fructose, sucrose, and maltose in honeys from different geographic regions using Fourier transform infrared spectroscopy and multivariate analysis. *Journal of Food Science*, 75(2), C208–C214. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2009.01504.x>
- Barth, A., Zscherp, C. (2002). What vibrations tell about proteins. *Quarterly Reviews of Biophysics*, 35(4), 369–430. <https://doi.org/10.1017/S0033583502003815>
- Barčot, O., Balarin, M., Gamulin, O., Ježek, D., Romac, P., Brnjac-Kraljević, J. (2007). Investigation of spermatozoa and seminal plasma by fourier transform infrared spectroscopy. *Applied Spectroscopy*, 61(3), 309–313. <https://doi.org/10.1366/000370207780220804>
- Zannou, O., Oussou, K. F., Chabi, I. B., Odouaro, O. B. O., Deli, M. G. E. P., Goksen, G. et al. (2024). A comprehensive review of recent development in extraction and encapsulation techniques of betalains. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(30), 11265–11280. <https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2235695>
- Nemzer, B., Pietrzkowski, Z., Spórna, A., Stalica, P., Thresher, W., Michałowski, T. et al. (2011). Betalainic and nutritional profiles of pigment-enriched red beet root (*Beta vulgaris* L.) dried extracts. *Food Chemistry*, 127(1), 42–53. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.12.081>

| СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ | AUTHOR INFORMATION |
|---|---|
| Принадлежность к организации | Affiliation |
| Кудинов Роман Евгеньевич — аспирант, факультет биотехнологий, Университет ИТМО 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр-т, д. 49, лит. А E-mail: k1d.kudinov@yandex.ru ORCID: http://orcid.org/0009-0009-2076-4087 * автор для контактов | Roman E. Kudinov , Postgraduate Student, Faculty Biotechnology, ITMO University Kronverksky Pr. 49, bldg. A, St. Petersburg, Russia, 197101 E-mail: k1d.kudinov@yandex.ru ORCID: http://orcid.org/0009-0009-2076-4087 * corresponding author |
| Кременевская Марианна Игоревна — доктор технических наук, доцент, факультет биотехнологий, Университет ИТМО 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр-т, д. 49, лит. А E-mail: Marianna.Kremenevskaya@mail.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7021-8772 | Marianna I. Kremenevskaya , Doctor of Technical Sciences, Docent, Faculty of Biotechnology, ITMO University Kronverksky Pr. 49, bldg. A, St. Petersburg, Russia, 197101 E-mail: Marianna.Kremenevskaya@mail.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7021-8772 |
| Ситникова Вера Евгеньевна — кандидат химических наук, доцент, центр химической инженерии, Университет ИТМО 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр-т, д. 49, лит. А E-mail: v.e.sitnikova@gmail.com ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4753-976X | Vera E. Sitnikova , Candidate of Chemical Sciences, Docent, Center for Chemical Engineering, ITMO University Kronverksky Pr. 49, bldg. A, St. Petersburg, Russia, 197101 E-mail: v.e.sitnikova@gmail.com ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4753-976X |
| Федоров Александр Валентинович — доктор технических наук, доцент, факультет биотехнологий, Университет ИТМО 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр-т, д. 49, лит. А E-mail: alval58@yandex.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0003-0030-3848 | Alexandr V. Fedorov , Doctor of Technical Sciences, Docent, Faculty of Biotechnology, ITMO University Kronverksky Pr. 49, bldg. A, St. Petersburg, Russia, 197101 E-mail: alval58@yandex.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0003-0030-3848 |
| Критерии авторства | Contribution |
| Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат. | Authors equally relevant to the writing of the manuscript, and equally responsible for plagiarism. |
| Конфликт интересов | Conflict of interest |
| Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. | The authors declare no conflict of interest. |