

Научная статья

УДК 664.87:535.6

DOI: 10.17586/2310-1164-2025-18-3-12-26

Комплексное исследование оптических свойств бетанина и свекольного сока в процессах стабилизации, концентрирования, сбраживания и хранения

Р.Е. Кудинов^{1*}, М.И. Кременевская¹, В.Е. Ситникова¹, А.В. Федоров^{2,1}

¹Университет ИТМО, Россия, Санкт-Петербург

²ВНИИЖиров, Россия, Санкт-Петербург

*k1d.kudinov@yandex.ru

Аннотация. Методами химического анализа, спектрофотометрии и Фурье ИК-спектроскопии проведено комплексное исследование свекольного сока, полученного из корнеплодов свеклы Бордо-237. Оценивали влияние стабилизатора (лимонная кислота) на содержание, устойчивость бетанина и на оптические свойства системы в целом концентратов исходного и стабилизированного сока при хранении ($4 \pm 0,5^\circ\text{C}$) в течение двух месяцев. Изучали влияние ферментации свекольного сока хлебопекарными дрожжами (1–3%) на содержание бетанина и оптические свойства стабилизированного сока в процессах брожения, последующего концентрирования и хранения. Отмечено, что с введением лимонной кислоты, наряду со стабилизацией красной формы бетанина (535 нм), наблюдается деструкция протеин-сахарозных агломератов с формированием новых явно выраженных более мелких пептид-сахарозных образований, стабильных при хранении. Согласно данным спектрофотометрии, сбраживание и концентрирование стабилизированного сока не оказывает заметного влияния на оптические свойства и содержание бетанина, но последующее хранение приводит к его изоморфизму, а содержание желто-оранжевой формы (470 нм) существенно зависит от количества введенных дрожжей, снижаясь по мере их увеличения в системе. Метод Фурье ИК-спектроскопии проиллюстрировал деструкцию сахарозы при сбраживании и неоднозначность этого процесса в зависимости от содержания дрожжей, а также структурную стабилизацию в новой глюкозо-фруктозной системе сока при концентрировании и хранении, нивелирующую это различие.

Ключевые слова: производство пищевых концентратов; пищевые красители; оптические свойства; бетанин; свекольный сок

Благодарность: авторы выражают благодарность д-ру хим. наук, профессору А.П. Нечипоренко за помощь в интерпретации спектральных данных в исследованиях по Фурье ИК спектроскопии

Original article

Optical properties of betanin and beet juice in the processes of stabilization, concentration, fermentation and storage: comprehensive study

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

¹ITMO University, St. Petersburg, Russia

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

*k1d.kudinov@yandex.ru

Abstract. Using chemical analysis, spectrophotometry, and Fourier IR spectroscopy, a comprehensive study was conducted on beet juice obtained from Bordeaux-237 beet roots. The study focused on evaluating the impact of the stabilizer (citric acid) on the content, stability, and optical properties of the original and stabilized juice concentrates during storage ($4 \pm 0.5^\circ\text{C}$) for two months. We studied the effect of fermentation of beet juice with baker's yeast (1–3%) on the betanin content and optical properties of stabilized juice during fermentation, subsequent concentration, and storage. It has been found that with the introduction of citric acid, along with the stabilization of the red form of betanin (535 nm), there is a destruction of protein-sucrose agglomerates with the formation of new, clearly seen smaller peptide-sucrose formations that are stable during storage. According to spectrophotometry data, fermentation and concentration of stabilized juice do not have a significant effect on the optical properties and content of betanin, but subsequent storage leads to its isomorphism, and the content of the yellow-orange form (470 nm) significantly depends on the amount of yeast introduced, decreasing as the yeast concentration increases in the system. The Fourier IR spectroscopy method allowed us to illustrate the destruction of sucrose during fermentation and the ambiguity of this process depending on the yeast content. It also demonstrated the structural stabilization of the new glucose-fructose juice system during concentration and storage, which eliminates this difference.

Keywords: production of food concentrates; food dyes; optical properties; betanin; beet juice

Acknowledgments: the authors are deeply grateful to the D. Sci. (Chem.), Professor A.P. Nechiporenko for help in conducting research on Fourier IR spectrometry

Введение

В последние десятилетия заметно возрос интерес к красной пищевой свекле обыкновенной (*Beta vulgaris*), ее соку и пигменту – красному свекольному (бетанин), сертифицированному как натуральная пищевая добавка Е-162, и разрешенному к использованию в производстве широкого спектра пищевых продуктов (мороженое, помадки, кондитерские изделия, безалкогольные напитки, джемы, желе, кисломолочные продукты, десерты, мясная продукция и др.) для придания им привлекательного вида, цветового разнообразия, восстановления природной окраски, утраченной в процессе производства и (или) хранения, окрашивания бесцветных продуктов [1, 2]. Однако окраску свекольного сока обуславливает комплекс пигментных веществ – беталаинов, в котором большая доля (70–95%) принадлежит бетанину (бетанидин-5-О-β-D-глюкопиранозид), углеводная часть молекулы которого представлена β-пиранозной формой глюкозы. Ученые различают две группы беталаиновых пигментов: бетацианины и бетаксантины. Бетаксантины – пигменты, которые обуславливают желто-оранжевую окраску, к этой группе относят вульгаксантин, портулаксантин, индиксантин. Бетацианины придают фиолетово-красный цвет – бетанин, амарантин, изобетанин и значительно в большей степени и широко применяются в пищевой промышленности [3, 4].

Натуральным природным красителям, выделенным из растительных или животных источников, определяющим внешний вид пищевой продукции, принадлежит одно из важнейших мест в большинстве технологических процессов ее производства, поскольку в них содержатся биологически активные, вкусовые и ароматические вещества, придающие продуктам не только привлекательный вид, но и естественный аромат, вкус и дополнительную пищевую ценность.

Достоинство беталаинов красной свеклы обусловлено не только природной натуральностью, экономичностью сырья, возможностью получать гамму пигментов от фиолетово-красного до желто-оранжевого цвета, но и ярко выраженными противовоспалительными и антиоксидантными свойствами, что вызывает интерес к ним не только при производстве продуктов питания, но и в фармацевтической и косметической промышленности [5–8]. К настоящему времени идентифицировано 78 различных беталаинов в 17 семействах растений вида гвоздикоцветных (*Caryophyllales*) и некоторых высших грибах [9]. Но наиболее изучены беталаины красной свеклы, амаранта, красной питайи, опунции, кактусовой груши.

Как показал ряд модельных и клинических исследований последних лет, беталаины являются биологически активными соединениями с высоким терапевтическим потенциалом и широким спектром действия [9–11]: снижают риск онкологических [12], сердечно-сосудистых заболеваний [13, 14], выраженность нейродегенеративных расстройств при болезнях Альцгеймера и Паркинсона [9, 15], защищают от окислительных повреждений нейроны головного мозга, эффективны в коррекции метаболических нарушений при глаукоме [16], сахарном диабете II-го типа и ожирении [17, 18]. Однако ряд авторов [9, 19, 20] считает, что на сегодняшний день биологические свойства беталаинов еще недостаточно полно изучены для анализа их лечебно-профилактических возможностей в практической медицине, фармацевтике, диетологии.

Кроме того, применение беталаинов ограничено их низкой стабильностью – как и многие антиоксиданты они чувствительны к теплу, свету и кислороду, которые вызывают их деградацию уже при сборе, хранении и начальной переработке беталаинсодержащего сырья. В связи с этим подчеркивается важность и актуальность разработки новых щадящих технологических приемов, обеспечивающих сохранность полезных свойств беталаинов [21].

На недостаточность информации о свойствах бетанина и беталаинов в целом указывает и активизация исследований свекольного сырья разного происхождения, показавших связь между содержанием бетанина и его изоформ в зависимости от сортности материала, географического происхождения, погодных и климатических условий, влажности, минералогического состава почвы, подкормки, времени сбора, условий выращивания и хранения [22–24]. Кроме того, дополнительное влияние на качество свекольного сока, его концентратов и пигментов, полученных из разного сырьевого материала, зависит от технологии производства, концентрирования, сушки, используемого оборудования, температурного режима, метода и степени очистки, стабилизации, консистенции (жидкость, паста, сухой порошок), условий и времени хранения [25–28]. Однако в любом случае

содержание пигментных веществ в конечной продукции относительно невелико – от доли процента до 1,0–1,5%. Количество других компонентов – белковых, углеводных, пектиновых, липидных, органических кислот, минеральных солей и т. д. – может в несколько раз превышать содержание пигментов. Не представляя опасности для здоровья, а часто будучи и полезны, своим присутствием они снижают интенсивность окрашивания и цвет готового продукта. В ряде случаев существенным недостатком сока красной свеклы является довольно высокое содержание сахара. Для его устранения предлагается проводить предварительную ферментацию с использованием дрожжей [29, 30].

Следует отметить не только недостаточность привлечения современных инструментальных методов, но и практически отсутствие данных по их апробированию к исследованиям в данной области. Анализ научной литературы показал, что арсенал исследователей представлен в основном традиционными подходами, используемыми технологами, – методами хроматографии и спектрофотометрии [25, 31, 32]. Из большинства современных универсальных инструментальных способов, таких как атомно-абсорбционная спектроскопия, масс- и ЯМР-спектроскопия [33, 34], длительных по времени и связанных со сложными процедурами пробоподготовки образцов к анализу, наибольший интерес представляют экспресс-методы Рамановской и Фурье ИК-спектроскопии, не требующие предварительной подготовки анализируемого материала при его минимальном количестве [25, 35, 36].

Цель данной работы – комплексное исследование методами химического анализа, электронной и Фурье ИК-спектроскопии влияния на оптические свойства бетанина и систему свекольного сока в целом таких технологических процессов, как стабилизация, концентрирование, сбраживание и хранение.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования являлись образцы исходного и стабилизированного лимонной кислотой свекольного сока, их концентраты и образцы стабилизированного сока, сброженные в течение 48 ч хлебопекарными дрожжами с последующим концентрированием (таблица). Все образцы исследовались на изменение содержания бетанина и оптических свойств при хранении в течение двух месяцев при температуре $4 \pm 0,5^\circ\text{C}$.

Таблица. Содержание бетанина в исследуемых образцах свекольного сока

Table. The content of betanin in the beet juice samples under study

Образец	Процессы	Содержание бетанина, %			
		количество вносимых дрожжей			
		0%	1%	2%	3%
Сок без стабилизатора					
1	исходный сок	0,098	–	–	–
2	концентрирование (15 мин)	0,21	–	–	–
3	хранение концентрата 2 месяца	0,05	–	–	–
Сок, стабилизированный лимонной кислотой					
4	исходный стабилизированный сок	0,098	–	–	–
5	концентрирование (15 мин)	0,40	–	–	–
6	хранение концентрата 2 месяца	0,39	–	–	–
7	сбраживание сока 48 ч	0,061	0,071	0,069	0,068
8	хранение 7 дней	0,058	0,053	0,056	0,057
9	концентрирование сброженного сока	0,286	–	0,927	0,803

Для получения сока использованы корнеплоды столовой свеклы сорта Бордо-237, выращенные в юго-западном регионе Ленинградской области в 2024 г., которые хранились в течение шести месяцев при температуре $4\text{--}6^\circ\text{C}$. Диаметр корнеплодов 6–10 см без видимых повреждений. Сок ($\text{pH} = 6,20$) получали с использованием соковыжималки (Moulinex, Франция) при скорости вращения ротора $n = 12000$ об/мин, фильтрацию – с помощью вакуумного электронасоса (Value VE215N, Китай) производительностью 42 л/мин и сита (0,1 мм).

Стабилизацию бетанина осуществляли 0,5% содержанием в соке лимонной кислоты ($\text{pH} = 4,55$). Концентрат исходного свекольного сока получали на ротационном испарителе марки IKA RV10 (IKA, Германия) при давлении 72 мбар и температуре 60°C в течение 15 мин. Для сбраживания свекольного

сока в течение двух суток при комнатной температуре применяли хлебопекарные прессованные дрожжи Люкс экстра (ООО «САФ-НЕВА», Россия) в количестве 1, 2 и 3%.

Содержание бетанина (С, %) в 0,1% растворах образцов сока (таблица) определяли методом спектрофотометрии с использованием спектрофотометра UNICO 2100 (United Products & Instruments, США) согласно Техническому регламенту таможенного союза 029/2012 «Требования безопасности пищевых добавок, ароматизаторов и технологических вспомогательных средств» (Приложение 28) при длине волны $\lambda = 535$ нм.

Оптические свойства образцов свекольного сока в процессах стабилизации, концентрирования, сбраживания и хранения исследовали методами электронной и Фурье ИК-спектроскопии. Для записи электронных спектров 0,1% растворов сока в кварцевых кюветах с длиной оптического пути 1,0 см использовали спектрофлуориметр СМ 2203 (Беларусь).

Колебательные спектры (32 скана) образцов свекольного сока и его концентратов, высушенных на предметных стеклах при комнатной температуре, получали на Фурье-спектрометре Tensor 37 (Bruker, Германия) с алмазным НПВО элементом, управляемым программным пакетом OPUS со стандартными градуировочными возможностями в диапазоне частот $4000-600$ см⁻¹ в формате поглощения. Полученные результаты обрабатывались в программе Origin.

Результаты и их обсуждение

Как следует из таблицы, введение лимонной кислоты в свекольный сок не оказывает заметного влияния на содержание в нем бетанина. Однако в два раза более высокое его содержание в составе концентрата с лимонной кислотой является убедительным свидетельством ее стабилизирующей роли не только в процессе концентрирования, но и при хранении в течение двух месяцев. На это указывает и резкое снижение бетанина при хранении сока без консерванта.

Сбраживание образца 4 и последующее его недельное хранение привело к заметному снижению концентрации бетанина. Его количество существенно возросло в образце 9 с 1% дрожжей, в 17,4 раза, но было ниже (14 раз) с 3% дрожжей.

Исследование методом электронной спектроскопии оптических свойств свекольного сока в УФ и видимой областях (рисунок 1а) показало в спектре образца 1 наличие широкой полосы с максимумами, характерными для красной формы бетанина (535 нм) и его оранжево-желтой изоформы – бетаксантина (490 нм). Введение стабилизатора привело к небольшому увеличению содержания бетанина со смещением максимума в положение 540 нм и появлению новой полосы 455 нм в образце 4, что указывает на изменения в изоморфном составе красителя.

Однако более заметная трансформация спектра наблюдалась в области дальнего ультрафиолета. Введение в образец 1 лимонной кислоты привело к резкому снижению интенсивности полосы 210 нм и ее дифференциации на две – 205 и 220 нм, практически не влияя на интенсивность слабо выраженной полосы 265 нм. Следует отметить, что в данном случае УФ-область мало информативна, поскольку в ней, накладываясь и маскируя друг друга, могут проявляться полосы протеиновых (белки, пептиды) и углеводных компонентов (сахароза, глюкоза, фруктоза) [37, 38], а также стабилизатора.

Как показывают фрагменты рисунка 1б, концентрирование (образец 2) исходного сока привело к увеличению интенсивности с сохранением фактуры и положения дублета полос 535/490 нм в его спектре. В образце 3 при общем снижении спектра практически исчезла полоса бетанина, что указывает на деградацию красителя, а появление полосы 475 нм – на трансформацию его изоморфной системы. Введение лимонной кислоты заметно изменило кинетику концентрирования (рисунок 1в) и фактуру основной полосы в спектре образца 5 – при смещении максимума 540 нм в положение 535 нм снижается выраженность полосы 490 нм. Но все изменения в оптических свойствах, произошедшие в результате процесса концентрирования, сохранялись в образце 6, хотя несколько терялось содержание бетанина.

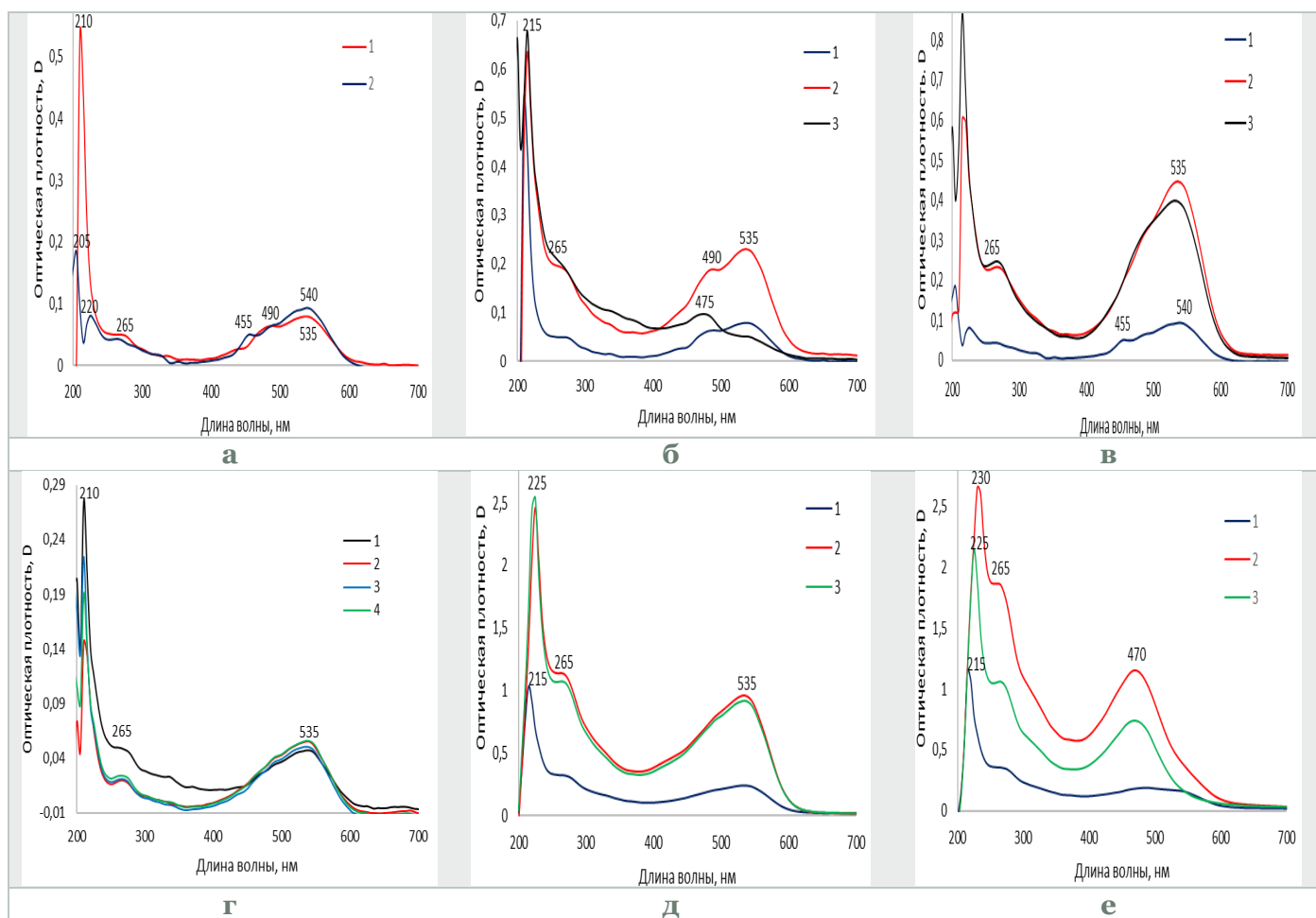


Рисунок 1 – Электронные спектры свекольного сока: а) 1 – образец 1, 2 – образец 4; б) 1 – образец 1, 2 – образец 2, 3 – образец 3; в) 1 – образец 4, 2 – образец 5, 3 – образец 6; г) исходный сок с лимонной кислотой после 48 ч сбраживания: 1 – образец 4 (контроль), 2 – 1%, 3 – 2%, 4 – 3% дрожжей; д) концентрат сброженного сока с лимонной кислотой: 1 – образец 5, 2 – 1%, 3 – 3% дрожжей; е) концентрат сброженного сока через два месяца хранения

Figure 1. Electronic spectra of beet juice: а) 1 – sample 1, 2 – sample 4; б) 1 – sample 1, 2 – sample 2, 3 – sample 3; в) 1 – sample 4, 2 – sample 5, 3 – sample 6; г) original juice with citric acid after 48 hours of fermentation: 1 – sample 4 (control), 2 – 1%, 3 – 2%, 4 – 3% yeast; д) concentrate of fermented juice with citric acid: 1 – sample 5, 2 – 1%, 3 – 3% yeast; е) concentrate of fermented juice after 2 months of storage

Сбраживание образца 4 (рисунок 1г) независимо от содержания дрожжей не приводило к заметным изменениям ни в фактуре полосы бетанина (535 нм), ни в его концентрации, подтверждая данные, приведенные в таблице, однако достаточно наглядно проявило себя в УФ-области. Концентрирование образца 9 с 1 и 3% дрожжей показало устойчивость оптических характеристик, так же независимо от содержания дрожжей, во всем диапазоне рассматриваемого фрагмента спектра (рисунок 1д). Однако при хранении сброженных образцов (рисунок 1е), несмотря на неизменность рисунка спектральной кривой, выявлено следующее:

- зависимость от количества использованных дрожжей: интенсивность полосы пигмента снижается с увеличением их содержания;
- но, самое главное, спектр обоих образцов представлен полосой 470 нм – одной из желто-оранжевых форм бетаксантинов.

Отмеченные экспериментальные факты дают основание полагать, подтверждая известные литературные данные [39], что присутствие сахарозы в соке, связывающей бетанин в комплексное образование, необходимо для сохранения его красной формы. Стабилизатор при отсутствии сахарозы не эффективен, что приводит к изоморфизму красителя.

В отличие от спектрофотометрии, дающей прямую информацию о наличии и изоморфном составе красителя свекольного сока, возможности ИК-спектроскопии по его исследованию достаточно ограничены в силу незначительного содержания (0,4–1,5%) бетанина, имеющего в своей структуре

остаток молекулы глюкозы, на фоне высоких концентраций сахаров (до 95%) – сахарозы, мальтозы, глюкозы, фруктозы. Но метод Фурье ИК-спектроскопии позволяет увидеть состояние системы в целом и ее изменение под влиянием тех или иных внешних и внутренних факторов на всех этапах технологического процесса.

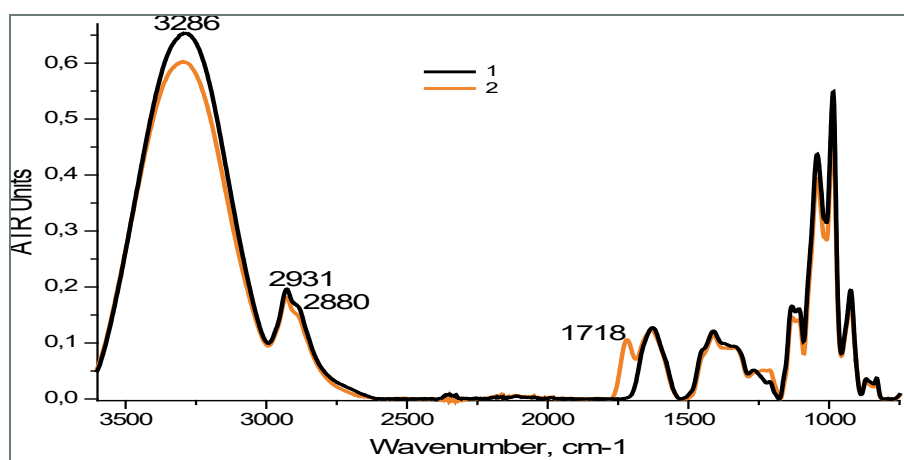


Рисунок 2 – Общий вид ИК-спектров исходного свекольного сока: 1 – образец 1; 2 – образец 4
Figure 2. General view of the IR spectra of the original beet juice: 1 – sample 1; 2 – sample 4

На рисунке 2 представлен общий вид ИК-спектров образцов 1 и 4. На присутствие лимонной кислоты в образце 4 полосой 1718 см^{-1} указывают колебания ее С=О-группировок. ИК-спектр свекольного сока разбивается на два региона, из которых наиболее информативным является $1750\text{--}600\text{ см}^{-1}$. В высокочастотном регионе спектра ($3700\text{--}2800\text{ см}^{-1}$) полосами 3286 и $2931\text{--}2880\text{ см}^{-1}$ соответственно проявляются колебания ОН-групп, в том числе и молекул координационно связанной воды, и валентные асимметричные и симметричные колебания CH_2 -группировок всех компонентов системы [40, 41].

Первое, что обращает на себя внимание при выделении и увеличении фрагментов наиболее информативного региона ИК-спектров (рисунок 3), это высокое содержание сахарозы в образце 1, что видно по всем ее индивидуальным спектральным показателям – дублеты $1135/1108$, $1044/988\text{ см}^{-1}$ (рисунок 3а), $868/831\text{ см}^{-1}$ (рисунок 3б) и полосы 924 см^{-1} (рисунок 3б), 1370 , 1335 см^{-1} (рисунок 3в) [42]. И то, что на них не оказывает существенного влияния введение стабилизатора в образце 4.

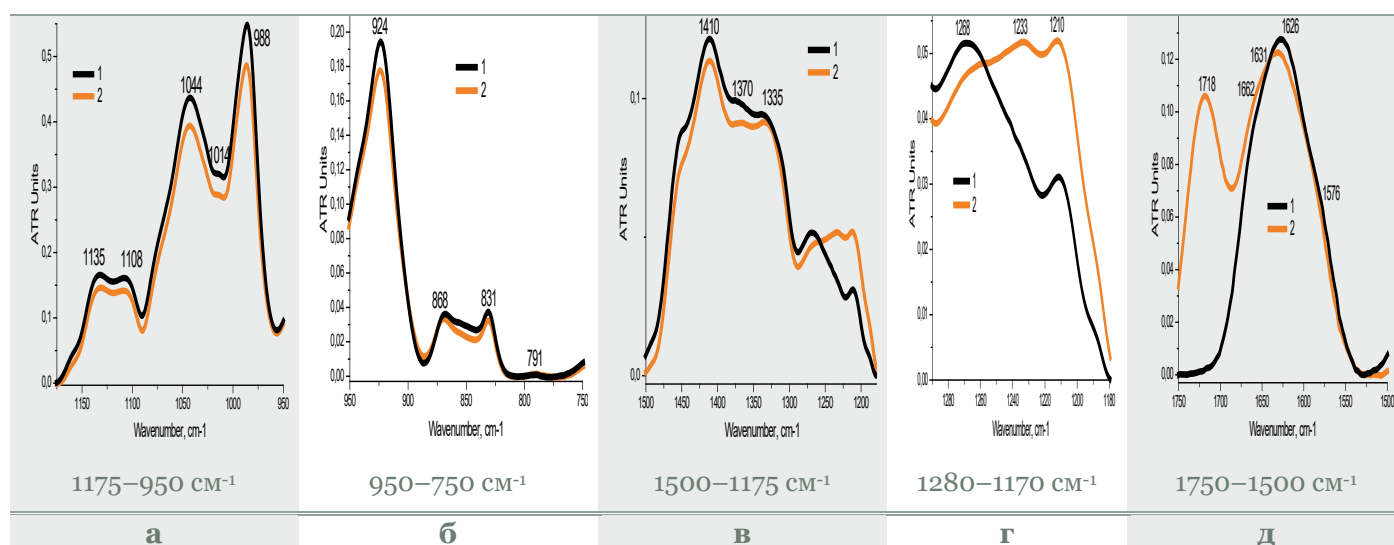


Рисунок 3 – Фрагменты ИК-спектров свекольного сока: 1 – образец 1, 2 – образец 4
Figure 3. Fragments of IR-spectra of beet juice: 1 – sample 1, 2 – sample 4

Основные изменения спектральных характеристик при введении лимонной кислоты наблюдались в тех диапазонах, где проявляются колебания протеиновых компонентов. Наиболее наглядно это

иллюстрирует микрофрагмент полосы 1268/1210 см^{-1} (рисунок 3г) в спектре образца 1, которая при введении стабилизатора меняет форму и расширяется с образованием структурированного максимума 1268/1233/1210 см^{-1} в спектре образца 4, что может говорить о деструкции протеин-сахарозных комплексов в спектре образца 1 с образованием и выделением более мелких пептид (1268–1233 см^{-1})-сахарозных (1210 см^{-1}) образований в спектре образца 4.

Заметим, что полоса 1210 см^{-1} в данной области является характеристичной для сахарозы, а в области 1240–1230 см^{-1} могут проявляться и фосфолипиды в составе сложных фосфолипид-пептид-углеводных формирований [43], положение полосы которых зависит как от длины углеродной цепочки, так и степени ненасыщенности остатков жирных кислот в их составе. В работе [39] показано, что среди жирных кислот в широком ассортименте свекольных соков разной сортности доминировали олеиновая и пальмитиновая, соответственно 52 и 20% от суммарного содержания жирных кислот. Причем в более скороспелых и холодостойких образцах красной свеклы преобладали ненасыщенные жирные кислоты и пониженное содержание бетанина.

Несколько иной и менее выразительный характер носят изменения пептидной полосы 1626 см^{-1} (рисунок 3д) – введение стабилизатора приводило к высокочастотному смещению максимума в положение 1631 см^{-1} и большей выраженности плеча 1662 см^{-1} , принадлежащего, скорее всего, фрагментам белковых структур α -спирального типа.

Сопоставляя спектр образца 2 (рисунок 4) со спектром образца 1 (рисунок 3), можно заметить, что фактура полос и их положение практически не изменились на всех фрагментах рисунка, говоря о достаточно стабильном состоянии преимущественно углеводной системы сока. Увеличение интенсивности полос в спектре образца 3 указывает на повышение концентрации именно этой категории компонентов. Исключение составляет полоса 1628 см^{-1} (рисунок 4д), теряющая интенсивность со смещением максимума в низкочастотную область (1617 см^{-1}), а плечо 1662 см^{-1} приобретает большую выраженность. При этом, хотя структурно система в целом изменяется мало, содержание бетанина резко снизилось (рисунок 1б) с формированием полосы 475 нм желто-оранжевого беталаина.

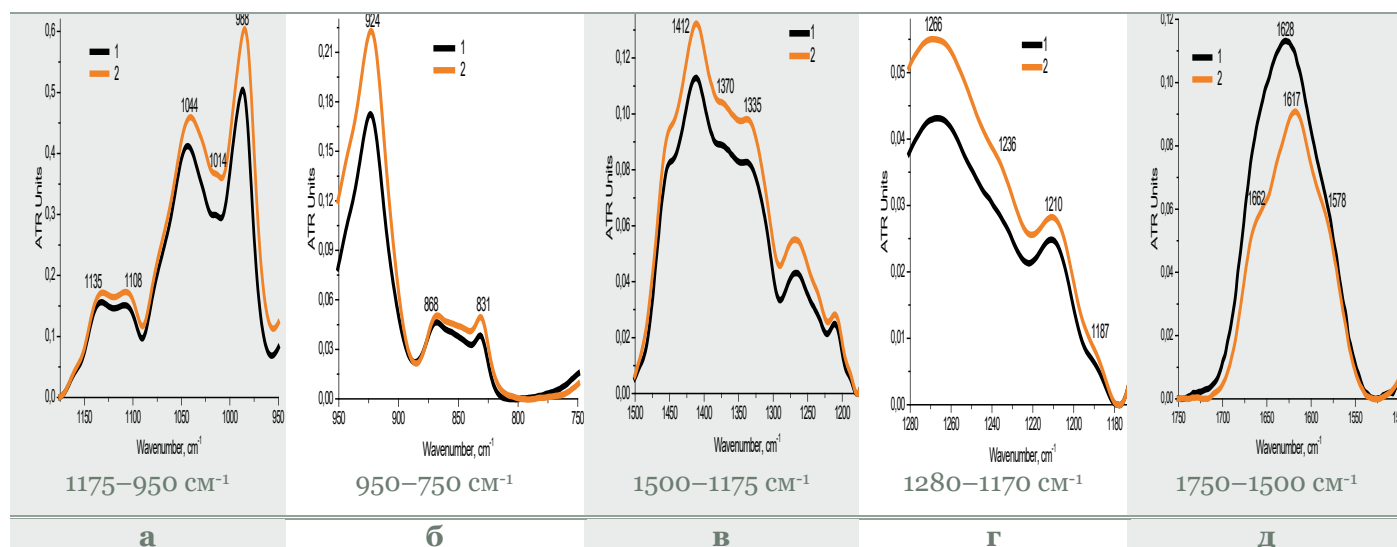


Рисунок 4 – Фрагменты ИК-спектров концентратов исходного свекольного сока без стабилизатора:
1 – образец 2, 2 – образец 3

Figure 4. Fragments of IR spectra of concentrates of the original beet juice without stabilizer: 1 – sample 2, 2 – sample 3

Анализ спектра образца 5 (рисунок 5) в сопоставлении со спектром образца 4 (рисунок 3) так же в целом показывает устойчивость системы в процессе концентрирования с сохранением всех оптических показателей доминирующей в ней сахарозы. В образце 6 увеличивается интенсивность всех полос, характеризующих сахарозу, но несколько меняется рисунок полосы пептид-углеводных комплексов (рисунок 5г), и из состава полосы 1630 см^{-1} (рисунок 5д) дифференцируется полоса 1665 см^{-1} . Кислотность среды образца 4 ($\text{pH} = 4,55$) способствует сохранности бетанином формы (рисунок 1в), несмотря на некоторое снижение его содержания.

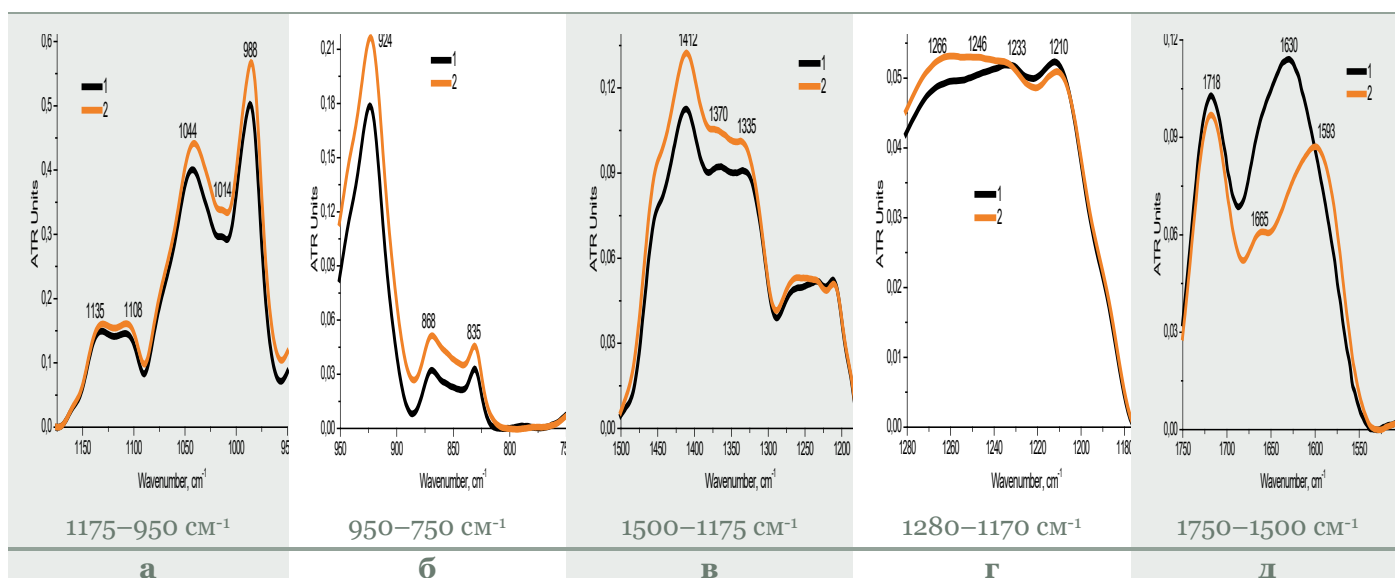


Рисунок 5 – Фрагменты ИК-спектров концентратов (15 мин) свекольного сока с лимонной кислотой:
1 – образец 5; 2 – образец 6

Figure 5. Fragments of IR spectra of concentrates (15 min.) of beet juice with citric acid: 1 – sample 5, 2 – sample 6

Исследование образца 7 показало ярко выраженное изменение оптических свойств и не менее заметную, но не вполне однозначную их зависимость от содержания дрожжей для разных областей шкалы волновых чисел, что лучше всего отражает диапазон 1750–700 cm^{-1} спектров на рисунке 6.

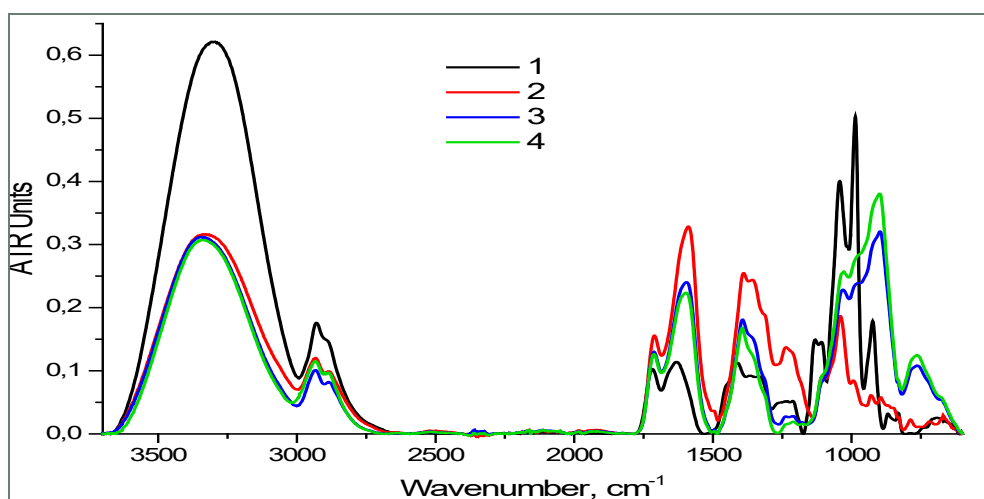


Рисунок 6 – Общий вид ИК-спектров сброженного в течение 48 ч свекольного сока с лимонной кислотой:
1 – образец 4 (контроль), 2 – 1%, 3 – 2%, 4 – 3% дрожжей

Figure 6. General view of the IR spectra of beet juice fermented for 48 hours with citric acid: 1 – sample 4 (control), 2 – 1%, 3 – 2%, 4 – 3% yeast

Фрагменты спектров, представленные на рисунке 7а, иллюстрируют деструкцию сахарозы через изменение ее оптических свойств в спектре образца 4 (контроль) при введении 1% дрожжей – из дублетов полос 1135/1108 и 1044/988 cm^{-1} в спектре остаются полосы фруктозы – 1140 cm^{-1} и в виде плеча 1108 cm^{-1} , полоса глюкозы 988 cm^{-1} резко падает по интенсивности, смещаясь в положение 993 cm^{-1} [44, 45]. Однако с увеличением количества дрожжей (2 и 3%) она снова возвращается в свое прежнее положение, резко возрастая по интенсивности и формируя общую полосу с фруктозой (976 cm^{-1}). Появляется также общая для обеих моноз полоса 1032 cm^{-1} , которая растет с увеличением содержания дрожжей. Это говорит о неоднозначности процессов брожения, имеющих место в углеводной системе свекольного сока в зависимости от содержания дрожжевых компонентов.

На разницу в эффективности и характере структурных преобразований в системе углеводов указывают и фрагменты рисунка 7б. Введение 1% дрожжей привело к выраженной деструкции и дублета 868/831 cm^{-1} . От него осталась только полоса глюкозы 831 cm^{-1} , при этом появилась новая (845 cm^{-1}),

отсутствующая в спектре образца 4 (контроля), и увеличилось количество полос, характерных для свободной фруктозы (896, 866, 788 cm^{-1}), говорящих о разнообразии ее конфигурационно-конформационных форм. Однако увеличение содержания дрожжей (2 и 3%) заметно изменило ситуацию, указывая на смену и заметное доминирование оптических свойств глюкозы (898, 831, 762 cm^{-1}) и менее выраженную индивидуальность оптических свойств обеих свободных моноз. Расширенный и структурированный характер полос в спектрах с содержанием дрожжей 2 и 3% с определенной очевидностью может сигнализировать о формировании новых комплексных образований в системе свекольного сока на базе фрагментов деструкции молекул сахарозы. Слабо выраженной полосой в области 722–718 cm^{-1} в спектрах сброженных образцов могут проявляться C=C-связи остатков жирных кислот в составе липидных компонентов [46].

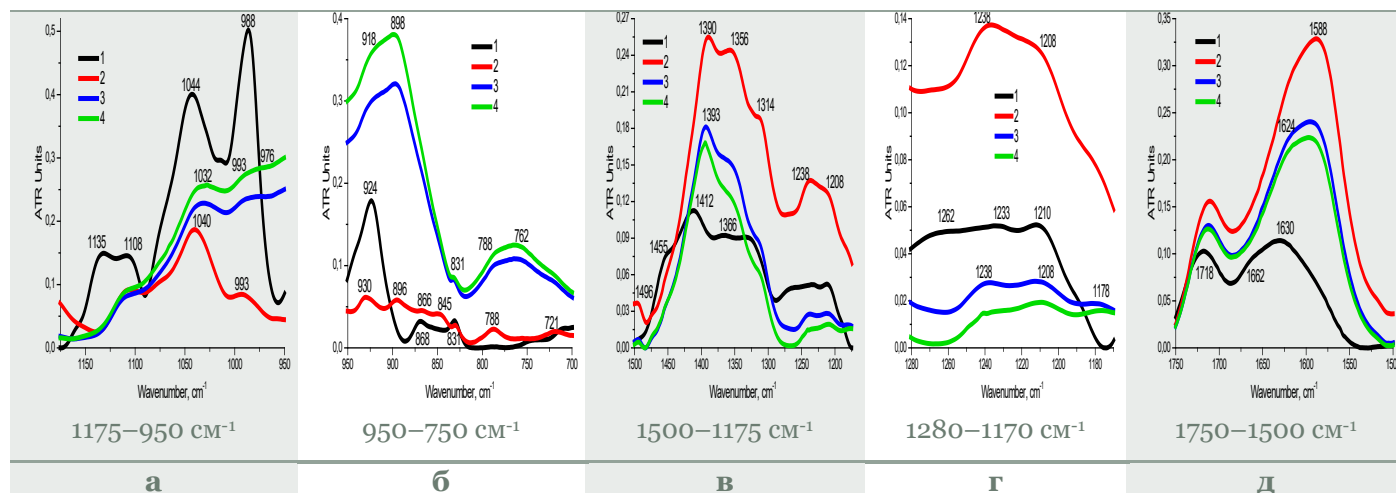


Рисунок 7 – Фрагменты ИК-спектров сброженного в течение 48 ч свекольного сока с лимонной кислотой: 1 – образец 4 (контроль), 2 – 1%, 3 – 2%, 4 – 3% дрожжей

Figure 7. Fragments of IR spectra of beet juice fermented with citric acid for 48 hours: 1 – sample 4 (control), 2 – 1%, 3 – 2%, 4 – 3% yeast

Экстремальный характер изменений в оптических свойствах системы в зависимости от содержания введенных дрожжей наглядно прослеживается и по фрагментам рисунка 7в, иллюстрирующего количественные изменения в составе функциональных группировок и структурных элементов углеводных циклов (1408–1310 cm^{-1}). Однако, в отличие от предыдущих фрагментов, интенсивность широкой структурированной полосы 1389 cm^{-1} при введении 1% дрожжей резко возрастает и разрушается дублет сахарозы 1370/1335 cm^{-1} .

В этой области интересен минифрагмент, вынесенный на рисунок 7г. Деструкция сахарозы сбраживанием с 1% дрожжей, разрушая структуру свекольного сока, позволила наблюдать выделение из ее состава обособленного фосфолипид-глюкозного комплекса, преобразующего спектр формированием уширенной полосы – 1238 cm^{-1} (фосфолипиды)-1208 cm^{-1} (глюкоза), устойчивой с увеличением количества дрожжей. В спектрах всех сброженных образцов полосой 1178 cm^{-1} проявилась фруктоза.

Неоднозначность имеющих место событий прослеживается и по характеру изменений оптических свойств протеиновых компонентов (рисунок 7д). Резкое увеличение интенсивности пептидной полосы 1588 cm^{-1} в присутствии 1% дрожжевых клеток так же указывает на наиболее интенсивное разрушение пептид-сахарозных комплексных структур. Все говорит о том, что деструкция сахарозы в составе свекольного сока в результате его сбраживания, способствует формированию новой глюкозо-фруктозной структуры с сохранением протеиновых компонентов.

Спектры образца 9 с 1 и 3% дрожжей (рисунок 8г), преобразованные фосфолипидной полосой 1238 cm^{-1} , подтверждая отмеченное, указывают на снижение пептидных компонентов в составе новых комплексных образований. О фруктозо-глюкозной структуре в системе концентратов сброженного сока говорят фрагменты спектров рисунка 8а и 8б. По спектрам рисунка 8б можно видеть, что на данном этапе основные изменения в системе обусловлены уменьшением содержания свободных моноз с увеличением количества дрожжевых клеток.

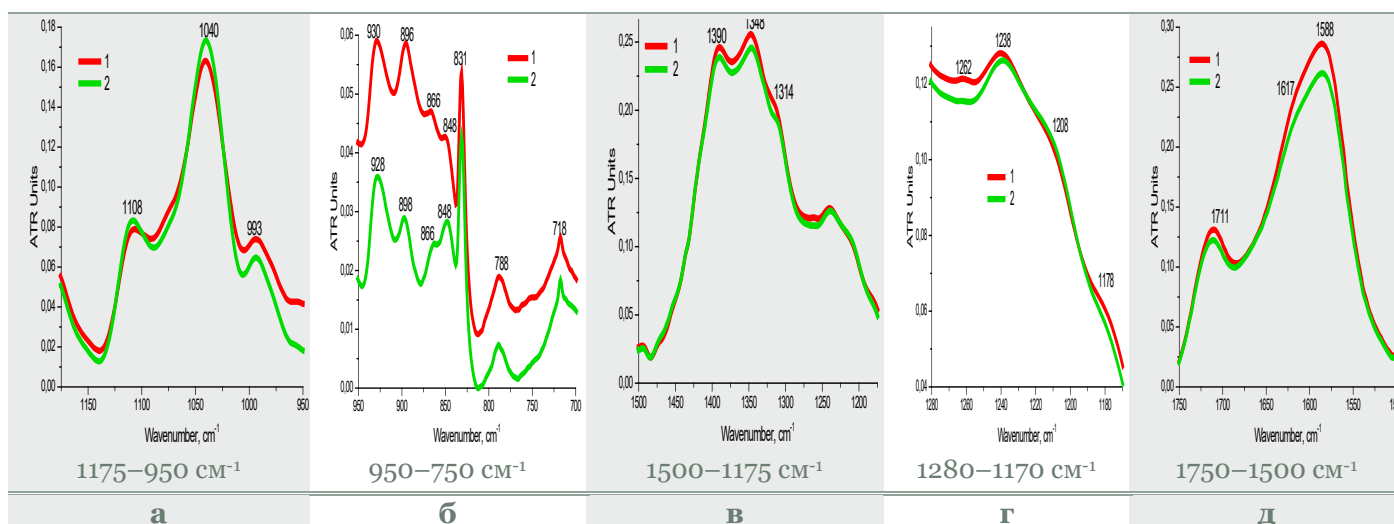


Рисунок 8 – Фрагменты ИК-спектров сброженных концентратов свекольного сока: 1 – 1%, 2 – 3% дрожжей
Figure 8. Fragments of IR-spectra of fermented beet juice concentrates: 1 – 1%, 2 – 3% yeast

Хранение образцов свекольного сока, сброженных с 1 и 3% дрожжей (рисунок 9), еще больше сближает их по оптическим свойствам во всех рассматриваемых диапазонах шкалы энергий. Об имевшихся преобразованиях в системе за время хранения лучше всего говорят наглядные изменения на рисунках 9б и 9в при сопоставлении с теми же фрагментами рисунка 8. Они также связаны в основном с перераспределением в соотношении свободных фруктозы (896, 866, 788 cm^{-1}) и глюкозы (898, 845, 831 cm^{-1}) с сохранением полосы колебаний C=C-связей жирных кислот липидных компонентов в позиции 718 cm^{-1} . Это позволяет говорить о разной скорости нивелирования последствий процесса брожения для достижения системой энергетически и структурно стабильного состояния в зависимости от ферментативных условий сбраживания.

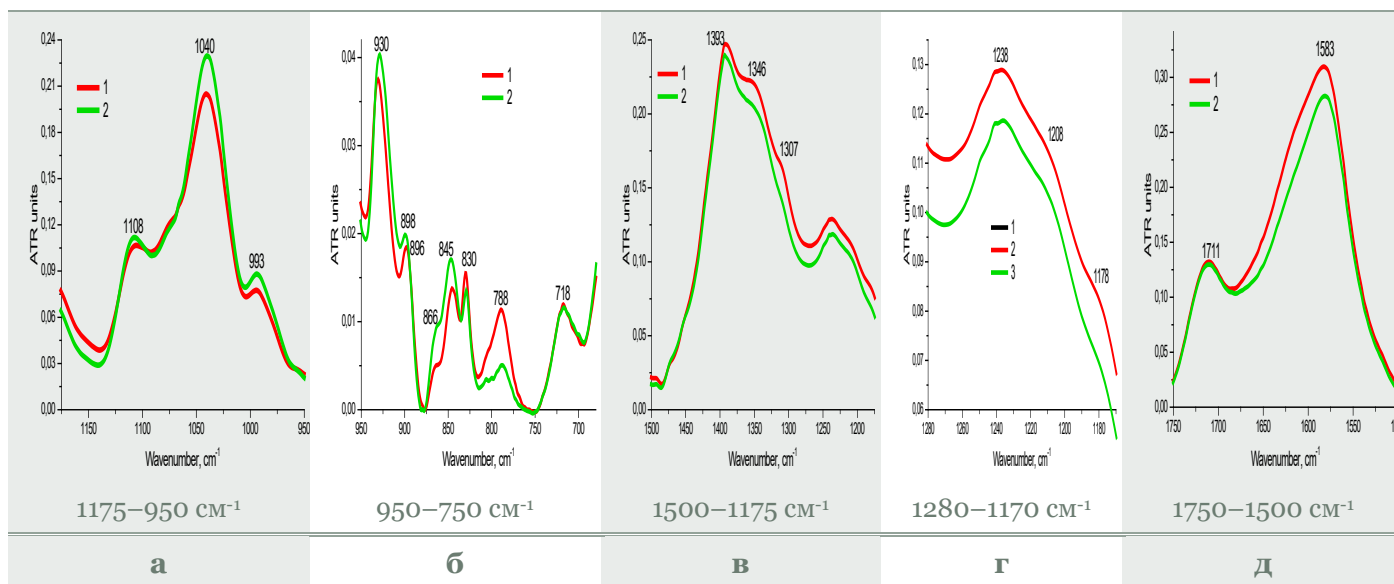


Рисунок 9 – Фрагменты ИК-спектров сброженных концентратов свекольного сока через 2 месяца хранения: 1 – 1%, 2 – 3% дрожжей
Figure 9. Fragments of IR-spectra of fermented beet juice concentrates after 2 months of storage: 1 – 1%, 2 – 3% yeast

Однако, как следует из рисунка 1д, следствием процесса брожения является не только деструкция сахарозы и формирование глюкозо-фруктозной системы сока с проявленными в ней оптическими свойствами фосфолипид-глюкозидных комплексов, но и устойчивая изомеризация бетанина, представленного в новых условиях в виде желто-оранжевого бетаксантина (470 нм).

Заключение

Изучение свекольного сока двумя спектральными методами с контролем методами химического анализа показало:

- устойчивость бетанина в стабилизированном лимонной кислотой свекольном соке при концентрировании и хранении в течение двух месяцев, несмотря на очевидные нарушения в системе протеиновых компонентов сока;
- сбраживание образцов стабилизированного сока позволило проиллюстрировать яркие изменения оптических свойств при деструкции сахарозы, выделении фосфолипид-глюкозного комплекса из общей разрушенной структуры сока, их зависимость от содержания дрожжевых клеток, не повлиявших на форму красителя;
- показано, что изменение оптических свойств при последующем концентрировании и хранении сброженных образцов обусловлены, в основном, вариацией в соотношении продуктов деструкции сахарозы: свободных глюкозы и фруктозы, формирующих новую стабильную глюкозо-фруктозную систему сока, в которой краситель приобретает форму бетаксантина.

Литература

1. Фауст Е.А. Функциональные технологические добавки в пищевой биотехнологии. Саратов: Изд-во Саратовского гос. аграрн. ун-та. 2016. 45 с.
2. Тюрина Л.Е., Табаков Н.А. Пищевые добавки. Красноярск: Изд-во Красноярского гос. аграрн. ун-та. 2008. 92 с.
3. Khan M.I., Giridhar P. Plant betalains: Chemistry and biochemistry. *Phytochemistry*. 2015, no. 117, pp. 267-295. DOI: 10.1016/j.phytochem.2015.06.008
4. Кропова Ю.Г., Самарина А.Д. Протекторные свойства беталаиновых пигментов растений // Вестник МГПУ. Серия «Естественные науки». 2022. № 4. С. 10–23. DOI: 10.25688/2076-9091.2022.48.4.1
5. Устинова Ю.В., Ермолаева Е.О., Шевченко Т.В., Попов А.М., Плотников Л.Б. Свойства и применение природных беталаиновых красителей // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2021. № 4. С. 72–79. DOI: 10.24412/2311-6447-2021-4-72-79
6. Madadi E., Mazloun-Ravasan S., Yu J.S., Ha J.W., Hamishehkar H., Kim K.H. Therapeutic application of betalains: A review. *Plants (Basel)*. 2020, V. 9, no. 9, article 1219. DOI: 10.3390/plants9091219
7. Hadipour E., Taleghani A., Tayarani-Najaran N., Tayarani-Najaran Z. Biological effects of red beetroot and betalains: A review. *Phytotherapy Research*. 2020, V. 34, no. 8, pp. 1847-1867. DOI: 10.1002/ptr.6653
8. Шачек Т.М., Протасеня Л.Н., Зеленкова Е.Н. Применение натурального красителя бетанина в производстве косметической продукции // Food Industry: Science and Technologies. 2023. Т. 16. № 3. С. 67–78.
9. Колдаев В.М., Кропотов А.В., Лу О.Н. Беталаины в практической медицине // Тихоокеанский медицинский журнал. 2023. № 2. С. 20–24. DOI: 10.34215/1609-1175-2023-2-20-24
10. Khairi M.S. Faelelbom, Abdullah I. Saleh, Moawia M. Al-Tabakha, Akram Ashsmes. Recent applications of quantitative analytical FTIR spectroscopy in pharmaceutical, biomedical and clinical fields: A brief review. *Analytical Chemistry*. 2022, V. 41, no 1, pp. 21–33. DOI: 10.1515/revac-2022-0030
11. Колдаев В.М. Лечебно-профилактические эффекты пигментов красной свеклы при наиболее угрожающих патологических состояниях // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2024. № 5. С. 46–50. DOI: 10.17513/mjpf.13633
12. Bhat S.A., Chandramohan S., Krishna G.S., Hiranmaya C., Pajaniradje S., Nair A.S., Mohanty D., Rajagopalan R. Betanin-encapsulated starch nanoparticles: synthesis and cytotoxic effect on colon cancer. *Biotech*. 2024. V. 14, no. 10, article 233. DOI: 10.1007/s13205-024-04078-4
13. Amjadia S., Abbasic M.M., Shokouhid B., Ghorbanie M., Hamishehkarc H. Enhancement of therapeutic efficacy of betanin for diabetes treatment by liposomal nanocarriers. *Journal of Functional Foods*. 2019, V. 59, pp. 119–128. DOI: 10.1016/j.jff.2019.05.015
14. Yin Z., Yang Y., Guo T., Veeraraghavan V.P., Wang X. Potential chemotherapeutic effect of betalain against human non-small cell lung cancer through PI3K/Akt/mTOR signaling pathway. *Environmental Toxicology*. 2021, V. 36, no. 6, pp. 1011–1020. DOI: 10.1002/tox.23100
15. Farabegoli F., Scarpa E.S., Frati A., Serafini G., Papi A., Spisni E., Antonini E., Benedetti S., Ninfali P. Betalains increase vitexin2-O-xyloside cytotoxicity in CaCo-2 cancer cells. *Food Chemistry*. 2017, V. 1, no. 218, pp. 356–364. DOI: 10.1016/j.foodchem.2016.09.112
16. Shunan D., Yu M., Guan H., Zhou Y. 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*. 2021, no. 137, article 111369. DOI: 10.1016/j.biopha.2021.111369
17. Wang J., Zhang D., Cao C., Yao J. Betalain exerts a protective effect against glaucoma is majorly through association of inflammatory cytokines. *AMB Express*. 2020, V. 10, no. 1, article 125. DOI: 10.1186/s13568-020-01062-y

18. Gengatharan A., Dykes G.A., Choo W.S. Betalains: Natural plant pigments with potential application in functional foods. *LWT – Food Science and Technology*. 2015, V. 64, no. 2, pp. 645–649. DOI: 10.1016/j.lwt.2015.06.052
19. Slimen I.B., Najar T., Abderrabba M. Chemical and antioxidant properties of betalains. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2017, V. 65, no. 4, pp. 675–689. DOI: 10.1021/acs.jafc.6b04208
20. Rahimi P., Abedimanesh S., Mesbah-Namin S.A., Ostadrahimi A. Betalains, the nature-inspired pigments, in health and diseases. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2019, V. 59, no. 18, pp. 2949–2978. DOI: 10.1080/10408398.2018.1479830
21. Fu Y., Shi J., Xie S.-Y., Zhang T.Y., Soladoye O.P., Aluko R.E. Red beetroot betalains: perspectives on extraction, processing, and potential health benefits. *Agricultural and Food Chemistry*. 2020, V. 68, no. 42, pp. 11595–11611. DOI: 10.1021/acs.jafc.0c04241
22. Соколова Д.В. Экологогеографическое изучение накопления бетанина у перспективных образцов столовой свеклы коллекции ВИР // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2019. Т. 180. № 4. С. 66–74. DOI: 10.30901/2227-8834-2019-4-66-74
23. Соколова Д.В. Динамические изменения содержания бетанина в столовой свекле в течение вегетационного периода: их взаимодействие с абиотическими факторами // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2022. Т. 26. № 1. С. 30–39. DOI: 10.18699/VJGB-22-05
24. Валентик М., Степаняц В., Соколова Ю.Д. Исследование экстракции пигментов из свеклы столовой различных сортов в зависимости от температуры сушки корнеплодов // Тенденции развития науки и образования. 2021. В. 70. № 2. С. 6–10. DOI: 10.18411/lj-02-2021-38
25. Aztatzi-Rugiero L., Granados-Balbuena S.Y., Zainos-Cuapio Y., Ocaranza-Sánchez E., Rojas-López M. Analysis of the degradation of betanin obtained from beetroot using Fourier transform infrared spectroscopy. *J Food Sci Technol*. 2019, V. 56, no. 8, pp. 3677–3686. DOI: 10.1007/s13197-019-03826-2
26. Шачек Т.М., Иващенко Д.Е., Егорова З.Е. Химико-технологические испытания столовой свеклы при разработке технологии концентрированного сока // Труды БГТУ. 2015. № 4. С. 216–221.
27. Fernando G.S.N., Sergeeva N.N., Frutos M.J., Marshall L.J., Boesch C. Novel approach for purification of major betalains using flash chromatography and comparison of radical scavenging and antioxidant activities. *Food Chem*. 2022, V. 15, no. 385, article 132632. DOI: 10.1016/j.foodchem.2022.132632
28. Miyagawa Y., Fujita H., Adachi S. Kinetic analysis of thermal degradation of betanin at various hY values using deconvolution method. *Food Chemistry*. 2021, V. 1, no. 361, article 130165. DOI: 10.1016/j.foodchem.2021.130165
29. Dygas D., Nowak S., Olszewska J., Szymańska M. et al. Ability of yeast metabolic activity to reduce sugars and stabilize betalains in red beet juice. *Fermentation*. 2021, V. 7, article 105. DOI: 10.3390/fermentation7030105
30. Janiszewska-Turak E., Walczak M., Rybak K., Pobiega K. et al. Influence of fermentation beetroot juice process on the physico-chemical properties of spray dried powder. *Molecules*. 2022, V. 27, no. 3, article 1008. DOI: 10.3390/molecules27031008
31. Spórna-Kucab A., Ignatova S., Garrard I., Wybraniec S. Versatile solvent systems for the separation of betalains from processed *Beta vulgaris* L. juice using counter-current chromatography. *J. Chromatogr. B. Analyt. Technol. Biomed. Life Sci*. 2013, V.15, no. 941, pp. 54–61. DOI: 10.1016/j.jchromb.2013.10.001
32. Bahrami M.E., Honarvar M., Ansari K., Jamshidi B. Measurement of quality parameters of sugar beet juices using nearinfrared spectroscopy and chemometrics. *Journal of Food Engineering*. 2019, V. 271, no. 2, article 109775. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2019.109775
33. Castellanos-Santiago E., Yahia E.M. Identification and quantification of betalains from the fruits of 10 mexican prickly pear cultivars by high-performance liquid chromatography and electrospray ionization mass spectrometry. *J Agric Food Chem*. 2008, V. 56, no. 14, pp. 5758–5764. DOI: 10.1021/jf800362t
34. Stintzing F.C., Conrad J., Klaiber I., Beifuss U., Carle R. Structural investigations on betacyanin pigments by LC NMR and 2D NMR spectroscopy. *Phytochemistry*. 2004, V. 65, no. 4, pp. 415–422. DOI: 10.1016/j.phytochem.2003.10.029
35. Cai Y., Sun M., Wu H. et al. Characterization and quantification of betacyanin pigments from diverse *Amaranthus* species. *Journal Agricultural and Food Chemistry*. 1998, V. 6, no. 46, pp. 2063–2070. DOI: 10.1021/JF9709966
36. Patil P.D., Rao C.R., Wasif A.I., Anekar S.V., Nagla J.R. Mass transfer enhancement through optimized extraction of a natural dye from *Bougainvillea glabra* Juss. bracts. *Indian J Nat Prod Resour*. 2014, V. 5, no. 4, pp. 332–337.
37. Свердлова О.В. Электронные спектры в органической химии. Л.: Химия, 1985. 248 с.
38. Демченко А.П. Ультрафиолетовая спектрофотометрия и структура белков. Киев: Наукова думка. 1981. 208 с.
39. Sokolova D.V., Solovieva A.E., Shelenga T.V. Primary metabolites and betanin: Their interplay in the roots of table beet (*Beta vulgaris* L.). *Vegetable Crops of Russia*. 2023, no. 2, pp. 54–64. DOI: 10.18619/2072-9146-2023-2-54-64.
40. Сильверстейн Р., Вебстер Ф., Кимл Д. Спектрометрическая идентификация органических соединений. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. 557 с.
41. Преч Э., Бюльманн Ф., Аффольтер К. Определение строения органических соединений. Таблицы спектральных данных. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. 439 с.

42. Kanou M., Nakanishi K., Hashimoto A., Kameoka T. Influences of monosaccharides and its glycosidic linkage on infrared spectral characteristics of disaccharides in aqueous solutions. *Appl Spectrosc.* 2005, V. 59, no. 7, pp. 885–892. DOI: 10.1366/0003702054411760
43. Нечипоренко А.П., Ситникова В.Е., Нечипоренко У.Ю., Коноваленко А.В. Фурье ИК-спектроскопия в исследовании проявлений патологии сперматозоидов // Вестник СПбГУ. Медицина. 2023. Т. 18. № 3. С. 233–257. DOI: 10.21638/spbu11.2023.302
44. Нечипоренко А. П., Везо О. С., Нечипоренко У. Ю., Плотникова Л. В., Ситникова В. Е., Украинцева П. И., Плотников П. П. Оптические свойства медов: методы ИК-Фурье спектроскопии и рефрактометрии // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2021. Т. 11. №4. С. 627–641. DOI: 10.21285/2227-2925-2021-11-4-627-641
45. Нечипоренко А.П., Плотникова Л.В., Везо О.С., Ситникова В.Е. Метод Фурье ИК-спектроскопии в исследовании аномерной чистоты α - и β -форм кристаллической D (+)-глюкопиранозы // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2024. № 1. С. 25–34. DOI: 10.17586/2310-1164-2024-17-1-25-34
46. Ле-Дейген И.М., Скуредина А.А., Е. В. Кудряшова Е.В. Экспериментальные методы изучения механизмов взаимодействия липидных мембран с низкомолекулярными лекарственными препаратами // Биоорганическая химия. 2020. Т. 46. № 4. С. 340–359. DOI: 10.31857/S013234232004017X

References

1. Faust E.A. Functional technological additives in food biotechnology. Saratov, Saratov State Agrarian University Publ. 2016, 45 p. (In Russian)
2. Tyurina L.E., Tabakov N.A. Food additives. Krasnoyarsk, Krasnoyarsk State Agrarian University Publ. 2008, 92 p. (In Russian)
3. Khan M.I., Giridhar P. Plant betalains: Chemistry and biochemistry. *Phytochemistry.* 2015, no. 117, pp. 267–295. DOI: 10.1016/j.phytochem.2015.06.008
4. Kropova Yu.G., Samarina A.D. Protector properties of plant betalaine pigments. *The Academic Journal of Moscow City University. Series "Natural Sciences".* 2022, no. 4, pp. 10–23. DOI: 10.25688/2076-9091.2022.48.4.1 (In Russian)
5. Ustinova Yu.V., Ermolaeva E.O., Shevchenko T.V., Popov A.M., Plotnikov L.B. Properties and application of natural betalain dyes. *Technologies for the Food and Processing Industry of AIC – Healthy Food.* 2021, no. 4, pp. 72–79. DOI: 10.24412/2311-6447-2021-4-72-79. (In Russian)
6. Madadi E., Mazloun-Ravasan S., Yu J.S., Ha J.W., Hamishehkar H., Kim K.H. Therapeutic application of betalains: A review. *Plants (Basel).* 2020, V. 9, no. 9, article 1219. DOI: 10.3390/plants9091219
7. Hadipour E., Taleghani A., Tayarani-Najaran N., Tayarani-Najaran Z. Biological effects of red beetroot and betalains: A review. *Phytotherapy Research.* 2020, V. 34, no. 8, pp. 1847–1867. DOI: 10.1002/ptr.6653
8. Shachek T.M., Protaseny L.N., Zelenkova E.N. Applications of plant-derived colorant betanin in the coloration of cosmetics. *Food Industry: Science and Technologies.* 2023, V. 16, no. 3, pp. 67–78. (In Russian)
9. Koldaev V.M., Kropotov A.V., Li O.N. Betalains in practical medicine. *Pacific Medical Journal.* 2023, no. 2, pp. 20–24. DOI: 10.34215/1609-1175-2023-2-20-24 (In Russian)
10. Khairi M.S. Faehelebom, Abdullah I. Saleh, Moawia M. Al-Tabakha, Akram Ashsmes. Recent applications of quantitative analytical FTIR spectroscopy in pharmaceutical, biomedical and clinical fields: A brief review. *Analytical Chemistry.* 2022, V. 41, no 1, pp. 21–33. DOI: 10.1515/revac-2022-0030
11. Koldaev V.M. Therapeutic and preventive effects of red beet pigments in the most threatening pathological conditions. *International Journal of Applied and Fundamental Research.* 2024, no. 5, pp. 46–50. DOI: 10.17513/mjpf.13633. (In Russian)
12. Bhat S.A., Chandramohan S., Krishna G.S., Hiranmaya C., Pajaniradje S., Nair A.S., Mohanty D., Rajagopalan R. Betanin-encapsulated starch nanoparticles: synthesis and cytotoxic effect on colon cancer. *Biotech.* 2024. V. 14, no. 10, article 233. DOI: 10.1007/s13205-024-04078-4
13. Amjadia S., Abbasic M.M., Shokouhid B., Ghorbanie M., Hamishehkarc H. Enhancement of therapeutic efficacy of betanin for diabetes treatment by liposomal nanocarriers. *Journal of Functional Foods.* 2019, V. 59, pp. 119–128. DOI: 10.1016/j.jff.2019.05.015
14. Yin Z., Yang Y., Guo T., Veeraraghavan V.P., Wang X. Potential chemotherapeutic effect of betalain against human non-small cell lung cancer through PI3K/Akt/mTOR signaling pathway. *Environmental Toxicology.* 2021, V. 36, no. 6, pp. 1011–1020. DOI: 10.1002/tox.23100
15. Farabegoli F., Scarpa E.S., Frati A., Serafini G., Papi A., Spisni E., Antonini E., Benedetti S., Ninfali P. Betalains increase vitexin-2-O-xyloside cytotoxicity in CaCo-2 cancer cells. *Food Chemistry.* 2017, V. 1, no. 218, pp. 356–364. DOI: 10.1016/j.foodchem.2016.09.112
16. Shunan D., Yu M., Guan H., Zhou Y. Neuroprotective effect of betalain against AlCl₃-induced Alzheimer's disease in Sprague Dawley rats via putative modulation of oxidative stress and nuclear factor kappa B (NF- κ B) signaling pathway. *Biomedicine and Pharmacotherapy.* 2021, no. 137, article 111369. DOI: 10.1016/j.biopha.2021.111369

17. Wang J., Zhang D., Cao C., Yao J. Betalain exerts a protective effect against glaucoma is majorly through association of inflammatory cytokines. *AMB Express*. 2020, V. 10, no. 1, article 125. DOI: 10.1186/s13568-020-01062-y
18. Gengatharan A., Dykes G.A., Choo W.S. Betalains: Natural plant pigments with potential application in functional foods. *LWT – Food Science and Technology*. 2015, V. 64, no. 2, pp. 645–649. DOI: 10.1016/j.lwt.2015.06.052
19. Slimen I.B., Najar T., Abderrabba M. Chemical and antioxidant properties of betalains. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2017, V. 65, no. 4, pp. 675–689. DOI: 10.1021/acs.jafc.6b04208
20. Rahimi P., Abedimanesh S., Mesbah-Namin S.A., Ostadrahimi A. Betalains, the nature-inspired pigments, in health and diseases. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2019, V. 59, no. 18, pp. 2949–2978. DOI: 10.1080/10408398.2018.1479830
21. Fu Y., Shi J., Xie S.-Y., Zhang T.Y., Soladoye O.P., Aluko R.E. Red beetroot betalains: perspectives on extraction, processing, and potential health benefits. *Agricultural and Food Chemistry*. 2020, V. 68, no. 42, pp. 11595–11611. DOI: 10.1021/acs.jafc.0c04241
22. Sokolova D.V. Environmental and geographic study of betanin accumulation in promising red beet accessions from the VIR collection. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2019, V. 180, no. 4, pp. 66–74. DOI: 10.30901/2227-8834-2019-4-66-74. (In Russian)
23. Sokolova D.V. Dynamic changes in betanin content during the growing season of table beet: their interplay with abiotic factors. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2022, V. 26, no. 1, pp. 30–39. DOI: 10.18699/VJGB-22-05. (In Russian)
24. Valentik M., Stepanyants V., Sokolova Yu. D. Research of extraction of pigments from table beet of different varieties depending on the temperature of drying of root crops. *Tendentsii Razvitiya Nauki i Obrazovaniya*. 2021, no. 70, pp. 6–10. DOI: 10.18411/lj-02-2021-38. (In Russian)
25. Aztatzi-Rugiero L., Granados-Balbuena S.Y., Zainos-Cuapio Y., Ocaranza-Sánchez E., Rojas-López M. Analysis of the degradation of betanin obtained from beetroot using Fourier transform infrared spectroscopy. *J Food Sci Technol*. 2019, V. 56, no. 8, pp. 3677–3686. DOI: 10.1007/s13197-019-03826-2
26. Shachek T.M., Ivashko D.E., Egorova Z.E. Chemical and technological tests of in the development of technology of obtaining concentrated juice from it. *Proceedings of BSTU*. 2015, no. 4, pp. 216–221. (In Russian)
27. Fernando G.S.N., Sergeeva N.N., Frutos M.J., Marshall L.J., Boesch C. Novel approach for purification of major betalains using flash chromatography and comparison of radical scavenging and antioxidant activities. *Food Chem*. 2022, V. 15, no. 385, article 132632. DOI: 10.1016/j.foodchem.2022.132632
28. Miyagawa Y., Fujita H., Adachi S. Kinetic analysis of thermal degradation of betanin at various hY values using deconvolution method. *Food Chemistry*. 2021, V. 1, no. 361, article 130165. DOI: 10.1016/j.foodchem.2021.130165
29. Dygas D., Nowak S., Olszewska J., Szymańska M. et al. Ability of yeast metabolic activity to reduce sugars and stabilize betalains in red beet juice. *Fermentation*. 2021, V. 7, article 105. DOI: 10.3390/fermentation7030105
30. Janiszewska-Turak E., Walczak M., Rybak K., Pobiega K. et al. Influence of fermentation beetroot juice process on the physico-chemical properties of spray dried powder. *Molecules*. 2022, V. 27, no. 3, article 1008. DOI: 10.3390/molecules27031008
31. Spórna-Kucab A., Ignatova S., Garrard I., Wybraniec S. Versatile solvent systems for the separation of betalains from processed *Beta vulgaris* L. juice using counter-current chromatography. *J. Chromatogr. B. Analyt. Technol. Biomed. Life Sci*. 2013, V. 15, no. 941, pp. 54–61. DOI: 10.1016/j.jchromb.2013.10.001
32. Bahrami M.E., Honarvar M., Ansari K., Jamshidi B. Measurement of quality parameters of sugar beet juices using nearinfrared spectroscopy and chemometrics. *Journal of Food Engineering*. 2019, V. 271, no. 2, article 109775. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2019.109775
33. Castellanos-Santiago E., Yahia E.M. Identification and quantification of betalains from the fruits of 10 mexican prickly pear cultivars by high-performance liquid chromatography and electrospray ionization mass spectrometry. *J Agric Food Chem*. 2008, V. 56, no. 14, pp. 5758–5764. DOI: 10.1021/jf800362t
34. Stintzing F.C., Conrad J., Klaiber I., Beifuss U., Carle R. Structural investigations on betacyanin pigments by LC NMR and 2D NMR spectroscopy. *Phytochemistry*. 2004, V. 65, no. 4, pp. 415–422. DOI: 10.1016/j.phytochem.2003.10.029
35. Cai Y., Sun M., Wu H. et al. Characterization and quantification of betacyanin pigments from diverse *Amaranthus* species. *Journal Agricultural and Food Chemistry*. 1998, V. 6, no. 46, pp. 2063–2070. DOI: 10.1021/JF9709966
36. Patil P.D., Rao C.R., Wasif A.I., Anekar S.V., Nagla J.R. Mass transfer enhancement through optimized extraction of a natural dye from *Bougainvillea glabra* Juss. bracts. *Indian J Nat Prod Resour*. 2014, V. 5, no. 4, pp. 332–337.
37. Sverdlova O.V. *Electronic spectra in organic chemistry*. Leningrad, Chemistry Publ., 1985, 248 p. (In Russian)
38. Demchenko A.P. *Ultraviolet spectrophotometry and protein structure*. Kiev, Naukova dumka Publ., 1981, 208 p. (In Russian)
39. Sokolova D.V., Solovieva A.E., Shelenga T.V. Primary metabolites and betanin: Their interplay in the roots of table beet (*Beta vulgaris* L.). *Vegetable Crops of Russia*. 2023, no. 2, pp. 54–64. DOI: 10.18619/2072-9146-2023-2-54-64.
40. Silverstein R., Webster F., Kimle D. Spectrometric identification of organic compounds. Moscow, BINOM. Laboratory of Knowledge Publ. 2012, 557 p. (In Russian)

41. Prech E., Bjulmann F., Affolter K. Structure determination of organic compounds. Tables of spectral data. Moscow, BINOM. Laboratory of Knowledge Publ., 2006, 439 p. (In Russian)
42. Kanou M., Nakanishi K., Hashimoto A., Kameoka T. Influences of monosaccharides and its glycosidic linkage on infrared spectral characteristics of disaccharides in aqueous solutions. *Applied Spectroscopy*. 2005, V. 59, no. 7, pp. 885–892. DOI: 10.1366/0003702054411760
43. Nechiporenko A.P., Sitnikova V.E., Nechiporenko U.Yu., Konovalenko A.V. Fourier Infrared spectroscopy in the study of manifestations of sperm pathology. *Vestnik of Saint Petersburg University. Medicine*. 2023, V. 18, no. 3, pp. 233–257. DOI: 10.21638/spbu11.2023.302. (In Russian)
44. Nechiporenko A.P., Vezo O.S., Nechiporenko U.Yu., Plotnikova L.V., Sitnikova V.E., Ukraintseva P.I., Plotnikov P.P. Optical properties of honey: FTIR spectroscopy and refractometry. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2021, V. 11, no. 4, pp. 627–641. DOI: 10.21285/2227-2925-2021-11-4-627-641. (In Russian)
45. Nechiporenko A.P., Plotnikova L.V., Vezo O.S., Sitnikova V.E. Fournier method of IR-spectroscopy in the study of the anomeric purity of α - and β -forms of crystalline D (+)-glucopyranoses. *Processes and Food Production Equipment*. 2024, no. 1, pp. 25–34. DOI: 10.17586/2310-1164-2024-17-1-25-34. (In Russian)
46. Le-Deygen I.M., Skuredina A.A., Kudryashova E.V. Experimental methods to study the mechanisms of interaction of lipid membranes with low-molecular-weight drugs. *Russian Journal Bioorganic Chemistry*. 2020, V. 46, no. 4, pp. 480–497. DOI: 10.1134/S1068162020040123. (In Russian)

Информация об авторах

Роман Евгеньевич Кудинов – аспирант факультета биотехнологий

Марианна Игоревна Кременевская – д-р техн. наук, доцент

Вера Евгеньевна Ситникова – канд. хим. наук, доцент

Александр Валентинович Федоров – д-р техн. наук, заместитель директора по научной работе

Information about the authors

Roman E. Kudinov, Postgraduate Student of the Faculty of Biotechnology

Marianna I. Kremenevskaya, Dr. Sci. Eng., Associate Professor

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

Alexandr V. Fedorov, Dr. Sci. Eng., Deputy Director for Research

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

Статья поступила в редакцию 18.07.2025

Одобрена после рецензирования 22.08.2025

Принята к публикации 01.09.2025

The article was submitted 18.07.2025

Approved after reviewing 22.08.2025

Accepted for publication 01.09.2025