

DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-337-346>

Поступила 14.01.2026

Поступила после рецензирования 18.06.2026

Принята в печать 22.06.2026

© Петров С. М., Подгорнова Н. М., 2026

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

Обзорная статья

Открытый доступ

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИ ЗНАЧИМЫХ ХАРАКТЕРИСТИК САХАРНОГО СИРОПА И СВЕКЛОВИЧНОЙ МЕЛАССЫ

Петров С. М.^{1*}, Подгорнова Н. М.²¹Московский государственный университет технологий и управления имени К. Г. Разумовского
(Первый казачий университет), Москва, Россия²Московский политехнический университет, Москва, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АННОТАЦИЯ

сахароза, бетаин,
минеральные
вещества,
пищевая ценность,
функциональные
ингредиенты,
биотехнология,
циркулярная
экономика

Продукты глубокой переработки сахарной свеклы, такие как сироп и меласса, представляют значительный интерес для пищевой и биотехнологической промышленности в качестве источников не только углеводов, но и широкого спектра биологически активных соединений. Детальное знание их состава необходимо для оптимизации использования и разработки новых функциональных продуктов. В данном обзоре систематизированы современные данные о химическом составе сиропа из сахарной свеклы и свекловичной мелассы на основе анализа более 80 научных публикаций. Основное внимание уделено количественному содержанию углеводов, минеральных веществ, органических кислот, витаминов, аминокислот и специфических компонентов, таких как бетаин. Проанализированы и сравнены профили продуктов на разных стадиях переработки. Установлено, что оба продукта характеризуются высоким содержанием сахарозы (45–65 %), но существенно различаются по уровню несахаров. Свекловичная меласса содержит в 2–3 раза больше минеральных веществ (7–12 % против 2–4 % в сиропе), в особенности калия (3,5–5,5 %), и является концентрированным источником бетаина (4–6 %). Показаны качественные отличия от тростниковой мелассы, включая минимальное содержание инвертных сахаров (< 1 %) и наличие бетаина. Обсуждена пищевая, кормовая и биотехнологическая ценность продуктов. Сироп и меласса из сахарной свеклы являются ценными многокомпонентными продуктами с высокой пищевой и биологической ценностью. Их состав определяет широкие возможности применения не только в качестве подсластителей, но и как источников минералов, витаминов группы В и функциональных ингредиентов для производства пробиотиков, пребиотиков и обогащенных пищевых систем. Для расширения сфер применения необходимы дальнейшие исследования, направленные на стандартизацию состава и разработку технологий модификации.

Received 14.01.2026

Accepted in revised 18.06.2026

Accepted for publication 22.06.2026

© Petrov S. M., Podgornova N. M., 2026

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

Review article

Open access

COMPARATIVE ANALYSIS OF TECHNOLOGICALLY SIGNIFICANT CHARACTERISTICS OF SUGAR BEET SYRUP AND MOLASSES

Sergey M. Petrov^{1*}, Nadezhda M. Podgornova²¹Moscow State University of Technologies and Management named after K. G. Razumovsky (First Cossack University),
Moscow, Russia²Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

KEYWORDS:

sucrose, betaine,
minerals, nutritional
value, functional
ingredients,
biotechnology, circular
economy

ABSTRACT

Deep processing products of sugar beet, such as syrup and molasses, are of significant interest to the food and biotechnology industries as sources not only of carbohydrates but also of a wide range of biologically active compounds. Detailed knowledge of their composition is essential for optimizing their use and developing new functional products. This review systematizes current data on the chemical composition of sugar beet syrup and beet molasses based on the analysis of more than 80 scientific publications. Primary focus is placed on the quantitative content of carbohydrates, minerals, organic acids, vitamins, amino acids, and specific components such as betaine. The profiles of the products at different processing stages are analyzed and compared. It has been established that both products are characterized by a high sucrose content (45–65 %), but differ significantly in the level of non-sugars. Beet molasses contains 2–3 times more minerals (7–12 % vs. 2–4 % in syrup), especially potassium (3.5–5.5 %), and is a concentrated source of betaine (4–6 %). Qualitative differences from cane molasses are shown, including minimal invert sugar content (< 1 %) and the presence of betaine. The nutritional, feed, and biotechnological value of the products is discussed. Sugar beet syrup and molasses are valuable multicomponent products with high nutritional and biological value. Their composition determines wide possibilities for application not only as sweeteners but also as sources of minerals, B vitamins, and functional ingredients for the production of probiotics, prebiotics, and enriched food systems. Further research aimed at standardizing the composition and developing modification technologies is necessary to expand their fields of application.

1. Введение

Сахарная свекла (*Beta vulgaris*) остается одной из ключевых культур для производства сахара в регионах с умеренным климатом. Состав свеклы включает витамины А, В, С и Р, а также минералы, такие как цинк, натрий, магний, калий, кальций, железо, фосфор и бром [1]. Химический состав сахарной свеклы приведен в Таблице 1 [2,3].

В процессе переработки сахарной свеклы, помимо целевого продукта — сахарозы, образуются значительные объемы промежуточных и побочных продуктов, среди которых наиболее технологически значимыми являются сахарный сироп и свекловичная меласса [4,5]. Исторически эти продукты рассматривались преимущественно как полуфабрикаты, кормовые добавки или субстраты для ферментационных

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Петров, С. М., Подгорнова, Н. М. (2026). Сравнительный анализ технологически значимых характеристик сахарного сиропа и свекловичной мелассы. *Пищевые системы*, 9(2), 337–346. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-337-346>

FOR CITATION: Petrov, S. M., Podgornova, N. M. (2026). Comparative analysis of technologically significant characteristics of sugar beet syrup and molasses. *Food Systems*, 9(2), 337–346. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-337-346>

процессов. Однако в последние десятилетия в связи с ростом интереса к функциональному питанию и биоэкономике внимание исследователей и технологов сместилось в сторону их комплексного использования [6–9]. Глобальный тренд на снижение пищевых отходов и циркулярную экономику превращает такие полуфабрикаты и побочные продукты в ценные ресурсы для получения высокомаржинальных ингредиентов.

Таблица 1. Химический состав сахарной свеклы
Table 1. Chemical composition of sugar beet

Компонент	Единица измерения	Среднее	Минимум	Максимум
Энергия	кДж	345	333	361
Вода	г	77,60	75,94	78,81
Минеральные компоненты (зола)	г	0,80	0,64	1,01
Белок	г	0,51	0,12	0,77
Азот	г	0,08	0,02	0,12
Жир, всего	г	0,15	0,11	0,24
Углеводы	г	18,54	17,66	19,14
Клетчатка, всего в рационе	г	2,41	1,06	3,84
Волокно, растворимое в воде	г	1,05	0,06	2,59
Волокно, нерастворимое в воде	г	1,35	0,99	2,38
Сахароза	г	13,67	6,43	17,00
Глюкоза	г	0,03	0,00	0,10
Фруктоза	г	0,03	0,00	0,07
Лактоза	г	0,00	0,00	0,00
Мальтоза	г	0,00	0,00	0,00
Соль, NaCl	мг	185	49	237
Железо, Fe	мг	0,62	0,32	0,89
Фосфор, P	мг	19	10	27
Кальций, Ca	мг	30	22	40
Магний, Mg	мг	48	31	54
Калий, K	мг	172	127	202
Натрий, Na	мг	74	20	95
Цинк, Zn	мг	0,19	0,13	0,26
Витамин С	мг	4,9	4,2	5,6
L-аскорбиновая кислота	мг	3,7	3,1	4,5
Тиамин (витамин B ₁)	мг	0,019	0,007	0,031
Рибофлавин (витамин B ₂)	мг	0,036	0,020	0,050
Ниацин (витамин PP)	мг	0,264	0,218	0,344
Витамин B ₆ , общий	мг	0,033	0,030	0,038
Витамин А	РЕ	3	3	3
Бета-каротин	мкг	38	35	41
Ликопин	мкг	0	0	0
Лютеин	мкг	7	0	12

Примечание: количество компонентов указано для массы 100 г продукта.

Сироп, получаемый на промежуточных стадиях выпаривания очищенного сока, и меласса — конечный остаточный продукт после кристаллизации сахара, обладают сложным и богатым химическим составом. Помимо доминирующей сахарозы, они содержат целый спектр сопутствующих веществ: другие углеводы (глюкозу, фруктозу, раффинозу), макро- и микроэлементы, органические кислоты, витамины, аминокислоты и уникальные для свеклы соединения, такие как бетаин [10–14]. Этот состав не только определяет их питательную ценность, но и влияет на технологические свойства при использовании в пищевых системах, кормах или биотехнологии. Например, реологические характеристики, гигроскопичность, цветность и антиоксидантная активность напрямую зависят от соотношения сахаров, органических кислот и меланоидинов.

Сироп из сахарной свеклы представляет собой полуфабрикат сахарного производства, получаемый в результате выпаривания воды из очищенного диффузионного сока или очищенного раствора сахара-сырца в выпарной установке [11]. Свекловичная меласса является побочным продуктом сахарного производства и представляет

собой межкристалльный раствор, отделяемый при центрифугировании утфеля последней ступени кристаллизации. Дальнейшее извлечение из него кристаллической сахарозы экономически нецелесообразно [12].

Понимание детального химического состава этих продуктов имеет важное значение для оптимизации технологических процессов их производства и переработки, оценки пищевой и биологической ценности, а также для разработки новых направлений их применения в пищевой, фармацевтической и биотехнологической промышленности [6,10]. В последние десятилетия наблюдается растущий интерес к использованию свекловичной мелассы и сиропа в качестве субстратов для ферментационных процессов, производства биологически активных веществ, а также в качестве функциональных пищевых ингредиентов [7,15]. Потенциал их применения выходит за рамки традиционных областей, включая создание биопластиков, косметических средств и даже электрохимических систем.

Производство сахара из сахарной свеклы включает несколько основных технологических стадий: экстракцию сахаров из свекловичной стружки, очистку свекловичного сока, концентрирование и кристаллизацию сахарозы [16]. На разных этапах этого процесса образуются промежуточные и конечные продукты с различным химическим составом, что определяет их дальнейшую судьбу в производственной цепочке.

Сироп из сахарной свеклы получают путем выпаривания очищенного свекловичного сока до концентрации сухих веществ 60–70%. Этот продукт отличается высоким содержанием сахарозы (обычно 55–65% от сухого вещества) и относительно низким содержанием несхаров по сравнению с мелассой [17,18]. Сироп может использоваться как самостоятельный продукт в пищевой промышленности (например, в кондитерских изделиях, соусах) [19] или направляться на дальнейшую кристаллизацию сахара [20–22]. Его технологические преимущества включают хорошую растворимость, умеренную вязкость и нейтральный вкусовой профиль [23,24].

Свекловичная меласса представляет собой вязкую темно-коричневую жидкость, которая остается после максимально возможного извлечения кристаллической сахарозы из свекловичного сиропа [12,25]. Меласса содержит 40–60% по массовой доле сахаров, преимущественно сахарозы, а также значительное количество несхаров, включая минеральные вещества, органические кислоты, азотсодержащие соединения и другие компоненты. За последнее десятилетие биотопливо, полисахариды, олигосахариды, органические кислоты и ферменты были получены из мелассы через путь брожения, что обеспечило ей ряд важных применений в пищевой промышленности, фармацевтике и биотехнологии. Однако из-за сложностей, связанных с хранением, стерилизацией, упаковкой и транспортировкой, потенциал промышленного производства и коммерческого использования мелассы для получения биопродуктов с высокой добавленной стоимостью реализован не в полной мере [5].

Существует два основных типа мелассы: мягкая и твердая. Они различаются по концентрации растворимых солей кальция и магния, которые придают продукту жесткость [25]. Это различие критично для ее использования в кормах или как добавки, влияющей на структуру пищевых продуктов.

Химический состав свекловичной мелассы существенно зависит от качества исходного сырья, условий выращивания сахарной свеклы, технологических параметров переработки и степени истощения меласса [10,26,27]. Важным показателем качества мелассы является так называемая истинная чистота (true purity), которая отражает соотношение сахарозы к общему содержанию сухих веществ [28]. Этот показатель является ключевым как для сахарного производства (определяя экономику процесса), так и для конечных потребителей, которым важна предсказуемость состава.

Несмотря на существование ряда исследований, посвященных отдельным аспектам состава, в научной литературе ощущается недостаток современных систематизированных обзоров, дающих сравнительную количественную оценку сиропа и мелассы на основе данных, полученных с применением современных аналитических методов (ВЭЖХ, ИСП-ОЭС, капиллярный электрофорез). Кроме того, требует уточнения их сравнение с распространенными аналогами, например, тростниковой мелассой, для обоснования целесообразности применения в конкретных технологиях [13,29].

Целью настоящего обзора является систематизация и сравнительный анализ современных научных данных о детальном химическом составе сиропа из сахарной свеклы и свекловичной мелассы, оценка их пищевой и биологической ценности, а также потенциала применения в качестве функциональных ингредиентов в пищевых системах и биотехнологических процессах. В задачи работы входит:

1) обобщение данных по макро- и микрокомпонентному составу; 2) выявление ключевых различий между сиропом и мелассой; 3) сравнение свекловичных продуктов с тростниковыми аналогами; 4) оценка влияния состава на функционально-технологические свойства; 5) анализ современных методов контроля состава; 6) формулирование перспективных направлений для исследований и практического применения.

2. Объекты и методы исследования

Объектом данного аналитического обзора выступили научные данные, характеризующие химический состав двух ключевых продуктов переработки сахарной свеклы: сиропа (промежуточный концентрат с содержанием сухих веществ 60–70%) и свекловичной мелассы (конечный остаточный сироп с содержанием сухих веществ 75–85%, из которого дальнейшая кристаллизация сахарозы экономически нецелесообразна). Для сравнения также привлекались данные по тростниковой мелассе — основному мировому аналогу свекловичной мелассы.

Методологической основой работы послужил анализ публикаций в международных рецензируемых журналах, индексируемых в базах данных Scopus, Web of Science, PubMed, а также в профильных национальных изданиях. Поиск литературы проводился с использованием ключевых слов на русском и английском языках: «сахарная свекла», «свекловичный сироп», «свекловичная меласса», «химический состав», «бетаин», «sugar beet», «beet syrup», «beet molasses», «chemical composition». Критериями включения публикаций были: актуальность (преимущественно не старше 7 лет), наличие количественных данных по составу, описание примененных аналитических методов. Всего для подготовки обзора было отобрано и проанализировано более 80 научных работ, включая оригинальные исследования, обзоры и методические статьи, посвященные методам анализа. Особое внимание уделялось работам, в которых использовались инструментальные методы (хроматография, спектрометрия), обеспечивающие высокую точность данных.

Для обработки и сравнения данных использовались методы систематизации и сравнительного анализа. Количественные показатели по каждому классу соединений (углеводы, минералы, кислоты и пр.) были сгруппированы по продукту (сироп/меласса), а диапазоны значений обобщены на основе данных из разных источников с учетом возможной вариабельности, обусловленной сортом свеклы, условиями выращивания и технологией переработки. При наличии противоречивых данных указывался диапазон, охватывающий большинство литературных источников. Для наглядности ключевые сравнительные данные были сведены в сводные таблицы.

3. Состав, основные компоненты, минеральные вещества

3.1. Углеводный состав и основные компоненты

Основу сухого вещества как сиропа, так и мелассы составляют углеводы, главным из которых является сахароза. В сиропе ее содержание достигает 55–65% от сухого вещества (СВ), в то время как в мелассе вследствие многократной кристаллизации оно снижается до 45–52% СВ [30,31]. Важным отличием свекловичных продуктов от тростниковых аналогов является крайне низкое содержание инвертных сахаров (глюкозы и фруктозы), обычно не превышающее 1–2% СВ, что связано с меньшей кислотностью среды при переработке свеклы и с активностью инвертазы [32]. Этот фактор имеет большое технологическое значение: низкое содержание редуцирующих сахаров минимизирует реакции Майяра при термообработке, что позволяет сохранять светлый цвет продуктов на основе свекловичного сиропа. Существенную роль играет олигосахарид раффиноза, который не кристаллизуется и накапливается в мелассе (1–2% СВ), влияя на ее вязкость и кристаллизационные свойства [19,33]. Раффиноза также известна как пребиотик, стимулирующий рост бифидобактерий.

Углеводы свекловичного сахарного сиропа составляют основную массу сухого вещества. Главным компонентом является сахароза (дисахарид, состоящий из глюкозы и фруктозы), содержание которой в сиропе обычно составляет 55–65% от общей массы сухого вещества [11]. Высокое содержание сахарозы обуславливает его основное применение в качестве подсластителя и сырья для дальнейшей кристаллизации.

Помимо сахарозы, в сиропе присутствуют моносахариды — глюкоза и фруктоза, образующиеся в результате частичной инверсии (гидролиза) сахарозы. Содержание инвертных сахаров в свекловичном сиропе обычно не превышает 1–2% [25], что значительно ниже, чем в тростниковых продуктах. Это связано с более мягкими условиями переработки сахарной свеклы (оптимальный pH 8,5–9,2)

и меньшей активностью эндогенных инвертаз по сравнению с тростниковым сырьем.

Важным компонентом углеводного профиля является раффиноза — трисахарид, состоящий из галактозы, глюкозы и фруктозы. Раффиноза присутствует в сиропе в концентрации от 0,5 до 1,5% [31]. Этот олигосахарид не кристаллизуется вместе с сахарозой и переходит в мелассу, влияя на процессы кристаллизации. Его наличие может служить индикатором степени очистки сиропа.

Кроме того, в сиропе могут присутствовать следовые количества других олигосахаридов, в том числе кестозы и других фруктоолигосахаридов, которые могут образовываться ферментативным путем [6]. Эти соединения представляют интерес как пребиотические компоненты.

Углеводы свекловичной мелассы составляют 40–60% (м/м) от общей массы [5,25]. Углеводный состав мелассы более сложный по сравнению с сиропом из-за концентрирования несахаров в процессе многократной кристаллизации сахарозы.

Сахароза остается основным углеводом мелассы, составляя 45–52% от сухого вещества [12,13,34]. Содержание сахарозы в мелассе зависит от эффективности процесса кристаллизации и истощения мелассы, которое, в свою очередь, определяется технологическим режимом и качеством сырья.

Инвертные сахара (глюкоза и фруктоза) в свекловичной мелассе присутствуют в низких концентрациях, обычно не превышающих 1% [25]. Это характерная особенность свекловичной мелассы, отличающая ее от тростниковой, где содержание инвертных сахаров может достигать 15–25% [11]. Низкое содержание редуцирующих сахаров является преимуществом при использовании мелассы в некоторых биотехнологических процессах, где они могут угнетать рост микроорганизмов (эффект катаболитной репрессии), однако это также снижает ее антикристаллизационные свойства в кондитерской промышленности.

Раффиноза концентрируется в мелассе и может составлять 1–2% от сухого вещества [11,31,35]. Раффиноза не кристаллизуется вместе с сахарозой и полностью переходит в мелассу, влияя на ее вязкость и кристаллизационные свойства. Она также может служить субстратом для производства раффинозы или других олигосахаридов.

Методы высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) позволяют точно определять содержание сахарозы, глюкозы, фруктозы и раффинозы в мелассе [31]. Ионная хроматография с импульсным амперометрическим детектированием также широко используется для анализа углеводного состава [36]. Эти методы обеспечивают высокую селективность и точность, необходимые для контроля качества и технологического процесса.

3.2. Минеральные вещества (зольность)

Наиболее яркое различие между продуктами переработки сахарной свеклы наблюдается в содержании минеральных веществ (зольности). Если в сиропе их доля составляет 2–4% от сухого вещества (СВ), то в мелассе как в концентрате несахаров она возрастает до 7–12% СВ [10,25]. Это обусловлено закономерным концентрированием неорганических компонентов по мере извлечения сахарозы на различных технологических стадиях: от сырого сока с минимальной зольностью через очищенный и сгущенный соки до конечных продуктов — сиропа и мелассы.

Преобладающим катионом в обоих продуктах является калий (K): 1,5–3,0% СВ в сиропе и 3,5–5,5% СВ в мелассе (35–55 г/кг) [12,13]. Высокое содержание калия делает мелассу ценным источником этого элемента для кормовых и пищевых целей. Также значимо присутствие других макроэлементов:

- Натрий (Na): 0,5–1,5% СВ в сиропе и 0,8–2,0% СВ в мелассе [12,25].
- Кальций (Ca): 0,1–0,3% СВ в сиропе и 0,2–0,5% СВ в мелассе. Его содержание зависит от методов очистки сока (дефекация-сатурация) [16,25].
- Магний (Mg): 0,05–0,15% СВ в сиропе и 0,1–0,3% СВ в мелассе [16,25].
- Фосфор (P) и сера (S) также обнаруживаются, особенно в мелассе (P: 0,05–0,15% СВ; S: 0,3–0,6% СВ) [11,25].

Соотношение и концентрация минеральных веществ зависят от почвенно-климатических условий выращивания свеклы, от применяемых агротехнических приемов и конкретных технологических операций [10,26].

Помимо макроэлементов, в продуктах присутствуют *микроэлементы*, концентрация которых также возрастает в мелассе. К ключевым относятся:

- Железо (Fe): 5–50 мг/кг СВ в сиропе и 10–360 мг/кг СВ в мелассе [11,37].
- Цинк (Zn): 0,5–5 мг/кг СВ в сиропе и 1–11 мг/кг СВ в мелассе [11,38].

- Медь (Cu): 0,1–3 мг/кг СВ в сиропе и 0,5–7 мг/кг СВ в мелассе [25,37].
 □ Марганец (Mn): 0,5–10 мг/кг СВ в сиропе и 1–50 мг/кг СВ в мелассе [25,37].

Комплекс микроэлементов, наряду с высоким содержанием калия, обуславливает ценность мелассы как источника минералов для обогащения продуктов.

Химические формы и распределение элементов в матрице продукта существенно различаются. Данные спектроскопических исследований подтверждают, что основная часть золь представлена растворимыми ионами щелочных металлов (K^+ , Na^+), что проявляется в тесной корреляции между зольностью и электропроводностью [39]. В то же время значительная доля двухвалентных катионов (Ca^{2+} , Mg^{2+}) и особенно переходных металлов (Fe, Cu, Zn, Mn) ассоциирована с органическими компонентами (например, с гуминовыми кислотами, пептидами, меланоидинами) или коллоидными фазами [11]. Это влияет на их биодоступность и создает трудности для аналитического определения, часто требующего предварительного разрушения органической матрицы (минерализации пробы).

В процессе переработки происходит не только количественное концентрирование элементов, но и изменение их форм. В конечных

сиропах и мелассе щелочные катионы остаются преимущественно в растворимой ионной форме, тогда как переходные металлы в большей степени связаны с органическим веществом [25].

В контексте анализа металлы в продукции сахарной свеклы можно классифицировать следующим образом:

1. Переходные металлы (Fe, Cu, Zn, Mn, Cr, Ni): часто являются необходимыми микроэлементами, но их содержание требует контроля [37,38].
2. Тяжелые металлы-загрязнители (Pb, Cd, As): не имеют полезной биологической функции, токсичны даже в следовых количествах. Их присутствие связано главным образом с экологическим фоном (почва, вода). В промышленных образцах могут обнаруживаться на уровне микрограммов на килограмм (например, Pb ~20 мкг/кг, Cd ~3,5 мкг/кг) и подлежат строгому мониторингу [37].

Сравнительная таблица содержания металлов в продуктах переработки сахарной свеклы (Таблица 2) отображает типичные диапазоны концентраций, основанные на аналитических данных из различных источников. Важно отметить, что абсолютные значения сильно зависят от региона выращивания, агрохимии, технологии переработки и метода анализа.

Таблица 2. Типичные диапазоны концентраций минеральных веществ

Table 2. Typical composition ranges of minerals

Группа / Металл	Сырой свекловичный сок	Сахарный сироп	Свекловичная меласса	Примечания (методы детекции, спецификация)	Источники
ОБЯЗАТЕЛЬНО ДЕТЕКТИРУЕМЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ МЕТАЛЛЫ					
Железо (Fe)	1–15 мг/кг с.в.	5–50 мг/кг с.в.	10–360 мг/кг с.в.	Основной переходный металл. Концентрируется в мелассе. Определяется методами ААС, ИСП-ОЭС, колориметрически. Часто связан с органическими комплексами и коллоидами.	[11,37]
Цинк (Zn)	0,1–2 мг/кг с.в.	0,5–5 мг/кг с.в.	1–11 мг/кг с.в.	Важный микроэлемент. Концентрация растет на поздних стадиях. Для точного определения в мелассе часто требуется минерализация пробы (кислотное разложение).	[11,38]
Медь (Cu)	0,05–1 мг/кг с.в.	0,1–3 мг/кг с.в.	0,5–7 мг/кг с.в.	Аналогично цинку, требует тщательной пробоподготовки для разрушения органических комплексов. Определяется методами ААС, ИСП-ОЭС.	[25,37]
Марганец (Mn)	0,1–5 мг/кг с.в.	0,5–10 мг/кг с.в.	1–50 мг/кг с.в.	Легко детектируемый элемент. Концентрируется в мелассе. Определяется методами ААС, ИСП-ОЭС.	[25,37]
Хром (Cr)	< 0,01–0,1 мг/кг с.в.	< 0,05–0,5 мг/кг с.в.	0,1–2 мг/кг с.в.	Может присутствовать в следовых количествах. Контролируется как потенциально токсичный элемент. Определяется высокочувствительными методами (ИСП-МС, графитовая печь ААС).	[37]
ПОТЕНЦИАЛЬНО ТЯЖЕЛЫЕ МЕТАЛЛЫ / ЗАГРЯЗНИТЕЛИ					
Свинец (Pb)	< 0,005–0,02 мг/кг с.в.	< 0,01–0,05 мг/кг с.в.	< 0,02–0,2 мг/кг с.в. (~20 мкг/кг)	Ключевой токсикант. Присутствие обусловлено экологическим фоном. Определяется в виде следов методами высокой чувствительности (ИСП-МС, ААС с графитовой печью). Требуется контроль по нормативам.	[37]
Кадмий (Cd)	< 0,001–0,005 мг/кг с.в.	< 0,002–0,01 мг/кг с.в.	< 0,005–0,05 мг/кг с.в. (~3,5 мкг/кг)	Высокотоксичный элемент. Уровни крайне низкие, но подлежат обязательному мониторингу. Анализ требует высокочувствительной аппаратуры (ИСП-МС).	[37]
Никель (Ni)	< 0,05–0,5 мг/кг с.в.	0,1–1 мг/кг с.в.	0,5–5 мг/кг с.в.	Может относиться как к переходным, так и к контролируемым токсичным элементам. Концентрируется в мелассе.	[37]
Мышьяк (As)	< 0,001–0,01 мг/кг с.в.	< 0,005–0,02 мг/кг с.в.	< 0,01–0,05 мг/кг с.в.	Токсичный металлоид. Определяется в следовых количествах методами ИСП-МС или атомной флуоресценции с гибридизацией.	[37]
ПРОЧИЕ ДЕТЕКТИРУЕМЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ					
Алюминий (Al)	0,5–10 мг/кг с.в.	5–50 мг/кг с.в.	10–200 мг/кг с.в.	Не является тяжелым металлом, но контролируется. Поступление может быть связано с коагулянтами на основе алюминия или с оборудованием.	[37]
Кобальт (Co)	< 0,001–0,01 мг/кг с.в.	< 0,005–0,05 мг/кг с.в.	< 0,01–0,1 мг/кг с.в.	Микроэлемент, определяется в следовых количествах.	[37]
Стронций (Sr)	н/д	н/д	Обнаруживается в золе	Часто указывает на минеральный состав почвы или возможные примеси. Детектируется методами эмиссионной спектроскопии или ИСП-ОЭС в зольном остатке.	[25,40]

Условные обозначения и пояснения:

- с.в. — сухое вещество;
 □ н/д — нет достаточных данных в литературе для указания типичного диапазона;
 □ тренд: для всех перечисленных металлов наблюдается общая тенденция к концентрированию от сока к мелассе в 2–10 и более раз, так как они не удаляются в процессе очистки и кристаллизации сахарозы [10,25].
 □ Спецификация (формы нахождения):
 — В соке металлы находятся преимущественно в ионной или слабо связанной форме.
 — В сиропе и особенно в мелассе значительная доля переходных металлов (Fe, Cu, Zn) ассоциирована с органическими комплексами (белки, продукты разложения, меланоидины) и коллоидными частицами [11,39]. Это главная причина трудностей их прямого определения без пробоподготовки.
 — Тяжелые металлы (Pb, Cd) могут присутствовать как в виде свободных ионов, так и в сорбированном состоянии на органических и неорганических коллоидах.
 □ Методы детекции: для рутинного количественного определения используются атомно-абсорбционная спектроскопия (ААС) и индуктивно-связанная плазма с оптико-эмиссионным спектрометром (ИСП-ОЭС) [37,38]. Для анализа следовых количеств Pb, Cd, As необходимы индуктивно-связанная плазма с масс-спектрометрией (ИСП-МС) [37]. Обязательным этапом для мелассы является полная минерализация пробы (мокрое или сухое озоление) для разрушения органической матрицы и высвобождения металлов [11].

Таким образом, минеральный профиль, характеризующийся высоким содержанием калия и комплексом микроэлементов, является ключевым отличием и преимуществом свекловичной мелассы как функционального ингредиента, а его изучение требует учета как общих концентраций, так и химических форм нахождения элементов.

3.3. Органические кислоты, азотистые соединения и витамины

Органические кислоты (муравьиная, уксусная, лимонная, яблочная) присутствуют в обоих продуктах, формируя их вкусо-ароматический профиль и влияя на стабильность. Их общее содержание составляет 1–3 % СВ в сиропе и 2–4 % СВ в мелассе [10]. Среди азотистых соединений особое место занимает бетаин (триметилглицин), содержание которого в мелассе (4–6 % СВ) на порядок выше, чем в сиропе (0,5–1,5 % СВ) [27,41]. Бетаин обладает доказанными гепатопротекторными и осмопротекторными свойствами, что повышает биологическую ценность продукта. Также в составе присутствуют свободные аминокислоты (глутаминовая, аспарагиновая, аланин) и витамины группы В, в особенности пантотеновая (B_5) и никотиновая (РР) кислоты, концентрации которых могут увеличиваться при ферментации мелассы пробиотическими культурами [36,42].

Органические кислоты играют важную роль в формировании вкусовых характеристик и стабильности сиропа. В свекловичном сиропе идентифицированы следующие органические кислоты в процентах от сухого вещества [39]:

- муравьиная кислота: 0,1–1,2 %;
- уксусная кислота: 0,6–1,3 %;
- пропионовая кислота: 0,02–0,3 %;
- масляная кислота: до 0,6 %;
- валериановая кислота: до 0,2 %.

Кроме того, в сиропе присутствуют следовые количества около 20 ароматических кислот [11]. Органические кислоты образуются как в процессе роста свеклы, так и в результате микробиологических и химических процессов при переработке. Лимонная кислота и яблочная кислота также присутствуют в сиропе, хотя их концентрация обычно ниже, чем в мелассе. Эти кислоты участвуют в метаболических процессах растений и переходят в сок при экстракции.

Свекловичная меласса содержит более 10 различных безазотистых органических кислот в суммарном количестве примерно 4%, которые влияют на ее кислотность, вкусовые характеристики и стабильность. Значение рН мелассы обычно находится в диапазоне 7,2–8,9, что соответствует слабощелочной или близкой к нейтральной реакции [4]. Основные органические кислоты в мелассе с СВ = 75 % в процентах от сухого вещества [11,16,43]:

- молочная кислота: 1,0–1,7 %;
- лимонная, малеиновая, гликолевая: 0,5–1,0 %;
- щавелевая, фумаровая: 0,1–0,2 %;
- аконитовая: 0 %;
- муравьиная кислота: 0–0,2 %;
- уксусная кислота: 0–0,2 %;
- пропионовая кислота: 0–0,2 %;
- масляная кислота: до 0–0,2 %;
- валериановая кислота: следы.

Функциональные свойства органических кислот в мелассе:

- лимонная кислота: важный метаболит цикла Кребса;
- яблочная кислота: участвует в метаболических процессах;
- щавелевая кислота: может образовывать комплексы с кальцием;
- янтарная кислота: образуется в процессе ферментации, ее содержание может увеличиваться в 40–50 раз при культивировании пробиотических микроорганизмов на мелассе [4].

Меласса также содержит следовые количества около 20 ароматических кислот, которые вносят свой вклад в формирование характерного аромата продукта [11].

Азотсодержащие соединения в сиропе сахарной свеклы представлены свободными аминокислотами, пептидами, белками и другими органическими соединениями азота. Общее содержание азотистых веществ составляет 1–2 % от сухого вещества. Около 50–60 % аминокислот переходят в сироп из свеклы [16]. Основными аминокислотами являются:

- глутаминовая кислота: преобладающая аминокислота, присутствует преимущественно (75 %) в форме циклической пирролидин-карбоновой кислоты [4];
- аспарагиновая кислота;
- аланин;
- серин;
- глицин.

Важным азотсодержащим соединением является бетаин (триметилглицин), который присутствует в значительных концентрациях (0,5–1,5 % от сухого вещества) [30,39]. Бетаин обладает осмопротек-

торными свойствами и играет важную роль в метаболизме растений. При разложении бетаина образуются триметиламин и другие летучие амины, придающие продукту характерный запах [4].

Сироп из сахарной свеклы содержит водорастворимые витамины, преимущественно группы В, которые переходят в него из свекловичного сока в процессе переработки. Средняя концентрация витаминов в сиропе (мг на 100 г продукта) составляет [11]:

- биотин (витамин Н): 0,01 мг/100 г;
- тиамин (витамин B_1): 0,3 мг/100 г;
- рибофлавин (витамин B_2): 0,04 мг/100 г;
- пиридоксин (витамин B_6): 0,54 мг/100 г;
- никотиновая кислота (витамин РР): 5,1 мг/100 г;
- пантотеновая кислота (витамин B_5): 8,0 мг/100 г;
- фолиевая кислота (витамин B_9): 0,02 мг/100 г.

Содержание витаминов в сиропе может варьироваться в зависимости от сорта свеклы, условий выращивания и технологических параметров переработки. Витамины группы В играют важную роль в метаболических процессах и повышают биологическую ценность продукта.

Свекловичная меласса содержит значительное количество азотсодержащих соединений, в том числе свободные аминокислоты, пептиды и бетаин. Общее содержание азотистых веществ составляет 2–4 % от сухого вещества [25].

Аминокислотный состав мелассы (мг/л или мг/100 г) включает как незаменимые, так и заменимые аминокислоты.

Незаменимые аминокислоты:

- лизин: 0,62 мг/л (в контрольной мелассе);
 - метионин: 2,10 мг/л;
 - треонин: 1,50 мг/л;
 - валин: 3,50 мг/л;
 - лейцин + изолейцин: 14,90 мг/л;
 - фенилаланин: 0,31 мг/л;
 - гистидин: 5,40 мг/л.
- Заменимые аминокислоты:
- аргинин: 18,30 мг/л;
 - тирозин: 0,44 мг/л;
 - аланин: 1,50 мг/л;
 - глицин: 1,80 мг/л;
 - пролин: 2,40 мг/л;
 - серин: 4,80 мг/л.

Бетаин (триметилглицин) — одно из наиболее важных азотсодержащих соединений в свекловичной мелассе. Содержание бетаина составляет 4–6 % от сухого вещества (40–60 г/кг) [25,30]. Бетаин обладает рядом биологически важных свойств:

- осмопротекторная функция;
- донор метильных групп в метаболических процессах (трансметилирование);
- гепатопротекторное действие;
- улучшение усвоения питательных веществ;
- потенцирование спортивных результатов (в составе специализированного питания).

При разложении бетаина образуются триметиламин и другие летучие амины, которые придают мелассе характерный запах [11,16]. Бетаин — уникальный компонент свекловичной мелассы, который отличает ее от тростниковой мелассы и придает ей особую функциональную ценность.

Свекловичная меласса является ценным источником водорастворимых витаминов, преимущественно группы В. Средние концентрации витаминов в мелассе (мг на 100 г продукта) составляют [2]:

- биотин (витамин Н): 0,01 мг/100 г;
- тиамин (витамин B_1): 0,3 мг/100 г;
- рибофлавин (витамин B_2): 0,04 мг/100 г;
- пиридоксин (витамин B_6): 0,54 мг/100 г;
- никотиновая кислота (витамин РР): 5,1 мг/100 г;
- пантотеновая кислота (витамин B_5): 8,0 мг/100 г;
- фолиевая кислота (витамин B_9): 0,02 мг/100 г.

Витамины группы В в мелассе находятся в биодоступной форме и могут эффективно усваиваться организмом. Особенно высоко содержание пантотеновой кислоты (8,0 мг/100 г) и никотиновой кислоты (5,1 мг/100 г), что делает мелассу ценным источником этих витаминов. При ферментации мелассы пробиотическими микроорганизмами содержание витаминов группы В может значительно увеличиться, что используется для производства биологически активных добавок [15].

4. Сравнительный анализ и пищевая ценность

Сводные сравнительные данные сиропа и мелассы по основным компонентам представлены в Таблице 3. Качественное отличие свекловичной мелассы заключается в высокой концентрации нес сахаров,

Таблица 3. Сравнительный химический состав сиропа из сахарной свеклы и свекловичной мелассы (в % от сухого вещества)
Table 3. Comparative chemical composition of sugar beet syrup and beet molasses (in % of dry matter)

Компонент	Сахарный сироп	Свекловичная меласса	Примечание	Источники
Сухие вещества	60–70 %	75–85 %	Определяет физическое состояние и стабильность	[16,18]
Сахароза	55–65 %	45–52 %	Основной углевод, источник энергии	[12,13,17]
Инвертные сахара	1–2 %	< 1 %	Характерное отличие от тростниковой мелассы	[25,32]
Раффиноза	0,5–1,5 %	1–2 %	Олигосахарид, влияет на вязкость и кристаллизацию, пребиотик	[31,33]
Минеральные в-ва (зола)	2–4 %	7–12 %	Ключевое различие. Меласса — концентрированный источник минералов	[10,30]
Калий (К)	1,5–3,0 %	3,5–5,5 %	Преобладающий катион, критически важен для физиологии человека и животных	[12,13]
Натрий (Na)	0,5–1,5 %	0,8–2,0 %		[12,13]
Азотистые вещества	1–2 %	2–4 %	Включая аминокислоты, пептиды, бетаин	[4,25]
Бетаин	0,5–1,5 %	4–6 %	Уникальный компонент свекловичной мелассы. Цвиттер-ион, гепатопротектор, осмопротектор	[30,41,44]
Органические кислоты	1–3 %	2–4 %	Лимонная, уксусная, янтарная и др. Формируют вкус и аромат, влияют на pH	[4,10]
pH	7,5–8,5 ед	7,2–8,9 ед	Слабощелочная реакция среды	[2]
Витамины группы В	Присутствуют	Присутствуют	Особенно высоко содержание В ₅ (пантотеновая) и РР (никотиновая) в мелассе	[2]

включая минералы, бетаин и коллоидные вещества (меланоидины), что, с одной стороны, снижает ее чистоту с точки зрения сахарного производства, а с другой — повышает функциональную ценность. Энергетическая ценность продуктов составляет 250–300 ккал/100 г и обусловлена в основном легкоусвояемой сахарозой, усвояемость которой в свекловичной мелассе достигает 98,5 % [32].

Качественное отличие мелассы заключается в резко возросшей доле неионных и высокомолекулярных органических соединений [39]. Помимо количественного увеличения ионной силы раствора, в мелассе концентрируются:

- Биополимеры и коллоиды: меланоидины, продукты карамелизации, полифенольные комплексы, молекулярная масса которых может достигать десятков и сотен кДа [11,35]. Эти соединения электронейтральны, обладают антиоксидантной активностью и придают мелассе характерный темный цвет.
- Цвиттер-ионы: бетаин и аминокислоты в изоэлектрической точке существуют в форме цвиттер-ионов, чей перенос в электрическом поле крайне неэффективен [4,25].
- Высокомолекулярные углеводы: раффиноза (1–2 % от СВ) и возможные декстраны повышают вязкость раствора [11,31].

Таким образом, снижение эффективности электролиза с 75 % для сиропа до 40 % для мелассы — это закономерный результат перехода от очистки раствора с преобладанием подвижных минеральных ионов к обработке сложной коллоидной системы. В этой системе доля электролизуемых ионов относительно общей массы нес сахаров снижена, а их подвижность ограничена высокой вязкостью, экранированием зарядов в условиях высокой ионной силы и активным обрастанием мембран высокомолекулярными компонентами.

Пищевая и биологическая ценность сиропа и мелассы из сахарной свеклы определяется их богатым химическим составом. Энергетическая ценность обоих продуктов высока и обусловлена легкоусвояемыми углеводами: сироп — 280–300 ккал/100 г, меласса — 250–280 ккал/100 г. Усвояемость сахаров в свекловичной мелассе составляет 98,5 %, что выше, чем в тростниковой (94,5 %) [12,45,46].

Минеральная ценность свекловичной мелассы особенно высока. Калий (3,5–5, % СВ) необходим для регуляции водно-электролитного баланса и работы сердечно-сосудистой системы. Железо (50–200 мг/кг) способствует профилактике анемии. Кальций и магний важны для костной ткани и нервной системы.

Витаминная ценность определяется высоким содержанием витаминов группы В, особенно пантотеновой (8,0 мг/100 г) и никотиновой (5,1 мг/100 г) кислот.

Биологически активные соединения: бетаин (4–6 % в мелассе) обладает гепатопротекторным, осморегуляторным действием, является донором метильных групп [47]. Аминокислоты и органические кислоты повышают общую биологическую ценность и могут обладать антиоксидантными свойствами.

Сравнение свекловичной мелассы с тростниковой мелассой выявляет принципиальные различия (Таблица 4): последняя содержит значительное количество инвертных сахаров (15–25 %), но не содержит бетаина, а также имеет иной минеральный профиль (например, выше содержание сульфатов и фосфатов) и, как правило, более высокую антиоксидантную активность, связанную с фенольными соединениями тростника [32,48]. Это определяет дифференцированное применение продуктов: свекловичная меласса более предпочтительна как источ-

ник бетаина и минералов (особенно калия), в то время как тростниковая может быть выбрана из-за своих антиоксидантных, сенсорных свойств и более выраженного карамельного вкуса.

Таблица 4. Состав меласс сахарного производства [34]
Table 4. Composition of sugar production molasses [34]

Компонент (% СВ)	Свекловичная меласса			Тростниковая меласса		
	1	2	3	1	2	3
Сухие вещества	76,7	79,4	78,4	76,6	78,5	76,7
Сырой протеин	12,8	14,6	12,5	7,7	8,8	6,0
Фракция сахара						
Сахароза	66,1	60,3	60,4	49,3	55,2	43,5
Глюкоза	0,02	0,05	0,15	5,97	1,99	5,74
Фруктоза	0,05	0,12	0,28	10,02	5,03	7,9
Раффиноза	2,18	0,28	0,2	0,03	0,02	0,03
Галактоза	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04
Арабиноза	–	0,02	0,03	0,02	–	0,01
Ксилоза	0,01	–	–	–	–	–
Полисахариды						
Крахмал	0,09	0,03	0,1	0,54	0,18	0,32
Леван	0,5	0,67	0,41	0,81	0,83	1,21
Декстран	0,07	0,09	0,06	0,63	1,42	0,31
Арабан	0,03	0,05	0,05	0,15	0,25	0,19
Органические кислоты						
Аконитовая кислота	–	–	–	0,37	1,25	3,78
Молочная кислота	3,34	3,67	6,91	3,34	6,43	12,8
Яблочная кислота	0,02	0,11	0,13	0,03	0,11	0,21
Лимонная кислота	0,39	0,38	0,15	0,08	0,13	0,19
Пирогалловая кислота	3,1	2,96	2,59	0,18	0,29	0,2
Щавелевая кислота	0,04	0,04	0,03	0,05	0,05	0,04
Гликолевая кислота	0,22	0,26	0,23	–	–	–
Уксусная кислота	0,59	0,28	0,49	0,23	0,29	0,2
Зола	10,3	11,9	13,3	12,9	12,8	12,2
Са	1,24	0,06	0,54	1,43	1,3	1,55
Mg	0,03	0,02	0,02	0,57	0,33	0,58
Na	0,32	1,06	0,36	0,01	0,02	0,03
К	2,39	4,93	1,07	0,5	1,37	2,17
Сульфаты	0,17	0,4	0,38	1,69	2,89	1,93
Сера	0,06	0,13	0,13	0,56	0,96	0,64
Фосфаты	0,58	1,23	1,33	2,72	2,55	2,45
Нитраты (мг/кг)	35	36	18	211	784	688
Хлориды (мг/кг)	4450	797	5610	14	39	0,5
DCAD ¹ (meq/100 g)	47	129	18	–17	–20	13

Примечание: значения выражаются как % СВ, если не указано иное.
¹ Разность диетических катион-анионов, рассчитанная как: DCAD (dietary cation-anion difference), meq/100 g = ((K, % DM/0.039 + Na, % DM/0.023) – (Cl, % DM/0.0355 + S, % DM/0.016)); meq/100 g = миллиэквивалентов на 100 г.

5. Влияние состава на функционально-технологические свойства

Химический состав сиропа и мелассы напрямую определяет их поведение в технологических процессах.

Вязкость мелассы значительно выше, чем у сиропа, что связано не только с большей концентрацией сухих веществ, но и с наличием высокомолекулярных соединений (раффиноза, декстраны, меланоидины) [16,25,33]. Это необходимо учитывать при транспортировке, хранении и дозировании. Высокая вязкость мелассы обусловлена присутствием коллоидных веществ и продуктов реакции Майяра, которые образуются в процессе тепловой обработки свекловичного сока [11,39].

Гигроскопичность обоих продуктов высока из-за содержания сахарозы и минеральных солей, что требует особых условий упаковки и хранения для предотвращения комкования [16]. Однако наличие минералов в мелассе может несколько снижать ее гигроскопичность по сравнению с чистым сахарным сиропом [25].

Цветообразование является ключевым различием. Сироп имеет светло-желтый цвет, в то время как меласса — темно-коричневый, почти черный. Это обусловлено концентрированием в мелассе продуктов реакций Майяра и карамелизации (меланоидинов), которые образуются в ходе тепловой обработки при переработке [11,39]. Эти соединения не только дают цвет, но и обладают антиоксидантной активностью и специфическим вкусом [49]. Интенсивность окраски мелассы коррелирует с содержанием меланоидинов и продуктов карамелизации, концентрация которых возрастает в процессе многократного уваривания утфелей [16].

Пенообразующая и эмульгирующая способность мелассы выше, чем у сиропа, благодаря присутствию поверхностно-активных веществ, таких как сапонины (присутствующие в свекле) и коллоидные белки [25,39]. Это свойство может быть полезно в хлебопечении и производстве некоторых кондитерских изделий [19].

Буферная емкость мелассы, обусловленная смесью органических кислот и их солей, выше, чем у сиропа [10,43]. Это делает ее хорошим стабилизатором pH в ферментационных средах и некоторых пищевых системах [4,15]. Наличие органических кислот, таких как молочная, лимонная и уксусная, обеспечивает способность мелассы поддерживать pH в заданном диапазоне при добавлении кислот или щелочей [16].

Антиоксидантная активность мелассы обусловлена наличием меланоидинов, фенольных соединений и продуктов карамелизации [11,49]. Это свойство может быть использовано для замедления окислительных процессов в пищевых продуктах при использовании мелассы в качестве ингредиента [49].

Таким образом, знание химического состава сиропа и мелассы позволяет прогнозировать их поведение в различных технологических процессах и обоснованно выбрать направления использования в зависимости от требуемых функционально-технологических свойств готового продукта.

6. Методы анализа химического состава

Точное определение химического состава сиропа и мелассы из сахарной свеклы требует применения современных аналитических методов [28]. В настоящее время используется широкий спектр инструментальных и химических методов анализа.

6.1. Хроматографические методы

Высокоэффективная жидкостная хроматография (ВЭЖХ) является одним из наиболее распространенных методов анализа углеводного состава свекловичных продуктов [30,31,35]. Для определения сахаров используются аминные (NH_2) колонки или колонки на основе силикагеля с рефрактометрическим (RI) или испарительным светорассеивающим детектором (ELSD). Подвижная фаза — ацетонитрил-вода. Метод позволяет одновременно определять сахарозу, глюкозу, фруктозу и раффинозу [50] за 15–30 минут с высокой точностью ($\text{RSD} < 2\%$).

Метод ВЭЖХ позволяет одновременно определять несколько сахаров в одной пробе и обеспечивает высокую точность и воспроизводимость результатов [35,51]. Сравнение результатов ВЭЖХ с классическим методом Лейна-Эйнона показывает хорошую корреляцию [30].

Ионная хроматография (IC) с импульсным амперометрическим детектированием (PAD) также широко используется для анализа сахаров в мелассе [36]. Метод отличается высокой чувствительностью и селективностью, принят АОАС International как официальный.

Газовая хроматография с масс-спектрометрией (ГХ–МС) применяется для анализа летучих органических соединений, включая органические кислоты и ароматические компоненты [48].

6.2. Спектроскопические методы

Ближняя инфракрасная спектроскопия (БИК, NIR) используется для быстрого (1–2 мин) оперативного контроля в производственных условиях, позволяя одновременно определять содержание сахаров, влаги, золы [42,52–55]. Требуется предварительной калибровки по референсным методам.

Атомно-абсорбционная спектроскопия (ААС) и индуктивно-связанная плазменная спектрометрия (ICP–OES, ICP–MS) являются основными для определения минерального состава [11,37,38,56]. ICP-методы обладают высокой чувствительностью и позволяют проводить многоэлементный анализ (одновременно до 70 элементов) с высокой точностью.

6.3. Электрофоретические методы

Капиллярный электрофорез (КЭ) применяется для определения аминокислот, витаминов и органических кислот в мелассе [28]. Метод отличается высокой разрешающей способностью и малым объемом пробы (нанолитры), а также быстротой анализа (10–30 мин). Имеется возможность одновременного определения различных классов соединений.

Метод капиллярного электрофореза на приборе «Капель» (производства компании «Люмэкс») используется для определения содержания аминокислот, витаминов и органических кислот в свекловичной мелассе [4].

6.4. Классические и специализированные методы

- Метод Лейна-Эйнона — титриметрический метод для определения редуцирующих сахаров, основанный на восстановлении меди в щелочном растворе;
- поляриметрия — оптический метод для определения содержания сахарозы по углу вращения плоскости поляризации;
- титриметрия — для определения общей кислотности (титруемой) и щелочности продуктов;
- ферментативные методы — для специфического определения отдельных сахаров (например, глюкозы) с использованием фермент-субстратных реакций;
- микробиологические методы — для оценки усвояемости сахаров *in vitro* [34], а также для оценки ферментативных свойств субстратов.

7. Инновационные применения свекловичной мелассы

Свекловичная меласса, побочный продукт сахарного производства, благодаря своему богатому составу сахаров, минералов и биологически активных соединений, приобретает все большую значимость в различных отраслях промышленности. Ее инновационное использование охватывает не только традиционное применение в качестве кормовой добавки или сырья для получения сахара, но и многофункциональное использование в пищевой, биотехнологической, химической и даже агротехнической сферах. Универсальность мелассы как субстрата открывает возможности для создания продуктов с высокой добавленной стоимостью, что повышает экономическую эффективность свеклосахарных производств.

7.1. Пищевые применения

В пищевой промышленности свекловичная меласса выступает ценным ингредиентом благодаря своим питательным и функциональным свойствам. Она используется как натуральный подсластитель в кондитерских изделиях, компонент хлебобулочной продукции [57], а также источник минералов и витаминов в функциональных пищевых продуктах [19,32,58–60]. Свекловичная меласса оказалась превосходной осмотической средой для осмотической дегидратации различных образцов пищевых продуктов (фруктов, овощей, мяса и рыбы) с точки зрения снижения содержания воды и значения показателя активности воды a_w [57,61]. Осмотическая дегидратация мелассы приводит к увеличению содержания важных минералов как в растительном, так и в животном сырье, улучшая его функциональные свойства. Меласса улучшает вкусовые и сенсорные характеристики продуктов, снижает потребление сахарозы и обогащает пищевые продукты полезными соединениями, такими как бетаин, который отсутствует в тростниковой и других видах мелассы и представляет особую ценность [62]. Меласса является источником антиоксидантов [49]. Однако для пищевого применения требуется глубокая очистка мелассы от нежелательных примесей, таких как зола, нитраты, сернистый ангидрид и оксиметилфурфурол, чтобы соответствовать строгим стандартам безопасности пищевой продукции [62,63].

7.2. Биотехнологические процессы

Меласса служит эффективным субстратом в различных биотехнологических процессах. Она используется для производства биоэтанола второго поколения [9,64–67], в том числе в комбинации

с дистилляционной бардой для повышения выхода и устойчивости процесса [68]. Кроме того, на основе мелассы получают альфа-галактозидазу и этанол с помощью дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* в двух-этапной системе, что снижает затраты и поддерживает экономику замкнутого цикла [69]. Также меласса выступает сырьем для микробиологического синтеза ценных соединений, таких как L-лизин с использованием модифицированной кишечной палочки [70] и ароматического спирта 2-фенилэтанола с помощью дрожжей *Yarrowia lipolytica* [71]. В биотехнологии меласса также применяется для получения пробиотиков, метаболитов, фруктоолигосахаридов [72] и микробных биополимеров-экзополисахаридов [73], например, поли(3-гидроксibuтирата) (ПГБ) с использованием бактерии *Cupriavidus necator* [74], а также для производства молочной [75,76] и лимонной кислоты [77]. Разработан прямой синтез изомальтулозы из свекловичной мелассы с помощью иммобилизованной сахарозоизомеразы [78].

7.3. Экстракция ценных соединений

Инновационные методы экстракции позволяют выделять из мелассы биологически активные соединения с высокой эффективностью. Так, для извлечения бетаина разработан экологичный метод экстракции [79] при температуре помутнения (CPE) с использованием полиэтиленгликоля (PEG), обеспечивающий эффективность до 88 % [80]. Бетаин может использоваться как ценная добавка в корма для скота или как функциональный ингредиент в пищевых продуктах. Для экстракции других биологически активных веществ, таких как фенолы и флавоноиды, применяются оптимизированные методы микроволновой (MAE) и ультразвуковой (UAE) экстракции, причем MAE демонстрирует более высокую эффективность [81].

7.4. Технологические инновации в очистке и переработке

Ключевым направлением инноваций является разработка эффективных технологий очистки технической свекловичной мелассы до уровня пищевого продукта. Одной из таких технологий является супербарботаж — инновационная аддитивная технология, сочетающая барботаж горячим воздухом для удаления сернистого ангидрида и взвешенных частиц. Последующая мембранная фильтрация (микро-, ультра- и нанофильтрация) на керамических мембранах позволяет выделять целевые компоненты — сахарозу и бетаин [62]. Данная технология позволяет получать пищевую свекловичную мелассу с повышенным содержанием бетаина (2–10%), а также производить улучшитель почвы пролонгированного действия из отходов очистки. По сравнению с традиционными методами дешугаризации (известковая, баритовая, ионообменная сепарация, электролиз), супербарботаж отличается более высокой производительностью, низкими эксплуатационными расходами и возможностью интеграции в существующую технологическую цепочку сахарного завода [63].

7.5. Агротехническое применение

Помимо промышленного использования, меласса находит применение в сельском хозяйстве в качестве удобрения и улучшителя почвы [82,83]. Она способна изменять соотношение С: N, положительно влияя на микробную экосистему почвы, подавлять растительных паразитических нематод и восстанавливать биологическую активность деградированных почв [84,85]. Концентрированный фильтрационный осадок, полученный в процессе очистки мелассы по технологии супербарботаж, также может использоваться как про-

лонгированное азотно-фосфорное удобрение, содержащее карбонат кальция для улучшения структуры почвы [63].

Таким образом, инновационные применения свекловичной мелассы демонстрируют ее высокий потенциал как multifunctional и экономически эффективного сырья. Наиболее перспективными направлениями являются производство обогащенной бетаином пищевой мелассы, биотехнологический синтез ценных соединений и разработка комплексных технологий глубокой очистки, таких как супербарботаж. Дальнейшие исследования должны быть направлены на оптимизацию процессов экстракции и ферментации, обеспечение масштабируемости и повышение экономической целесообразности данных инноваций для их широкого внедрения в промышленность.

8. Заключение и перспективы

Сироп и меласса из сахарной свеклы представляют собой не просто побочные продукты сахарного производства, а ценные многокомпонентные сырьевые ресурсы с высоким потенциалом для создания продуктов с добавленной стоимостью. Их сложный химический состав, включающий, помимо сахарозы, значительные количества минеральных веществ (особенно калия), витаминов группы В, уникального бетаина и органических кислот, обуславливает высокую пищевую и биологическую ценность.

Перспективы применения этих продуктов выходят далеко за рамки традиционного использования в кормлении или как субстрата для брожения. Они могут служить основой для создания функциональных пищевых ингредиентов: натуральных минерализованных подсластителей, источников бетаина для специализированного и спортивного питания, обогащателей витаминного профиля хлебобулочных, молочных и мясных продуктов. В биотехнологии меласса является оптимальной экономической средой для культивирования пробиотиков с повышенной метаболической активностью и производства широкого спектра биопродуктов (кислот, ферментов, биополимеров).

Для реализации этого потенциала необходимы дальнейшие исследования, направленные на следующие решения:

- стандартизацию состава в зависимости от сорта свеклы, региона выращивания и технологии переработки, что позволит гарантировать стабильность свойств для производителей функциональных продуктов;
- разработку эффективных и экологичных методов фракционирования и концентрирования целевых биокomпонентов, таких как бетаин, раффиноза, калийные соли, с использованием мембранных, хроматографических и экстракционных технологий;
- глубокое изучение синергетического эффекта компонентов сиропа и мелассы в составе комплексных пищевых систем, их влияния на текстуру, стабильность и сенсорные характеристики готовых продуктов;
- оценку экономической эффективности и разработку нормативной базы для широкого использования свекловичных продуктов в качестве функциональных ингредиентов в пищевой промышленности и фармацевтике.

Таким образом, углубленное изучение и комплексное использование сиропа и мелассы из сахарной свеклы соответствует принципам биоэкономики и устойчивого развития, позволяя трансформировать отходы традиционной индустрии в ресурсы для инновационных отраслей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

1. Babu, A. S., Adeyeye, S. A. O. (2024). Extraction of sugar from sugar beets and cane sugar. Chapter in a book: Extraction processes in the food industry. Woodhead Publishing, 2024. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819516-1.00007-7>
2. Görgülü, A. (2025). Elevating sugar beet by-products into healthier, natural, and functional ingredients. *Exploration of Foods and Foodomics*, 3, Article 101074. <https://doi.org/10.37349/eff.2025.101074>
3. Turkish food composition database. (2025). National food composition database. Ministry of Agriculture and Forestry of the Republic of Turkey. Retrieved from <https://turkomp.tarimorman.gov.tr/food-pancar-seker-280> Accessed January 10, 2025.
4. Popov, V. S., Vorobyeva, N. V., Svazlyan, G. A., Naumov, N. M., Gryaznova, O. A. (2020). Overview of metabolites and probiotic cultures during fermentation of molasses. *Systematic Reviews in Pharmacy*, 11(9), 813–817. <https://doi.org/10.18411/srp-09-2020-115>
5. Pérez-Sánchez, A., González-Ibarra, N., Segura-Silva, R. M., Alcalá-Galiano-Morell, D. D. (2025). Composición química, pretratamiento, almacenamiento, esterilización y usos de la melaza como sustrato en fermentaciones: Una revisión global. *Horizon Nexus Journal*, 3(2), 36–89. [Pérez-Sánchez, A., González-Ibarra, N., Segura-Silva, R. M., Alcalá-Galiano-Morell, D. D. (2025). Chemical composition, pretreatment, storage, sterilisation and uses of molasses as a substrate in fermentations: A global review. *Horizon Nexus Journal*, 3(2), 36–89. (In Spanish)] <https://doi.org/10.70881/hnj/v3/n2/59>
6. Ghazi, I., Fernández-Arrojo, L., De Segura, A. G., Alcalde, M., Plou, F. J., Ball-esteros, A. O. (2006). Beet sugar syrup and molasses as low-cost feedstock for the enzymatic production of fructo-oligosaccharides. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(8), 2964–2968. <https://doi.org/10.1021/jf053023b>
7. Niknezhad, S. V., Kianpour, S., Jafarzadeh, S., Alishahi, M., Darzi, G. N., Morowat, M. H. (2022). Biosynthesis of exopolysaccharide from waste molasses using *Pantoea* sp. BCCS 001 GH: A kinetic and optimization study. *Scientific Reports*, 12(1), Article 10489. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-14417-1>
8. Кульнева, Н. Г., Путилина Л. Н., Лазутина Н. А. (2019). Ресурсосберегающая технология переработки сахарной свеклы. *Сахарная свекла*, 10, 32–36. [Kulneva, N. G., Putilina, L. N., Lazutina, N. A. (2019). Resource-saving technology of sugar beet processing. *Sugar Beet*, 10, 32–36. (In Russian)] <https://doi.org/10.25802/sb.2019.28.41.006>
9. Kumar, S., Lata, P., Dogra, A., Kumar, R., Tiwari, A. K., Vasudeva, A. et al. (2026). Revolutionizing waste valorization: Chemical transformations for unlocking the potential of food and agro-industrial by-products. Chapter in a book: Food and Agro-Industrial Wastes. Sustainable Impacts, Transformation and Added Value of By-products. Academic Press, 2026. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-31654-8.00021-7>
10. Belyaeva, L. I., Pruzhin, M. K., Puzanova, L. N., Ostapenko, A. V., Sysoeva, T. I. (2024). Quality analysis of sugar beet molasses based on the evidence of reference values of indicators. *Russian Agricultural Sciences*, 50(6), 814–820. <https://doi.org/10.3103/S106836742570020X>

11. Valli, V., Caravaca, A. M. G., Di Nunzio, M., Danesi, F., Caboni, M. F., Bordoni, A. (2012). Sugar cane and sugar beet molasses, antioxidant-rich alternatives to refined sugar. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(51), 12508–12515. <https://doi.org/10.1021/jf304416d>
12. Steg, A., van der Meer, J. M. (1985). Differences in chemical composition and digestibility of beet and cane molasses. *Animal Feed Science and Technology*, 13(1–2), 83–91. [https://doi.org/10.1016/0377-8401\(85\)90044-6](https://doi.org/10.1016/0377-8401(85)90044-6)
13. Palmonari, A., Cavallini, D., Sniffen, C. J., Fernandes, L., Holder, P., Fagioli, L. (2020). Short communication: Characterization of molasses chemical composition. *Journal of Dairy Science*, 103(7), 6244–6249. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-17644>
14. Stark, J. B., McCready, R. M. (1968). The relation of beet molasses composition to true purity: Part 1. Composition. *Journal of the American Society of Sugar Beet Technologists*, 15(1), 61–72. <https://doi.org/10.5274/JSBR.15.1.61>
15. Popov, V., Svazlyan, G. (May 28–29, 2021). *Concept and principles of development of a new generation symbiotic preparation*. International Scientific-Practical Conference "Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources" (FIES 2021). Kazan, Russia, 2021. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20213700127>
16. Van der Poel, P. W., Schiweck, H., Schwartz, T. (1998). Sugar technology: Beet and cane sugar manufacture. Verlag Dr. Albert Bartens KG, 1998.
17. Bubník, Z., Henke, S., Kadlec, P., Hinková, A., Pour, V. (2006). Database of the properties of sucrose, sucrose solution and food. *Journal of Food Engineering*, 77(3), 399–405. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.07.004>
18. Bubník, Z., Kadlec, P., Urban, D., Bruhns, M. (1995). Sugar technologists manual: Chemical and physical data for sugar manufacturers and users. Verlag Dr. Albert Bartens KG, 1995.
19. Крижова, Ю. П., Деяк, О. С. (2021). Використання бурякового сиропу в технології кетчупів — шлях до здорового харчування. *Продовольчий Вісник*, 9(16), 109–116. [Kryzhova, Yu., Deyak, O. (2021). Use of beet syrup in ketchup technology — the way to healthy nutrition. *Food Resources*, 9(16), 109–116. (In Ukrainian)] <https://doi.org/10.31073/FoodResources2021-16-11>
20. Tuzhilkin, V. I., Balykhin, M. G., Petrov, S. M., Podgornova, N. M., Lukin, N. D., Kovalyonok, V. A. (2021). Mathematical description of the isobaric vaporizing crystallization of sucrose. *Journal of Food Engineering*, 306(1040), Article 110614. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110614>
21. Tuzhilkin, V. I., Petrov, S. M., Podgornova, N. M., Lukin, N. D. (2024). Process engineering of semi-continuous boiling of massecuites based on Digital Twin of sucrose crystallization. *Journal of Food Engineering*, 365, Article 111816. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2023.111816>
22. Lu, G., Meng, Y., Huang, J. (2025). A novel control method of sugar boiling based on model-free adaptive control and neural networks. *Journal of Food Science*, 90(11), Article e70662. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.70662>
23. Soleymani, M., Hakimzadeh, V., Noghabi, M. S., Arianfar, A. (2024). Investigating the potential of bubbling and ultrasonic processes in reducing the fouling of the ultrafiltration membrane during the purification of raw sugar beet syrup [Preprint]. *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4162709/v1>
24. Тужилкин В. И., Петров С. М., Подгорнова, Н. М. (2023). Химико-термодинамические свойства чистых и многокомпонентных растворов сахарозы. Техника и технология пищевых производств, 53(4), 742–753. [Tuzhilkin, V. I., Petrov, S. M., Podgornova, N. M. (2023). Chemical and thermodynamic properties of pure and multicomponent sucrose solutions. *Food Processing: Techniques and Technology*, 53(4), 742–753. (In Russian)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414.12325-4-2474>
25. Adbhai, A. R., Dewanjee, S., Patel, K. G., Karmakar, N. (2022). Sugar beet molasses production and utilization. Chapter in a book: Sugar beet cultivation, management and processing. Springer, Singapore, 2022. https://doi.org/10.1007/978-981-19-2730-0_44
26. El-Geddawy, M. A. M., Omar, M. B., Seleim, M. A., Elsyiad, S. I. (2014). Composition and properties of Egyptian beet molasses. *Journal of Food and Dairy Sciences*, 3(12), 669–679. <https://doi.org/10.21608/jfds.2012.81735>
27. Šarić, L. C., Filipčev, B. V., Šimurina, O. D., Plavšić, D. V., Šarić, B. M., Lazarević, J. M. et al. (2016). Sugar beet molasses: Properties and applications in osmotic dehydration of fruits and vegetables. *Food and Feed Research*, 43(2), 135–144. <https://doi.org/10.5937/FFR1602135S>
28. International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis. (2024). ICUMSA methods book. Verlag Dr. Albert Bartens, 2024.
29. Crouse, M. S., Sellers, S., Wawrousek, K., Sabino, R. M. (2025). Biopolymers from sugar beet molasses: Isolation, characterization, and bioactive properties. *ACS Omega*, 10(12), 12002–12013. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c09633>
30. Rajakylä, E., Paloposki, M. (1983). Determination of sugars (and betaine) in molasses by high-performance liquid chromatography: Comparison of the results with those obtained by the classical Lane-Eynon method. *Journal of Chromatography A*, 282, 595–602. [https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(00\)91636-4](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(00)91636-4)
31. Xu, W., Liang, L., Zhu, M. (2015). Determination of sugars in molasses by HPLC following solid-phase extraction. *International Journal of Food Properties*, 18(3), 547–557. <https://doi.org/10.1080/10942912.2013.837064>
32. Sheu, S.-C., Lai, M.-H. (2012). Composition analysis and immuno-modulatory effect of okra (*Abelmoschus esculentus* L.) extract. *Food Chemistry*, 134(4), 1906–1911. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.03.110>
33. Sjölin, M., Thuvander, J., Wallberg, O., Lipnizki, F. (2020). Purification of sucrose in sugar beet molasses by utilizing ceramic nanofiltration and ultrafiltration membranes. *Membranes*, 10(1), Article 5. <https://doi.org/10.3390/membranes10010005>
34. Palmonari, A., Cavallini, D., Sniffen, C. J., Fernandes, L., Holder, P., Fusaro, I. et al. (2021). *In vitro* evaluation of sugar digestibility in molasses. *Italian Journal of Animal Science*, 20(1), 571–577. <https://doi.org/10.1080/1828051X.2021.1899063>
35. Damon, C. E., Pettitt, B. C., Jr. (1980). High performance liquid chromatographic determination of fructose, glucose, and sucrose in molasses. *Journal of the Association of Official Analytical Chemists*, 63(3), 476–480. <https://doi.org/10.1093/jaoac/63.3.476>
36. Schäffler, K. J., Day-Lewis, C. M. J., Clarke, M., Jekot, J., Rearick, E., Tungland, B. et al. (1997). Determination of sugars in beet and cane final molasses by ion chromatography: Collaborative study. *Journal of AOAC International*, 80(3), 603–610. <https://doi.org/10.1093/jaoac/80.3.603>
37. Vicentini-Polette, C. M., Belé, J. S. A. H., Borges, M. T. M. R., Spoto, M. H. F., Verruma-Bernardi, M. R. (2019). Physicochemical and sensorial characterization of commercial sugarcane syrups. *Revista de Ciências Agrárias*, 42(3), 808–816. <https://doi.org/10.19084/rca.17279>
38. Vicentini-Polette, C. M., de Souza Gallo, A., do Nascimento e Silva, J. H., de Campos Bernardi, A. C., Borges, M. T. M. R., Verruma-Bernardi, M. R. (2024). Minerals levels in sugarcane syrup. *Food Science and Technology*, 44, Article e00263. <https://doi.org/10.5327/fst.00263>
39. Герасименко, А. А., Олянская, С. П., Гривцева, Э. А. (1984). Меласса и мелассообразование в свеклосахарном производстве. Киев: Высшая школа, 1984. [Gerasimenko, A. A., Olyanskaya, S. P., Grivtseva, E. A. (1984). Molasses and molasses formation in sugar beet production. Kiev: Vyshaya Shkola, 1984. (In Russian)]
40. Lu, G., Huang, J. (2025). A novel detail enhancement method for industrial digital radiography based on multiscale pixel-level adaptive fusion. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 44(3), Article 59. <https://doi.org/10.1007/s10921-025-01197-7>
41. Altinisik, S., Zeidan, H., Yilmaz, M. D., Marti, M. E. (2023). Reactive extraction of betaine from sugarbeet processing byproducts. *ACS Omega*, 8(12), 11029–11038. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c07845>
42. Schäffler, K. J., de Gaye, M. T. D. (1997). Rapid near infra-red estimation of multi-components in mixed juice and final molasses: The possibility of day-to-day control of raw sugar factories using NIR. *Proceedings of the Annual Congress — South African Sugar Technologists' Association*, (71), 153–160.
43. De Oliveira Lino, F. S., Basso, T. O., Sommer, M. O. A. (2018). A synthetic medium to simulate sugarcane molasses. *Biotechnology for Biofuels*, 11, Article 221. <https://doi.org/10.1186/s13068-018-1221-x>
44. Krulj, J., Jevtić-Mučibabić, R., Grbić, J., Brkljača, J., Milovanović, I., Filipčev, B. et al. (2014). Determination of betaine in sugar beet molasses. *Journal on Processing and Energy in Agriculture*, 18(4), 123–126.
45. Cheung, P. C. K., Mehta, B. M. (2025). Handbook of food chemistry. Springer, 2025. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-41609-5>
46. Schiweck, H., Steinle, G. (September 3–4, 1987). Analytical methods of sugar factories — New developments. Proceedings of the Symposium on the Chemistry and Processing of Sugarcane. New Orleans, Louisiana. Elsevier, 1988.
47. Dobrijević, D., Pastor, K., Nastić, N., Özogul, F., Krulj, J., Kokić, B. et al. (2023). Betaine as a functional ingredient: Metabolism, health-promoting attributes, food sources, applications and analysis methods. *Molecules*, 28(12), Article 4824. <https://doi.org/10.3390/molecules28124824>
48. Kiselev, E. G., Demidenko, A. V., Zhila, N. O., Shishatskaya, E. I., Volova, T. G. (2022). Sugar beet molasses as a potential C-substrate for PHA production by *Cuipriavidus necator*. *Bioengineering*, 9(4), Article 154. <https://doi.org/10.3390/bioengineering9040154>
49. Molina-Cortés, A., Sánchez-Motta, T., Tobar-Tosse, F., Quimbaya, M. (2020). Spectrophotometric estimation of total phenolic content and antioxidant capacity of molasses and vinnases generated from the sugarcane industry. *Waste and Biomass Valorization*, 11, 3453–3463. <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00690-1>
50. Morin-Allory, L., Herbretreau, B., Lafosse, M., Dreux, M. (1990). Automatic sugar analysis in the beet sugar industry: Part II: Apparatus and results. *Journal of High Resolution Chromatography*, 13(5), 343–347. <https://doi.org/10.1002/jhrc.1240130510>
51. Соколов, М. И., Верзилина, Н. Д., Рудаков, О. Б., Толконников, В. И., Никольшин, А. П., Полянский, К. К. (2004). Экспресс-анализ сахаров методом высокоэффективной жидкостной хроматографии. *Пищевая промышленность*, 8, 94–95. [Sokolov, M. I., Verzhilina, N. D., Rudakov, O. B., Tolokonnikov, V. I., Nikul'shin, A. P., Polyanskii, K. K. (2004). Express analysis of sugars by high performance liquid chromatography. *Food Industry*, 8, 94–95. (In Russian)]
52. Aykas, D. P., Sinir, G. O., Borba, K. R. (2023). Determination of quality traits and possible adulteration of molasses using FT-IR spectroscopy: A study from Turkish market. *Food Chemistry*, 427(523), Article 136727. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136727>
53. Rojas-Rioseco, M., Öztöp, M., Fuentes, C. A., Bravo, M., Smajlovic, I., Smajlovic, M. et al. (2025). Sustainable authentication of molasses' botanical origin using infrared spectroscopy: Accuracy and greenness evaluation of spectral techniques. *Current Research in Food Science*, 10, Article 101096. <https://doi.org/10.1016/j.crf.2025.101096>
54. Walford, S. (June 11–15, 2017). *Near infrared spectroscopy: Rethinking the analysis of sugarcane factory streams*. Proceedings of the 18th International Conference on Near Infrared Spectroscopy. IM Publications Open, Copenhagen, Denmark, 2019. <https://doi.org/10.1255/nir2017.129>
55. Abi Rizk, H., Estephan, J., Salameh, C., Kassouf, A. (2023). Non-targeted detection of grape molasses adulteration with sugar and apple molasses by mid-infrared spectroscopy coupled to independent components analysis. *Food Additives and Contaminants: Part A*, 40(1), 1–11. <https://doi.org/10.1080/19440049.2022.2135766>
56. Nakata, H., Tamura, M., Shintani, T., Gomi, K. (2014). Evaluation of baker's yeast strains exhibiting significant growth on Japanese beet molasses and compound analysis of the molasses types. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 117(6), 715–719. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2013.11.009>
57. Lončar, B., Nićetin, M., Filipović, V., Knežević, V., Pezo, L., Šuput, D. et al. (2021). Osmotic dehydration in sugar beet molasses: Food safety and quality benefits. *Journal of Hygienic Engineering and Design*, 34, 15–20.
58. El Asri, O., Farag, M. A. (2023). The potential of molasses from different dietary sources in industrial applications: A source of functional compounds and health attributes, a comprehensive review. *Food Bioscience*, 56, Article 103263. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103263>
59. Kassa, M. G., Asemu, A. M., Belachew, M. T., Satheesh, N., Abera, B. D., Teferi, D. A. (2024). Review on the application, health usage, and negative effects of molasses. *CyTA — Journal of Food*, 22(1), Article 2321984. <https://doi.org/10.1080/19476337.2024.2321984>

60. Ghazal, G. A. I., Atallah, A. A. (2016). Production of probiotic yoghurt fortified with bee honey, beet molasses, date honey and pomegranate honey. *Egyptian Journal of Food Science*, 44, 102–117.

61. Šarić, L. C., Filipčev, B. V., Simurina, O. D., Plavšić, D. V., Saric, B. M., Lazarević, J. M. et al. (2016). Sugar beet molasses: Properties and application in osmotic dehydration of fruits and vegetables. *Food and Feed Research*, 43(2), 135–144. <https://doi.org/10.5937/FFR16021355>

62. Шердани, А. Д. (2021). Инновационная пищевая свекловичная меласса. Новый горизонт рентабельности и экологичности сахарного производства. *Сахар*, 2, 20–23. [Sherdani, A. D. (2021). Innovative food beet molasses. A new horizon of profitability and sustainability of sugar production. *Sugar*, 2, 20–23. (In Russian)] <https://doi.org/10.24411/2413-5518-2021-10201>

63. Шердани А. Д. (2021). Супербарботаж™ — инновационная технология очистки свекловичной мелассы. Сравнение с современными аналогами. *Сахар*, 5, 24–39. [Sherdani, A. D. (2021). Superbarbotage™ as an innovative technology of beet molasses processing. Comparison with modern analogues. *Sugar*, 5, 24–39. (In Russian)] <https://doi.org/10.24412/2413-5518-2021-5-24-39>

64. Altunışık, S., Nigiz, F. U., Gürdal, S., Yılmaz, K., Tuncel, N. B., Koyuncu, S. (2025). Optimization of bioethanol production from sugar beet processing by-product molasses using response surface methodology. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 15, 9875–9888. <https://doi.org/10.1007/s13399-024-05786-w>

65. Jamir, L., Kumar, V., Bhasin, J. K., Kumar, S., Singh, H. (2021). Composition, valorization and therapeutical potential of molasses: A critical review. *Environmental Technology Reviews*, 10(1), 131–142. <https://doi.org/10.1080/21622515.2021.1892203>

66. Kumar, R., Verma, V. C., Mall, A. K., Pathak, A. D. (2022). Bioethanol production from sugar beet juices and molasses for economic and environmental perspectives. Chapter in a book: Sugar beet cultivation, management and processing. Springer, 2022. https://doi.org/10.1007/978-981-19-2730-0_45

67. Osmolak, K., Mikulski, D., Kłosowski, G. (2025). Efficient production of fuel ethanol via the simultaneous use of distillery stillage biomass and beet molasses. *Energies*, 18(2), Article 312. <https://doi.org/10.3390/en18020312>

68. Mikulski, D., Kłosowski, G. (2022). Integration of first- and second-generation bioethanol production from beet molasses and distillery stillage after dilute sulfuric acid pretreatment. *BioEnergy Research*, 15(1), 454–465. <https://doi.org/10.1007/s12155-021-10260-w>

69. Álvarez-Cao, M.-E., Cerdán, M.-E., González-Siso, M.-I., Becerra, M. (2019). Bio-conversion of beet molasses to alpha-galactosidase and ethanol. *Frontiers in Microbiology*, 10, Article 405. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00405>

70. He, X., Qi, Y., Chen, K., Li, Y., Ouyang, P. (2016). Enhancing l-lysine production of beet molasses by engineered *Escherichia coli* using an *in situ* pretreatment method. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 179(6), 986–996. <https://doi.org/10.1007/s12010-016-2045-4>

71. Mitri, S., Louka, N., Rossignol, T., Maroun, R. G., Koubaa, M. (2024). Bioproduction of 2-phenylethanol by *Yarrowia lipolytica* on sugar beet molasses as a low-cost substrate. *Fermentation*, 10(6), Article 290. <https://doi.org/10.3390/fermentation10060290>

72. Ureta, M. M., Gomez-Zavaglia, A. (2026). Short-chain fructo-oligosaccharides: Alternative substrates and enzymatic sources in their production process. Chapter in a book: Enzymatic Production of Oligosaccharides. Academic Press, 2026. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-23730-0.00013-2>

73. Baria, D. M., Yagnik, S. M., Panchal, R. R., Rajput, K. N., Raval, V. H. (2025). Sustainable biopolymers: Economic feasibility of microbial exopolysaccharides production. Chapter in a book: Extracellular polysaccharides. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-94472-7_18

74. Ertan, F., Keskinler, B., Tanriseven, A. (2021). Exploration of *Cupriavidus necator* ATCC 25207 for the production of poly(3-hydroxybutyrate) using acid treated beet molasses. *Journal of Polymers and the Environment*, 29(7), 2111–2125. <https://doi.org/10.1007/s10924-020-02020-2>

75. Kucharska, E. (April 6, 2024). *Applications of beet molasses in fermentation processes: Biotechnological production of lactic acid and its recent applications*. National Scientific Conference “e-Factory of Science”. The book of articles. National scientific conferences 2024 Promovendi Foundation. Lodz, Poland, 2024.

76. Непомнящий, А. П., Зубков, И. Н., Сорокоумов, П. Н., Шарова, Н. Ю. (2025). Оптимизация условий культивирования штамма *Lactobacillus acidophilus* для получения молочной кислоты при ферментации мелассы *Известия Вузов. Прикладная химия и биотехнология*, 15(2), 279–285. [Непомнящий, А. П., Зубков, И. Н., Сорокоумов, П. Н., Шарова, Н. Ю. (2025). Optimization of cultivation conditions for *Lactobacillus acidophilus* to produce lactic acid through molasses fermentation. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*, 15(2), 279–285. (In Russian)] <https://doi.org/10.21285/achb.979>

77. Петров, С. М., Подгорнова, Н. М. (2024). Производство лимонной кислоты из свекловичной мелассы. *Сахар*, 6, 16–22. [Petrov, S. M., Podgornova, N. M. (2024). Production of citric acid from beet molasses. *Sugar*, 6, 16–22. (In Russian)] <https://doi.org/10.24412/2413-5518-2024-6-16-22>

78. Wang, Q.-Q., Yang, M., Hao, J.-H., Ma, Z.-C. (2021). Direct isomaltulose synthesis from beet molasses by immobilized sucrose isomerase. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9, Article 691547. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.691547>

79. Mohammadzadeh, M., Honarvar, M., Zarei, A. R., Boojar, M.M.A., Bakhoda, H. (2018). A new approach for separation and recovery of betaine from beet molasses based on cloud point extraction technique. *Journal of Food Science and Technology*, 55(4), 1215–1223. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2999-4>

80. Mohammadzadeh, M., Zarei, A. R., Honarvar, M., Boojar, M. M. A., Bakhoda, H. (2020). A green method for separation of betaine from beet molasses based on cloud point extraction methodology using polyethylene glycol as a food grade surfactant. *Asian Journal of Green Chemistry*, 4(3), 327–339. <https://doi.org/10.22034/ajgc.2020.3.9>

81. Babaoğlu, A. S., Dilek, N. M., Karakaya, M., Unal, K. (2022). Valorization of sugar beet molasses powder by microwave and ultrasound-assisted extractions of bio-active compounds: An optimization study. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(10), Article e16820. <https://doi.org/10.1111/jfpp.16820>

82. Abu El-Fotoh, H. M., El-Kalawy, S., El-Sheref, G. F. (2025). Impact of soil applied molasses and foliar spraying with magnesium and boron on sugar beet yield and quality under nitrogen fertilization regime under clay soils. *Menoufia Journal of Soil Science*, 10(10), 171–197. <https://doi.org/10.21608/mjss.2025.123456>

83. Al-Dhumri, S. A., Al Mosallam, M. S., Zhang, W., Alharbi, S., Abou-Elwafa, S. F. (2023). Application of molasses as an eco-innovative approach substitutes mineral nitrogen fertilization and enhances sugar beet productivity. *Waste and Biomass Valorization*, 14(1), 287–296. <https://doi.org/10.1007/s12649-022-01873-z>

84. Pyakurel, A., Dahal, B. R., Rijal, S. (2019). Effect of molasses and organic fertilizer in soil fertility and yield of spinach in Khotang, Nepal. *International Journal of Applied Sciences and Biotechnology*, 7(1), 49–53. <https://doi.org/10.3126/ijasbt.v7i1.23301>

85. Schenck, S. (2001). Molasses soil amendment for crop improvement and nematode management. *Hawaii Agricultural Research Center*, 3, 1–7.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	Affiliation
Петров Сергей Михайлович — доктор технических наук, профессор, факультет цифровых технологий, кафедра систем автоматизированного управления, Московский государственный университет технологий и управления имени К. Г. Разумовского (Первый казачий университет) 123007, Москва, пр. 3-й Хорошёвский, д. 1, корп. 3 E-mail: s.petrov@mgutm.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5859-7263 * автор для контактов	Sergey M. Petrov , Doctor of Technical Sciences, Professor, Faculty of Digital Technologies, Department of Automated Control Systems, Moscow State University of Technologies and Management named after K. G. Razumovsky (First Cossack University) 1/3, 3rd Khoroshevsky pr., 123007, Moscow, Russia E-mail: s.petrov@mgutm.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5859-7263 * corresponding author
Подгорнова Надежда Михайловна — доктор технических наук, профессор, кафедра «Процессы и аппараты химической технологии», Московский политехнический университет 115280, Москва, ул. Автозаводская, д. 16, корп. 4 E-mail: n.m.podgornova@mospolytech.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7909-1763	Nadezhda M. Podgornova , Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Chemical Technology Processes and Apparatus, Moscow Polytechnic University 16/4, Avtozavodskaya str., 115280, Moscow, Russia E-mail: n.m.podgornova@mospolytech.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7909-1763
Критерии авторства	Contribution
Вклад авторов: С. М. П. : концептуализация, написание — оригинальный черновик, супервизия. Вклад авторов: Н. М. П. : кураторство данных, написание — обзор и редактирование.	Author Contributions: S. M. P. : Conceptualization, Writing — Original Draft, Supervision. Author Contributions: N. M. P. : Data Curation, Writing — Review and Editing
Конфликт интересов	Conflict of interest
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare that there is no conflict of interest.