

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-1-2560>
<https://elibrary.ru/JDVENF>

Оригинальная статья
<https://fptt.ru>

Анализ профиля ароматообразующих соединений в сухой и сладкой плодовой алкогольной продукции из земляники



В. В. Бахарев*^{ORCID}, П. А. Феоктистов^{ORCID}

Самарский государственный технический университет^{ORCID}, Самара, Россия

Поступила в редакцию: 23.05.2024
Принята после рецензирования: 17.06.2024
Принята к публикации: 02.07.2024

*В. В. Бахарев: knilsstu@gmail.ru,
<https://orcid.org/0000-0001-8515-9309>
П. А. Феоктистов: <https://orcid.org/0009-0009-2701-2814>

© В. В. Бахарев, П. А. Феоктистов, 2025



Аннотация.

При производстве плодовой алкогольной продукции важное значение имеют вкусовые и органолептические свойства исходного фруктового или ягодного сырья. Благодаря высоким органолептическим характеристикам и полезным физиологическим свойствам земляника может быть использована для производства плодовой алкогольной продукции. Цель работы – проанализировать профиль ароматообразующих соединений в сухой и сладкой плодовой алкогольной продукции из земляники, образующихся в процессе ферментации исходного сырья.

Объектами исследования послужили образцы сухой и сладкой плодовой алкогольной продукции из земляники сорта Брилла (*Fragaria Brilla*). В лабораторных условиях определены физико-химические показатели полученных образцов. Проведен газохроматографический анализ (газовый хроматограф «Кристалл-2000М», Россия) отогнанного спирта-сырца. Выделение ароматообразующих компонентов проводили жидкостно-жидкостной экстракцией. Анализ компонентов экстракта проводили методом газовой хромато-масс-спектрометрии (газовый хроматограф Agilent, США).

Физико-химические показатели образцов сухой и сладкой плодовой алкогольной продукции из земляники соответствовали требованиям ГОСТ 59942-2021. Газохроматографический анализ показал наличие характерных спутников спиртового брожения. Провели сравнительный анализ ароматообразующих соединений сухой и сладкой плодовой алкогольной продукции и трех сортов земляники. Идентифицировано 61 соединение, формирующее аромат плодовой алкогольной продукции. Установлено, что часть соединений сохраняется в неизменном виде из земляничного сырья (спирты, сложные эфиры, фураны, углеводороды), другая часть образуется в процессе ферментации (спирты до C₆, этиловые эфиры карбоновых кислот, фураны, карбоновые кислоты), а оставшиеся соединения полностью разрушаются дрожжами при брожении (альдегиды и кетоны, терпены).

Полученные результаты подтвердили высокий органолептический потенциал земляники и могут быть использованы для совершенствования технологий производства плодовой алкогольной продукции. Перспективным направлением продолжения исследования будет детальное изучение трансформации ароматических соединений плодового сырья на разных стадиях ферментации.

Ключевые слова. Ягода, земляника, *Fragaria Brilla*, ароматообразующие вещества, ароматический профиль, брожение, плодовая алкогольная продукция, жидкостно-жидкостная экстракция

Для цитирования: Бахарев В. В., Феоктистов П. А. Анализ профиля ароматообразующих соединений в сухой и сладкой плодовой алкогольной продукции из земляники. Техника и технология пищевых производств. 2025. Т. 55. № 1. С. 166–180. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-1-2560>

Aroma Compounds in Dry and Sweet Strawberry Alcoholic Beverages



Vladimir V. Bakharev*^{ORCID}, Pavel A. Feoktistov^{ORCID}

Samara State Technical University^{ORCID}, Samara, Russia

Received: 23.05.2024
Revised: 17.06.2024
Accepted: 02.07.2024

*Vladimir V. Bakharev: knilsstu@gmail.ru,
<https://orcid.org/0000-0001-8515-9309>
Pavel A. Feoktistov: <https://orcid.org/0009-0009-2701-2814>

© V.V. Bakharev, P.A. Feoktistov, 2025



Abstract.

The original flavor and other sensory properties are important for alcoholic drinks made of fruits or berries. Strawberries, with their exceptional sensory and nutritional profile, are an excellent raw material for functional alcoholic beverages. The article describes the aroma compounds that develop in dry and sweet strawberry alcohol during fermentation.

The research featured strawberries of the Brilla variety (*Fragaria Brilla*) processed into dry and sweet alcoholic beverages. The physicochemical parameters of the distillates were determined using the method of gas chromatography (Kristall-2000M, Russia). The isolation of aroma components involved the method of fluid-fluid extraction. The method of gas chromatography-mass spectrometry (Agilent, USA) made it possible to analyze the components of the extract.

The physicochemical indicators complied with State Standard GOST 59942-2021. The gas chromatography analysis revealed substances typical of alcoholic fermentation. The aroma compounds in dry/sweet alcoholic beverages were compared with those in three different strawberry varieties. The test identified 61 aroma compounds. Alcohols, esters, furans, and hydrocarbons remained the same as in the raw strawberries. Alcohols ($\leq C_6$), ethyl esters of carboxylic acids, furans, and carboxylic acids developed during fermentation. Aldehydes, ketones, and terpenes were completely destroyed by yeast during fermentation. The obtained results confirmed the high sensory potential of strawberries and improved the technologies of fruit alcohol production. Further research will focus on the transformation of aroma compounds at different fermentation stages.

Keywords. Berry, strawberry, *Fragaria Brilla*, aroma compounds, aroma profile, fermentation, fruit alcoholic beverages, fluid-fluid extraction

For citation: Bakharev VV, Feoktistov PA. Aroma Compounds in Dry and Sweet Strawberry Alcoholic Beverages. Food Processing: Techniques and Technology. 2025;55(1):166–180. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-1-2560>

Введение

Крупноплодная земляника или земляника садовая (*Fragaria × ananassa* Duch.) представляет собой межвидовой гибрид, возникший спонтанно более 250 лет назад в Европе при совместном выращивании двух октоплоидных американских видов *Fragaria chiloensis* (земляника чилийская) и *Fragaria virginiana* (земляника виргинская). Полученный гибрид имеет общие характеристики обоих родительских видов: крупные плоды *F. chiloensis*, красный цвет *F. virginiana* и уникальный аромат, полученный в результате их скрещивания [1, 2]. По комплексу органолептических характеристик и пищевой ценности земляника является фаворитом среди различных ягод и фруктов. Однако, из-за высокой частоты дыхания и тонкого эпидермиса [3–5] свежая земляника является скоропортящейся ягодой, особенно при транспортировке и длительном хранении. По этой причине большие объемы земляники перерабатываются в продукты (сок, желе,

нектар, пюре, концентрат или джем), которые, с одной стороны, сохраняют полезные свойства ягоды, а с другой, обладают длительными сроками хранения [6–8]. Возможная альтернатива – производство плодовой алкогольной продукции, которое рассматривается как одно из важных направлений сохранения и использования физиологического и органолептического потенциала этих ягод. Несмотря на то что виноградные вина доминируют на рынке винодельческой продукции, в последние годы существенно вырос интерес к плодовой алкогольной продукции. Большое значение при ее производстве имеют вкусовые и органолептические характеристики исходного фруктового сырья, поэтому особое внимание исследователей и производителей привлекают ягоды и фрукты, обладающие оригинальным вкусом и ароматом [6–8].

Пищевую и физиологическую ценность земляники определяют содержащиеся в ней растворимые углеводы, органические кислоты, аминокислоты и витамины,

такие как: фолиевая кислота, тиамин, рибофлавин, никотиновая кислота, витамины (С, В₆, К, А, Е) и микроэлементы (железо, магний, йод, медь, фосфор) [9]. Кроме того, земляника богата фенольными соединениями и флавоноидами (в основном антоцианами), гидролизуемыми дубильными веществами (эллагитаннинами и галлотаннинами), фенольными кислотами и конденсированными дубильными веществами (проантоцианидинами), которые отвечают за антиоксидантный и противовоспалительный эффекты [10].

К настоящему моменту в землянике идентифицировано около 360 ароматических соединений [11–14]. Основными классами соединений, создающими привлекательный для потребителя аромат земляники, являются спирты, сложные эфиры, альдегиды, кетоны, фураноны, терпены [15–22]. Значительное влияние на вкус и аромат земляники оказывает баланс между моносахаридами (глюкоза, фруктоза, сахароза) и органическими кислотами (лимонная, яблочная) [23]. Анализ ароматообразующих соединений по соотношению их концентрации и порога запаха показал, что основной вклад во вкус и аромат свежей земляники вносят около 20 соединений [14, 17, 24, 25]. Сложные эфиры являются наиболее распространенной категорией соединений, ответственной за фруктовый вкус и запах, поскольку образуются при этерификации различных спиртов и ацил-КоА, присутствующих в созревающей землянике [15, 25]. Таким образом, благодаря комплексу органолептических характеристик и полезных физиологических свойств, земляника как исходное сырье занимает важное место среди других ягод и фруктов.

Ароматический профиль плодовой алкогольной продукции из земляники формируется из двух основных компонентов. Первый – это букет по происхождению, который включает ароматические соединения исходной земляники, отражает ее сортовые особенности, степень спелости, агротехнические методы выращивания и климатические условия. Второй компонент – букет по образованию, включающий вещества, образующиеся в результате метаболических превращений под действием ферментов дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* и химических реакций как во время ферментации, так и при последующей выдержке вина [26, 27, 38]. Следует также учитывать утрату некоторых ароматических соединений сырья вследствие химических и биохимических процессов.

Существует ряд исследований, посвященных технологии производства плодовой алкогольной продукции из земляники, ее физико-химическим характеристикам, а также содержащимся в ней ароматическим соединениям и антоцианам [28–37, 39, 40]. Однако сведения о том, какие ароматические соединения переходят в алкогольную продукцию из исходного сырья в неизменном виде, а какие образуются в процессе ферментации или выдержки, крайне ограничены [36]. В этой связи научный и практический интерес обусловлен

анализом изменений профиля ароматических веществ, включая соединения, переходящие в алкогольную продукцию из ягод земляники, а также образующиеся или исчезающие в ходе ферментации.

Цель данного исследования заключалась в анализе профиля ароматообразующих соединений в сухой и сладкой плодовой алкогольной продукции из земляники и их сравнении с профилем ароматических соединений в землянике.

Объекты и методы исследования

Исходное сырье. Земляника сорта Брилла (*Fragaria Brilla*) – не ремонтантный, суперранний, высокопродуктивный сорт. Выведен в 2004 г. в городе Чезена (Италия) межсортовым скрещиванием, в качестве родительских экземпляров использовали разновидности Трибьют (Tribute), Альба (Alba), Дарселект (Darselect), Брайтон (Brighton), Чезена (Cesena). В России выращивается с 2017 г.

Растение представляет собой хорошо облиственный среднерослый компактный куст с мощной системой корней. Образует умеренное количество толстых и крепких усов, которые не мешают при сборке урожая. Цветоносы земляники многозачатковые, чуть полегают из-за большого веса плодов, отлично опыляются. Листья темно-зеленая. Сорт пригоден для транспортировки, отличается хорошим товарным видом, ягоды не мнутся и не текут, долго хранятся без потери качества. Ягода подходит как для употребления в свежем виде, так и для заморозки, размораживания, переработки.

Ягоды крупные, среднеплотные, хорошо отрываются от плодоножки, имеют конусовидно-вытянутую форму; цвет насыщенный, красно-оранжевый; семянки желтые и мелкие. По внешним характеристикам земляника Брилла красивая, однородная, с великолепным товарным видом. Вес ягоды в среднем составляет 30–40 г, некоторые – 50 г. Мякоть плодов не слишком плотная, сладкая, с приятной кислинкой, массовая доля сахара – 7,7–8,0 %.

Реагенты. Дихлорметан и н-пентан для экстракции поставлены фирмой «Галахим» (г. Москва), безводный сульфат натрия (х.ч.) и метабисульфит калия (х.ч.) – фирмой «Вектон» (г. Санкт-Петербург).

Приготовление образцов сухой и сладкой плодовой алкогольной продукции из земляники сорта Брилла. Земляника (30 кг) была собрана в период технической зрелости в Самарской области в третьей декаде июня 2023 г. Переработка осуществлялась в лаборатории технологии броидильных процессов Высшей биотехнологической школой Самарского государственного технического университета.

Землянику измельчали на вальцах гребнеотделителя, предварительно удалив хвостики. Полученную мезгу сульфитировали (50 мг/кг SO₂ в виде метабисульфита калия), выход – 29 кг. Мезгу прессовали в корзинчатом прессе Voran (ООО «СИДРВИЛЬ», Россия).

Сусло (24 л) осветляли при 0–2 °С в течение 24 часов, устанавливали содержание в нем сахаров и доводили до 200 г/л внесением 2 л раствора сахара. Сусло делили на две партии по 13 л, нагревали до 15 °С и вносили дрожжи Vitilevure 58W3 (0,2 г/л сусла). Брожение вели при 15 °С, контролируя содержание сахаров; при 80 г/л (примерно через 48 ч) провели спиртование одной партии сусла спиртом-ректификатом (95 % об.) до суммарного содержания спирта 15 %. Вторую партию сбродили до содержания сахаров менее 1 г/л (15 суток). Полученные партии плодовой алкогольной продукции дополнительно сульфитировали (50 мг/кг SO₂ в виде метабисульфита калия) и осветляли при температуре 0–2 °С в течение 72 ч. Плодовую алкогольную продукцию отделили от дрожжевого осадка декантацией, выдержали 48 ч и изучили.

Физико-химические показатели сухой и сладкой плодовой алкогольной продукции из земляники определяли следующим образом: плотность – по ГОСТ 32081-2013, объемную долю этилового спирта – по ГОСТ 32095-2013, массовую концентрацию общего экстракта – по ГОСТ 32000-2012, массовую концентрацию титруемых кислот в пересчете на яблочную кислоту – по ГОСТ 32114-2013, массовую концентрацию летучих кислот в пересчете на уксусную кислоту – по ГОСТ 32001-2012, массовую концентрацию сахаров – по ГОСТ 13192-73, водородный показатель и массовую концентрацию фенольных веществ – по методике, представленной в источнике [41], массовую концентрацию общего диоксида серы – по ГОСТ 32115-2013.

Газохроматографический (ГХ) анализ. Образец для ГХ анализа получали отгонкой сухой и сладкой плодовой алкогольной продукции из земляники (250 мл) с дефлегматором (10 см) и нисходящим холодильником. Температура окончания отгонки – 98 °С. Использовался газовый хроматограф «Кристалл-2000М» (Хроматэк, Россия), соединенный с пламенно-ионизационным детектором. В колонку HP-FFAP (50м×0,32 мм; 0,5 мкм толщина слоя) (Agilent, США) вводили 1 мкл отгона. Программа температуры нагрева составляла: 75 °С (5 мин) – 5 °С/мин – 110 °С (5 мин) – 10 °С/мин – 210 °С (5 мин). Температура инжектора и передаточной линии – 200 °С, детектора – 220 °С. В качестве газа-носителя использовался азот при расходе 3,0 мл/мин.

Выделение ароматообразующих компонентов осуществляли методом жидкостно-жидкостной экстракции. Образцы сухой и сладкой плодовой алкогольной продукции из земляники (200 мл) экстрагировали 50 мл смеси *n*-пентана и дихлорметана (соотношение 60:40 по объему) в течение 12 ч с перемешиванием магнитной мешалкой. Растворитель отделяли центрифугированием (3000 об/мин, 15 мин), сушили безводным сульфатом натрия и отгоняли с дефлегматором (50 см) до объема 1 мл, затем концентрировали в токе азота до объема 0,2 мл.

Анализ ароматообразующих компонентов с применением метода газовой хромато-масс-спектрометрии (ГХ-МС). Для ГХ-МС анализа использовали газовый хроматограф Agilent модели 7890А, соединенный с масс-селективным детектором модели 5975С. В кварцевую колонку с малоподвижной фазой HP5ms (30м×0,25 мм; 0,25 мкм толщина слоя) вводили 1 мкл экстракта. Устанавливали следующее программирование температуры ГХ-разделения: 70 °С (5 мин) – 1 °С/мин – 95 °С (10 мин) – 2 °С/мин – 190 °С (20 мин). Температура инжектора и передаточной линии – 250 °С и 280 °С соответственно. Делитель потока – 1:20. Задержка на выход растворителя – 3 мин. Масс-детектирование: энергия ионизации – 70 эВ; температура ионного источника – 230 °С, температура квадруполя – 150 °С, скорость сканирования – 1 скан/с; диапазон захвата – 45–450 аму. В качестве газа-носителя использовался гелий марки А при расходе 0,7 мл/мин. Идентификация веществ осуществлялась по библиотекам масс-спектров NIST 11, Wiley 11 с учетом индексов удерживания.

Результаты и их обсуждение

Схема получения образцов сухой и сладкой плодовой алкогольной продукции из земляники и проведенных анализов представлена на рисунке 1.

Для полученных образцов сухой и сладкой плодовой алкогольной продукции из земляники были определены физико-химические показатели (табл. 1).

Физико-химические показатели полученных образцов сухой и сладкой плодовой алкогольной продукции из земляники соответствовали нормам, согласно ГОСТ 59942-2021 и ранее приведенным научным работам [28–30, 35, 36]. Однако в работах [28–30, 35, 36, 39] концентрация фенольных веществ выше (в среднем 100–200 мг/дм³).

ГХ-анализ отогнанного спирта-сырца из образцов сухой и сладкой плодовой алкогольной продукции из земляники показал наличие метанола в концентрациях 0,11–0,16 %об., сивушных спиртов (пропан-1-ола, 2-метилпропан-1-ола, 3-метилбутан-1-ола и гексан-1-ола) и 2-фенилэтанола. В образце сладкой плодовой алкогольной продукции из альдегидов были идентифицированы ацетальдегид, бензальдегид и кротоновый альдегид, из сложных эфиров – только этилацетат. За исключением кротонового альдегида и бензальдегида, все эти соединения являются стандартными спутниками спиртового брожения [42].

Для определения ароматообразующих компонентов в образцах сухой и сладкой плодовой алкогольной продукции из земляники были выбраны метод жидкостно-жидкостной экстракции смесью растворителей (*n*-пентан и дихлорметан) и метод ГХ-МС, часто используемый для того, чтобы проанализировать летучие соединения [49]. Выбор растворителей обусловлен хорошей экстрагирующей способностью *n*-пентана в отношении гидрофобных соединений и аналогичной

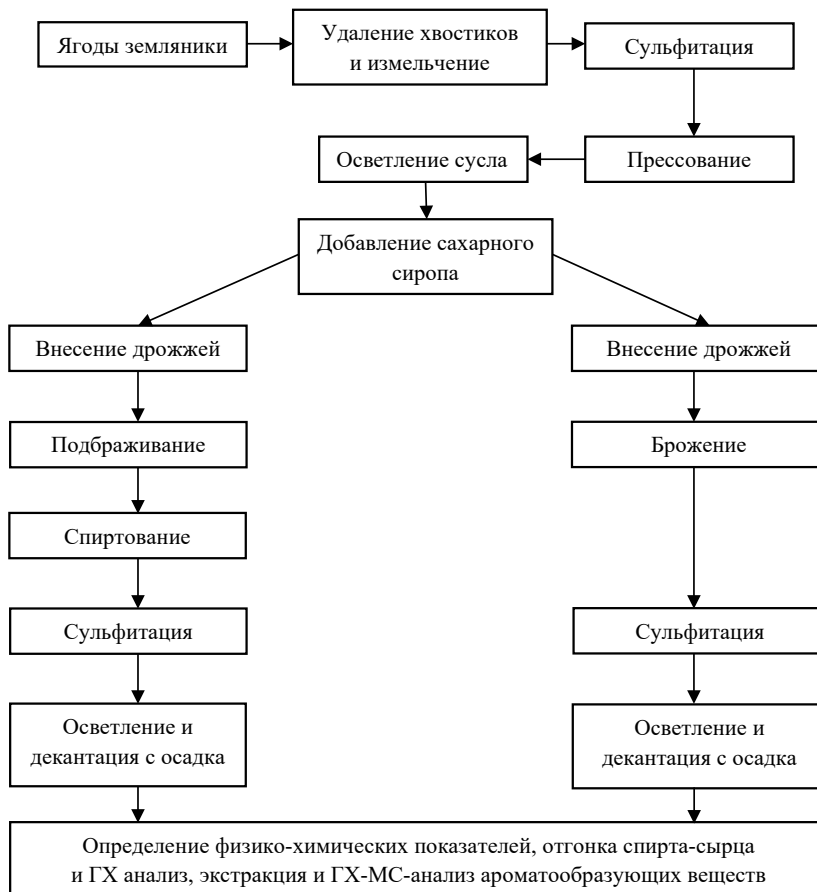


Рисунок 1. Схема проведенных исследований

Figure 1. Research design

Таблица 1. Физико-химические показатели сухой и сладкой плодовой алкогольной продукции из земляники

Table 1. Physicochemical parameters of dry and sweet strawberry alcoholic beverages

Показатель	Образец сухой плодовой алкогольной продукции	Образец сладкой плодовой алкогольной продукции
Цвет	Светло-розовый	Красно-розовый
Плотность (20 °С), г/см ³	0,989	1,009
Объемная доля этилового спирта, %об.	12,20	14,90
Массовая концентрация общего экстракта, г/дм ³	24,9	94,8
Массовая концентрация титруемых кислот в пересчете на яблочную кислоту, г/дм ³	7,7	6,7
Активная кислотность, рН	3,4	3,3
Массовая концентрация летучих кислот в пересчете на уксусную кислоту, г/дм ³	1,02	1,14
Массовая концентрация сахаров, г/дм ³	0,8	84,5
Массовая концентрация фенольных веществ, мг/дм ³	1273,0	1450,0
Массовая концентрация общего диоксида серы, мг/дм ³	78,0	89,0

характеристикой дихлорметана в отношении более полярных соединений. Кроме того, эти растворители имеют достаточно низкую температуру кипения, что облегчает их удаление из экстракта. Результаты ГХ-МС-анализа представлены на рисунках 2, 3.

Сравнение данных хроматографии (рис. 2, 3) показывает, что сухая плодовая алкогольная продукция

из земляники обладает более богатым компонентным составом ароматических соединений, чем сладкая. Это можно объяснить тем, что подбраживание сладкой плодовой алкогольной продукции было прервано на начальном этапе (через 2 суток), в то время как ферментация сухой плодовой алкогольной продукции из земляники была более продолжительной (15 суток).

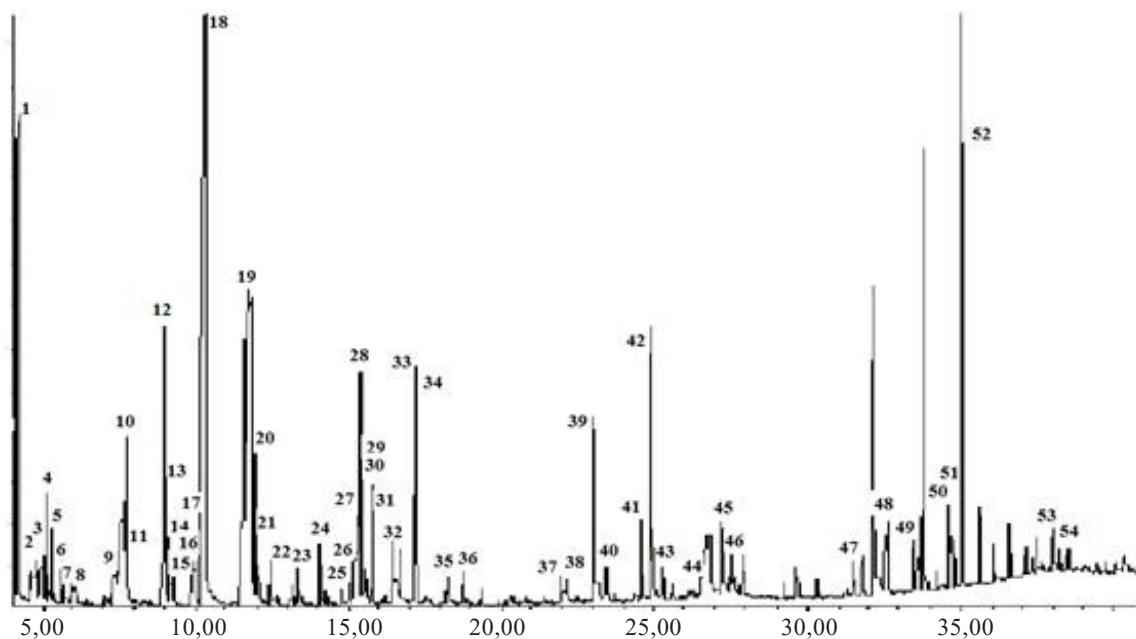


Рисунок 2. Хроматограмма ароматообразующих компонентов сухой плодовой алкогольной продукции из земляники
Figure 2. Chromatogram of aroma components of dry strawberry alcoholic beverages

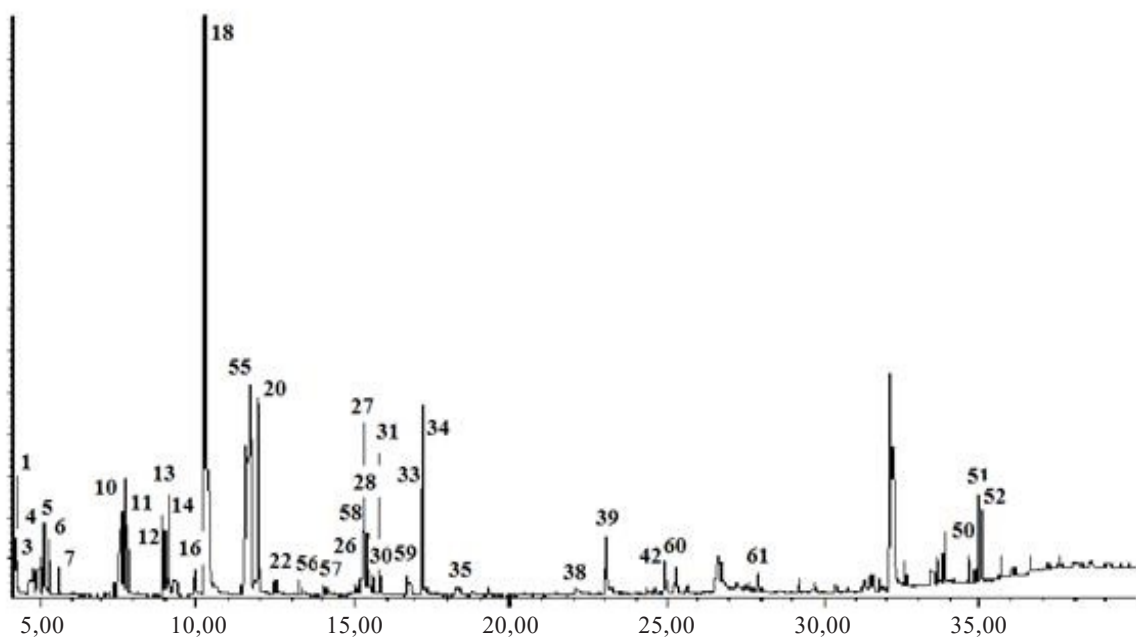


Рисунок 3. Хроматограмма ароматообразующих компонентов сладкой плодовой алкогольной продукции из земляники
Figure 3. Chromatogram of aroma components of sweet strawberry alcoholic beverages

Для проведения сравнительного анализа ароматических веществ в исследуемых образцах сухой и сладкой плодовой алкогольной продукции из земляники и в ягодах земляники в таблице 2 приведены данные по содержанию ароматических соединений в трех сортах: один из родительских сортов красной садовой земляники (*Fragaria × ananassa* Duch.) – зем-

ляника чилийская *Fragaria chiloensis* (L.) Mill subsp. *chiloensis* forma *chiloensis* (I) [43]; гибридная испанская земляника сорта Пескера в гибридной комбинации 232×1392 (II) [44]; китайская земляника, выращенная в провинции Шеньси (III) [36].

Сравнительный анализ спиртовых компонентов показывает, что в образцах сухой и сладкой плодовой

Таблица 2. Сравнение компонентного состава летучих ароматических соединений сухой и сладкой плодовой алкогольной продукции из земляники, полученного методом жидкостно-жидкостной экстракции и определенного методом газовой хромато-масс-спектрометрии

Table 2. Volatile aroma compounds in dry vs. sweet strawberry alcoholic beverages (fluid-fluid extraction and GC-MS)

Соединение	Образцы плодовой алкогольной продукции				Земляника			Описание аромата соединения
	сухой		сладкой		I [43]	II [44]	III [36]	
	Время удерживания, мин	Площадь пика, %	Время удерживания, мин	Площадь пика, %				
Спирты								
Метанол	5,15 ^a	0,156 ^c	5,14 ^a	0,112 ^c	–	–	–	–
Пропан-1-ол	7,14 ^a	360,400 ^b	7,13 ^a	303,000 ^b	–	–	+	фруктовый [28]
2-Метилглютиол (2) ^d	4,66	0,210	–	–	–	–	–	–
3-Метилглютиол (9)	7,37	0,390	–	–	–	–	–	зеленой фасоли [53]
Бутан-1-ол	–	–	–	–	+	–	+	спиртовой [28]
2-Метилпропан-1-ол	8,29 ^a	1841,300 ^b	8,28 ^a	33,900 ^b	+	–	–	косточек абрикоса [28]
Пентан-1-ол	–	–	–	–	–	–	+	терпкий [28]
3-Метилбутан-1-ол	10,86 ^a	4353,600 ^b	10,80 ^a	3480,200 ^b	+	–	+	сырный [28], ягодный [43]
Гексан-1-ол (5)	5,14 13,89 ^a	0,710 65,400 ^b	5,14 13,80 ^a	1,040 25,800 ^b	+	–	+	листовой, фруктовый [28]
Гептан-1-ол	–	–	–	–	–	–	+	виноградный [28]
Гептан-2-ол	–	–	–	–	–	+	+	лимонный [28]
Октан-1-ол	–	–	–	–	–	+	+	апельсиновый, розовый [28]
Нонан-1ол	–	–	–	–	–	–	+	зелени [46]
Нонан-2-ол	–	–	–	–	–	+	+	фруктовый [28]
2-Этил-гексан-1-ол	–	–	–	–	+	–	+	зелени [43]
Декан-1-ол	–	–	–	–	–	+	+	апельсиновый цвет [50]
Додекан-1-ол	–	–	–	–	+	–	–	ягодный [43]
Гексадекан-1-ол	–	–	–	–	+	–	–	специй [43]
Гептадекан-1-ол	–	–	–	–	+	–	–	фруктовый [43]
Пент-1-ен-3-ол	–	–	–	–	–	+	–	–
Гекс-2-ен-1-ол	–	–	–	–	–	+	–	зеленых листьев [16]
Гекс-3-ен-1-ол	–	–	–	–	–	–	+	травяной [47]
Гепт-4-ен-1ол	–	–	–	–	–	–	+	–
Окт-5-ен-1ол	–	–	–	–	–	–	+	–
Окт-1-ен-3-ол	–	–	–	–	–	–	+	–
Бутан-2,3-диол	–	–	–	–	–	–	+	резины [28]
Бензиловый спирт	–	–	–	–	+	–	+	цветочный [43]
2-Фенилэтанол (18)	10,23 23,00 ^a	27,740 158,000 ^b	10,31 23,00 ^a	40,410 61,900 ^b	+	–	+	розы [28]
2-(4-Гидроксифенил) этанол (32)	16,49	1,070	–	–	–	–	–	–
3-Фенилпропанол	–	–	–	–	+	–	+	цитрусовый [43]
Коричный спирт	–	–	–	–	+	–	–	цветочный [43]
Эвгенол	–	–	–	–	–	+	–	гвоздичный [43]
Сложные эфиры								
Этиловый эфир уксусной кислоты	5,08 ^a	1055,900 ^b	5,06 ^a	752,000 ^b	+	+	+	фруктовый эфирный [28]
Бутиловый эфир уксусной кислоты	–	–	–	–	–	+	–	сладкий, фруктовый [43]
Гексиловый эфир уксусной кислоты	–	–	–	–	+	+	+	грушевый [28], банановый [43]
Бензиловый эфир уксусной кислоты	–	–	–	–	+	+	–	молочный [43]
Гексадеканоиловый эфир уксусной кислоты (44)	26,51	0,140	–	–	–	–	–	–

Продолжение таблицы 2

Соединение	Образцы плодовой алкогольной продукции				Земляника			Описание аромата соединения
	сухой		сладкой		I [43]	II [44]	III [36]	
	Время удерживания, мин	Площадь пика, %	Время удерживания, мин	Площадь пика, %				
Этиловый эфир молочной кислоты (1)	4,21	2,770	4,20	1,470	–	–	–	фруктовый, маслянистый [46]
Метилловый эфир бутановой кислоты	–	–	–	–	+	+	–	фруктовый [43]
Этиловый эфир бутановой кислоты	–	–	–	–	+	+	–	сахаристый [43]
Этиловый эфир 2-метилбутановой кислоты	–	–	–	–	–	–	+	фруктовый, древесный [43]
Этиловый эфир 3-метилбутановой кислоты	–	–	–	–	–	–	+	яблочный, банановый [46]
Этиловый эфир 2-гидрокси-4-метилпентановой кислоты (13)	9,02	0,260	9,02	0,240	–	–	–	ежевичный [46]
Этиловый эфир гексановой кислоты (11)	7,76	1,200	7,76	1,410	+	+	+	зеленого яблока [28]
Этиловый эфир октановой кислоты (20)	11,94	1,430	11,93	2,870	+	+	+	фруктовый [28]
Этиловый эфир 3-гидроксибутановой кислоты	–	–	–	–	+	–	–	фруктовый, виноградный [46]
Этиловый эфир 4-гидрокси-бутановой кислоты (12)	8,98	2,230	8,97	1,170	–	–	–	–
Моноэтиловый эфир янтарной кислоты (19)	11,76	4,360	–	–	–	–	–	фруктовый [47]
Диэтиловый эфир яблочной кислоты (23)	13,37	0,300	–	–	–	–	–	–
2-Фенилэтиловый эфир уксусной кислоты (56)	–	–	13,21	0,200	+	–	+	цветочный, фруктовый [47]
Фурфуриловый эфир уксусной кислоты	–	–	–	–	+	–	–	тропических фруктов [43]
2-Метилбутиловый эфир уксусной кислоты	–	–	–	–	–	+	–	–
3-Метилбутиловый эфир уксусной кислоты (6)	5,29	0,440	5,28	0,610	–	+	–	банановый [16]
Этиловый эфир 2-гидрокси-3-метилбутановой кислоты	–	–	–	–	–	–	+	–
Этиловый эфир 3-гидрокси-2-метилбутановой кислоты	–	–	–	–	–	–	+	–
Этиловый эфир декановой кислоты (31)	15,80	0,730	15,80	1,680	+	+	+	фруктовый [28]
Этиловый эфир дец-2-еновой кислоты	–	–	–	–	–	–	+	восковой, перезрелой груши [51]
Этиловый эфир дец-9-еновой кислоты (30)	15,65	0,160	15,65	0,270	–	–	–	розовый [46]
Этиловый эфир додекановой кислоты	–	–	–	–	+	+	+	маслянистый [46]
Коричный эфир уксусной кислоты	–	–	–	–	+	+	–	сладкий, цветочный [43]

Продолжение таблицы 2

Соединение	Образцы плодовой алкогольной продукции				Земляника			Описание аромата соединения
	сухой		сладкой		I [43]	II [44]	III [36]	
	Время удерживания, мин	Площадь пика, %	Время удерживания, мин	Площадь пика, %				
Этиловый эфир тетрадекановой кислоты	–	–	–	–	+	–	–	клубничный [43]
Этиловый эфир гексадекановой кислоты (43)	25,29	0,170	–	–	+	–	–	карамельный [43]
Этиловый эфир гексадец-9-еновой кислоты (60)	–	–	25,02	0,260	–	–	–	–
Этиловый эфир октадекановой кислоты (61)	–	–	27,91	0,570	+	–	–	слабый запах [51]
Этиловый эфир 4-гидрокси-бензойной кислоты (35)	18,23	0,430	18,30	0,280	–	–	–	–
Этиловый эфир коричной кислоты (33)	17,18	1,360	17,18	1,360	–	–	–	–
Этиловый эфир 4-гидрокси-коричной кислоты (39)	23,02	1,950	23,03	1,650	+	–	–	–
Этиловый эфир 2-гидрокси-3-фенилпропановой кислоты (59)	–	–	16,75	0,320	–	–	–	–
Этиловый эфир 3-фенилпропановой кислоты (26)	14,90	0,320	15,00	0,380	+	–	+	цветочный, медовый [51]
2-(2-Бутоксиэтокси) этиловый эфир уксусной кислоты (27)	15,27	1,140	15,27	1,080	–	–	–	–
Диэтиловый эфир 2-гидрокси-пентандиовой кислоты (29)	15,53	0,190	–	–	–	–	–	–
Альдегиды и кетоны								
Ацетальдегид	4,14 ^a	3420,300 ^b	4,12 ^a	1279,400 ^b	–	–	–	зеленое яблоко [43]
Пентан-2-он	–	–	–	–	+	+	–	карамельный [43]
Пентаналь	–	–	–	–	–	+	–	миндальный [45]
Гексаналь	–	–	–	–	+	+	–	спаржи [43]
Гептаналь	–	–	–	–	+	+	–	цитрусовый [45]
Октаналь	–	–	–	–	–	+	+	цитрусовый [45]
Нонаналь	–	–	–	–	+	+	+	розовый [28]
3-Гидроксибутан-2-он	–	–	–	–	+	–	+	молочный [30]
Кроtonаль	–	–	7,61 ^a	6,300 ^b	–	–	–	–
Пент-2-еналь	–	–	–	–	–	+	–	–
Гекс-2-еналь	–	–	–	–	+	+	–	зелени [16]
Гекс-3-еналь	–	–	–	–	–	+	–	травянистый зеленый [57]
Гепт-2-еналь	–	–	–	–	–	+	–	миндальный [54]
Окт-2-еналь	–	–	–	–	–	+	–	ореховый [45]
Нон-2-еналь	–	–	–	–	–	+	–	жирный [45]
Деканаль	–	–	–	–	–	+	–	восковой [45]
Дец-2-еналь	–	–	–	–	–	+	–	жирный [54]
Гекс-2,4-диеналь	–	–	–	–	+	–	–	зеленого чая [43]
Гепт-2,4-диеналь	–	–	–	–	–	+	–	ореховый [56]
Бензальдегид	17,41 ^a	54,500 ^b	17,40 ^a	66,900 ^b	+	+	+	карамельный [43]
Гептан-2-он	–	–	–	–	+	+	–	герани [28]

Продолжение таблицы 2

Соединение	Образцы плодовой алкогольной продукции				Земляника			Описание аромата соединения
	сухой		сладкой		I [43]	II [44]	III [36]	
	Время удерживания, мин	Площадь пика, %	Время удерживания, мин	Площадь пика, %				
Фураны								
2,5-Диметил-4-метоксифуран-3(2H)-он (14)	9,09	0,860	9,09	1,140	+	+	+	фруктовый, карамельный [43]
4-Гидрокси-2,5-диметилфуран-3(2H)-он (15)	9,21	0,380	–	–	+	–	–	карамельный, клубничный [43]
2-Гидроксиметилдигидрофуран-5(4H)-он (57)	–	–	14,09	0,250	–	–	–	–
2-Пентилфуран	–	–	–	–	–	+	–	маслянистый, фасолевый [55]
2-Этилфуран	–	–	–	–	+	–	–	фруктовый [43]
5-Этилфуран-2(5H)-он	–	–	–	–	+	–	–	карамельный [43]
5-Гексилдигидрофуран-2(3H)-он (34)	17,22	1,470	17,22	2,580	–	–	–	–
Дигидрофуран-2(3H)-он (8)	6,03	0,200	–	–	–	–	–	–
Этиловый эфир дигидрофуран-2(3)-он-5-карбоновой кислоты (24)	14,08	0,450	–	–	–	–	–	–
2,3-Дигидробензофуран (22)	12,46	0,710	12,49	0,310	–	–	–	–
Терпены								
3,7-Диметилокта-1,6-диен-3-ол (Линалоол) (16)	9,92	0,350	9,93	0,610	+	+	+	цветочный [43]
<i>a</i> -Терпинеол	–	–	–	–	+	+	–	сирени [43]
Лимонен	–	–	–	–	–	+	+	лайма [43]
Геранилацетон	–	–	–	–	–	+	–	зеленый, древесный [52]
Цитронелол	–	–	–	–	–	–	–	цитрусовый [47]
Сквален (52)	35,00	5,330	35,00	1,230	+	–	–	ореховый [43]
Карбоновые кислоты								
3-Метилпропановая кислота (17)	10,00	0,530	–	–	+	–	–	перечный [43]
4-Метилбутановая кислота (21)	12,07	0,530	–	–	–	–	–	–
<i>Изо</i> -бутановая кислота	–	–	–	–	+	–	+	сырный [43]
Бутановая кислота	–	–	–	–	+	–	–	молочный [43]
Валериановая кислота	–	–	–	–	+	–	–	грибной [43]
2-Метилбутановая кислота (4)	5,05	0,920	5,00	1,070	–	–	–	фруктовый [16]
3-Метилбутановая кислота (3)	4,81	0,320	4,77	0,980	–	–	–	–
Гексановая кислота (10)	7,70	3,800	7,67	5,250	+	–	–	копрового масла [28]
Октановая кислота (55)	–	–	11,60	4,660	–	–	–	фруктовый [28]
Нонановая кислота	–	–	–	–	+	–	–	сырный [47]
Декановая кислота (28)	15,42	3,600	15,38	4,780	–	–	–	кожаный [47]
Децил-9-ановая кислота (58)	–	–	15,21	0,340	–	–	–	–
Додекановая кислота (36)	18,76	0,260	–	–	–	–	–	–
Тетрадекановая кислота (37)	21,93	0,510	–	–	+	–	–	молочный [43]

Соединение	Образцы плодовой алкогольной продукции				Земляника			Описание аромата соединения
	сухой		сладкой		I [43]	II [44]	III [36]	
	Время удерживания, мин	Площадь пика, %	Время удерживания, мин	Площадь пика, %				
Пентадекановая кислота (40)	23,41	0,310	–	–	–	–	–	
Коричная кислота	–	–	–	–	+	–	–	цветочный [43]
3-Фенилпропионовая кислота (25)	14,80	0,320	–	–	–	–	–	
Гексадец-9(цис)-еновая кислота (41)	24,58	1,000	–	–	–	–	–	
Гексадекановая кислота (42)	24,87	2,310	24,84	0,640	+	–	–	молочный [43]
Октадец-9(цис)еновая (олеиновая) кислота (45)	27,23	0,980	–	–	–	–	–	
Октадекановая (стеариновая) кислота (46)	27,51	0,340	–	–	–	–	–	
Другие соединения								
Стирол (7)	5,59	0,230	5,59	0,390	+	–	+	цветочный, бальзамический [51]
3-(2-Гидроксиэтил)индол (38)	22,09	0,390	22,12	0,330	–	–	–	–
Нонадекан (54)	38,53	0,240	–	–	–	–	–	–
Эйкозан (51)	34,83	0,440	34,83	0,210	–	–	–	–
Докозан (50)	34,65	0,630	34,65	0,400	–	–	–	–
Тетракозан (48)	32,59	0,590	–	–	–	–	–	–
Пентакозан (47)	31,49	0,330	–	–	–	–	–	–
Октакозан (49)	33,45	0,500	–	–	–	–	–	–
Холест-5-ен-3-ол (53)	38,00	0,550	–	–	–	–	–	–

Примечание: ^a – время удерживания в газохроматографическом анализе отгона спирта-сырца, полученного на хроматографе «Кристалл 2000М» с ПИД; ^b – концентрация соединения в мг/дм³; ^c – концентрация метанола в %об.; ^d – номер соединения на хроматограмме (рис. 2, 3).

Note: ^a – retention time of crude alcohol distillate in gas chromatography (Kristall-2000M); ^b – compound concentration, mg/dm³; ^c – methanol concentration, vol.%; ^d – number of the compound on the chromatogram (Fig. 2, 3).

алкогольной продукции из земляники присутствуют только насыщенные спирты C₁–C₆, источниками которых может быть как исходная земляника, так и процессы брожения. При этом в образцах плодовой алкогольной продукции полностью отсутствуют насыщенные C₅(пентан-1-ол)–C₁₇ и ненасыщенные C₅–C₈ спирты, широко представленные в образцах земляники. Вероятно, в процессе брожения эти спирты достаточно быстро окисляются до карбоновых кислот. Часть кислот остается в свободном виде: в образцах плодовой алкогольной продукции обнаружены кислоты C₄–C₁₈, включая ненасыщенные деценовую, гекса- и октадеценовые. Другая часть в процессе брожения превращается в ацил-КоА и подвергается этерификации этанолом с образованием этиловых эфиров. В образцах плодовой алкогольной продукции выявлен широкий спектр этиловых эфиров карбоновых кислот C₁–C₁₈. Также в образцах алкоголя в достаточной концентрации присутствует 2-фенилэтанол (определен как методом газохроматографического анализа в отогнанном спирте-сырце, так и методом газовой

хромато-масс-спектрометрии), характерный компонент ароматических веществ земляники, обладающий запахом розы. Бензиловый спирт, присутствующий в образцах земляники, отсутствует в плодовой алкогольной продукции, поскольку окисляется в процессе брожения до бензальдегида (обнаруженного как в сухом, так и в сладком образцах). Однако дальнейшего окисления до бензойной кислоты и ее эфиров не происходит. Помимо ацетальдегида (характерного для спиртового брожения), бензальдегида и небольшого количества кротонового альдегида (в сладком образце), другие альдегиды в плодовой алкогольной продукции не выявлены. Вероятно, все C₅–C₉ альдегиды и кетоны из земляники в условиях спиртового брожения либо окисляются до карбоновых кислот, либо восстанавливаются до спиртов.

Из эфиров уксусной кислоты в образцах плодовой алкогольной продукции преобладает этиловый эфир, остальные (3-метилбутиловый и гексадеканоиловый) обнаружены в следовых количествах. Среди других эфиров присутствуют этиловые эфиры карбоновых

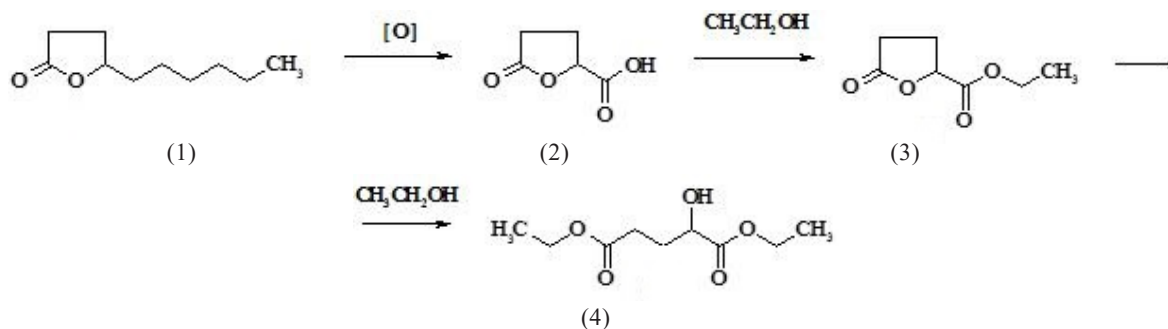


Рисунок 4. Образование диэтилового эфира 2-гидроксипентандиовой кислоты

Figure 4. Formation of 2-hydroxypentanedioic acid diethyl ester

кислот с четным числом атомов углерода ($C_4, C_6, C_8, C_{10}, C_{16}, C_{18}$, в том числе ненасыщенных). Эфиры кислот из цикла трикарбоновых кислот (янтарной и яблочной) образуются на поздних этапах брожения, т. к. они присутствуют в образце сухой плодовой алкогольной продукции и отсутствуют в образце сладкой плодовой алкогольной продукции, процесс брожения в котором был прекращен через 2 суток добавлением спирта. Еще одной особенностью полученных образцов плодовой алкогольной продукции является наличие этиловых эфиров ароматических кислот (4-гидроксibenзойной, коричной, 4-гидроксикоричной, 3-фенилпропановой и 3-фенил-2-гидроксипропановой), которые практически не встречаются в исходной землянике.

Оба образца плодовой алкогольной продукции содержат достаточно много фурановых соединений. Часть из них, например, 2,5-диметил-4-гидрокси-3(2Н)-фуранон и 2,5-диметил-4-метокси-3(2Н)-фуранон, образующиеся из глюкозы [48] и присутствующие в земляничном сырье в свободном или гликозилированном виде, не изменяются в процессе брожения и переходят в плодовую алкогольную продукцию. Эти соединения обладают характерным фруктово-карамельным ароматом.

Другая часть фурановых соединений трансформируется в процессе брожения. Например, 5-гексилтетрагидрофуран-2-он (1), обнаруженный в обоих образцах плодовой алкогольной продукции, окисляется до дигидрофуран-2(3Н)-он-5-карбоновой кислоты (2), которая этерифицируется с образованием этилового эфира дигидрофуран-2(3Н)-он-5-карбоновой кислоты (3), найденного в сухой плодовой алкогольной продукции. Последний реагирует с этанолом с раскрытием фуранового цикла и образованием диэтилового эфира 2-гидроксипентандиовой кислоты (4), найденного в сухой плодовой алкогольной продукции (рис. 4).

2,3-Дигидробензофуран может образовываться при внутримолекулярной окислительной циклизации 2-фенилэтанола (рис. 5).

Из терпенов в образцах плодовой алкогольной продукции был обнаружен только линалоол. Сквален и длинноцепочечные углеводороды (нонадекан, эй-

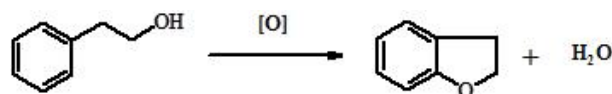


Рисунок 5. Образование 2,3-дигидробензофурана

Figure 5. Formation of 2,3-dihydrobenzofuran

козан, докозан, тетракозан, пентакозан и октакозан), по-видимому, являлись компонентами восков, покрывающих ягоды земляники и перешедших в неизменном виде в плодовую алкогольную продукцию.

Выводы

Физико-химические показатели полученных образцов сухой и сладкой плодовой алкогольной продукции из земляники сорта Брилла соответствуют требованиям ГОСТ 59942-2021. Газохроматографический анализ отогнанного из образцов спирта-сырца показал наличие характерных спутников спиртового брожения. Проведены анализ профиля ароматических соединений сухой и сладкой плодовой алкогольной продукции из земляники с применением метода газовой хромато-масс-спектрометрии и сравнение с ароматическими соединениями трех сортов земляники. Показано, что большинство среднецепочечных (C_7-C_{10}) спиртов, альдегидов и кетонов полностью метаболлизировались дрожжами в процессе ферментации. Основными ароматическими соединениями как сухого, так и сладкого образцов плодовой алкогольной продукции из земляники определены сложные эфиры (в основном этиловые), низкомолекулярные (до C_6) спирты, фурановые соединения и карбоновые кислоты. Таким образом, часть соединений перешла из земляничного сырья в неизменном виде (спирты, сложные эфиры, фураны, углеводороды), другая часть образовалась в процессе ферментации (спирты до C_6 , этиловые эфиры карбоновых кислот, фураны, карбоновые кислоты), тогда как альдегиды, кетоны и терпены полностью ферментировались дрожжами. Полученные результаты свидетельствуют о высоком органолептическом потенциале земляники и

представляют интерес для совершенствования технологий производства плодовой алкогольной продукции. Перспективным направлением продолжения исследования будет детальное изучение трансформации ароматических соединений плодового сырья на разных стадиях ферментации.

Критерии авторства

П. А. Феоктистов выполнил экспериментальную часть работы. В. В. Бахарев сформулировал цель и задачи исследования, осуществил обработку полученных результатов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов при публикации данной статьи.

Contribution

P.A. Feoktistov performed the experimental part of the research. V.V. Bakharev formulated the research objectives and processed the results.

Conflict of interest

The authors declared no conflict of interests regarding the publication of this article.

Список литературы / References

1. Vergauwen D, de Smet I. The strawberry tales: Size matters. Trends in Plant Science. 2019;24(1):1–3. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.10.007>
2. Ulrich D, Komes D, Olbricht K, Hoberg E. Diversity of aroma patterns in wild and cultivated *Fragaria* accessions. Genetic Resources and Crop Evolution. 2007;54:1185–1196. <https://doi.org/10.1007/s10722-006-9009-4>
3. Lara I, García P, Vendrell M. Post-harvest heat treatments modify cell wall composition of strawberry (*Fragaria × ananassa* Duch.) fruit. Scientia Horticulturae. 2006;109(1):48–53. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2006.03.001>
4. Langer SE, Oviedo NC, María M, Burgos JL, Martínez GA, et al. Effects of heat treatment on enzyme activity and expression of key genes controlling cell wall remodeling in strawberry fruit. Plant Physiology and Biochemistry. 2018;130:334–344. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.07.015>
5. Richardson DG, Kositrakun M. Off-flavour development of apples, pears, berries, and plums under anaerobiosis and partial reversal in air. In: Russell LR, Margaret ML, editors. Fruit Flavors. WA: ACS Publications; 1995. vol. 596, pp. 211–223. <https://doi.org/10.1021/bk-1995-0596.ch019>
6. Li C, Wu H, Masisi K, Malunga LN, Song Y. Strawberries. In: Jaiswal AK, editor. Nutritional Composition and Antioxidant Properties of Fruits and Vegetables. London: Academic Press; 2020. pp. 423–435. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812780-3.00026-X>
7. Hui YH. Handbook of Fruits and Fruit Processing. Iowa: Blackwell Publishing; 2006. 697 p. <https://doi.org/10.1002/9780470277737>
8. Lim TK. Edible medicinal and non-medicinal plants: Volume 4, Fruits. London, NY: Springer Dordrecht; 2012. 1023 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-4053-2>
9. Giampieri F, Tulipani S, Alvarez-Suarez JM, Quiles JL, Mezzetti B, et al. The strawberry: Composition, nutritional quality, and impact on human health. Nutrition. 2012;28(1):9–19. <https://doi.org/10.1016/j.nut.2011.08.009>
10. Danyo EK, Ivantsova MN. Fruit phytochemicals: Antioxidant activity and health-promoting properties. Foods and Raw Materials. 2025;13(1):58–72. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2025-1-623>
11. Vendel I, Hertog M, Nicolai B. Fast analysis of strawberry aroma using SIFT-MS: A new technique in postharvest research. Postharvest Biology and Technology. 2019;152:127–138. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2019.03.007>
12. Larsen M, Poll L. Odour thresholds of some important compounds in strawberries. Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung und Forschung. 1992;195:120–123. <https://doi.org/10.1007/BF01201770>
13. Larsen M, Poll L, Olsen C. Evaluation of the aroma composition of some strawberry (*Fragaria ananassa* Duch) cultivars by use of odour threshold values. Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung und Forschung. 1992;195:536–539. <https://doi.org/10.1007/BF01204558>
14. Zhao J, Liu J, Wang F, Wang S, Feng H, et al. Volatile constituents and ellagic acid formation in strawberry fruits of selected cultivars. Food Research International. 2020;138(Part A):109767. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109767>
15. Perez A, Olias R, Luances P, Sanz C. Biosynthesis of strawberry aroma compounds through amino acid metabolism. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2002;50(14):4037–4042. <https://doi.org/10.1021/jf011465r>
16. Azodanlou R, Darbellay C, Luisier J-L, Villettaz J-C, Amado R. Quality assessment of strawberries (*Fragaria* species). Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2003;51(3):715–721. <https://doi.org/10.1021/jf0200467>
17. Ulrich D, Hoberg E, Rapp A, Kecke S. Analysis of strawberry flavour – Discrimination of aroma types by quantification of volatile compounds. Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung und Forschung. 1997;205:218–223. <https://doi.org/10.1007/s002170050154>

18. Urruty L, Giraudel J-L, Lek S, Roudeillac P, Montury M. Assessment of strawberry aroma through SPME/GC and ANN methods. Classification and discrimination of varieties. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2002;50(11):3129–3136. <https://doi.org/10.1021/jf0116799>
19. Hakala MA, Lapvetelainen AT, Kallio HP. Volatile compounds of selected strawberry varieties analyzed by purge-and-trap headspace GC-MS. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2002;50(5):1133–1142. <https://doi.org/10.1021/jf0111256>
20. Zabetakis I, Holden MA. Strawberry flavour: Analysis and biosynthesis. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 1997;74(4):421–434. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0010\(199708\)74:4%3C421::AID-JSFA817%3E3.0.CO;2-6](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0010(199708)74:4%3C421::AID-JSFA817%3E3.0.CO;2-6)
21. Fischer N, Hammerschmidt FJ. A contribution to the analysis of fresh strawberry flavour. *Chemie, Mikrobiologie, Technologie der Lebensmittel*. 1992;14:141–148.
22. da Silva MDRG, das Neves HJC. Complementary use of hyphenated purge-and-trap gas chromatography techniques and sensory analysis in the aroma profiling of strawberries (*Fragaria ananassa*). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 1999;47(11):4568–4573. <https://doi.org/10.1021/jf9905121>
23. Ménager I, Jost M, Aubert C. Changes in physicochemical characteristics and volatile constituents of strawberry (Cv. Cigaline) during maturation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2004;52(5):1248–1254. <https://doi.org/10.1021/jf0350919>
24. Jetti RR, Yang E, Kurnianta A, Finn C, Qian MC. Quantification of selected aroma-active compounds in strawberries by headspace solid-phase microextraction gas chromatography and correlation with sensory descriptive analysis. *Journal of Food Science*. 2007;72(7):487–496. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2007.00445.x>
25. Pérez AG, Rios JJ, Sanz C, Olías JM. Aroma components and free aminoacids in strawberry variety Chandler during ripening. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 1992;40(11):2232–2235. <https://doi.org/10.1021/jf00023a036>
26. Ferreira V, Bueno M, Franco-Luesma E, Culleré L, Fernández-Zurbano P. Key changes in wine aroma active compounds during bottle storage of spanish red wines under different oxygen levels. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2014;62(41):10015–10027. <https://doi.org/10.1021/jf503089u>
27. Sadoudi M, Tourdot-Maréchal R, Rousseaux S, Steyer D, Gallardo-Chacón JJ, *et al.* Yeast–yeast interactions revealed by aromatic profile analysis of Sauvignon Blanc wine fermented by single or co-culture of non-*Saccharomyces* and *Saccharomyces* yeasts. *Food Microbiology*. 2012;32(2):243–253. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2012.06.006>
28. Feng Y, Liu M, Ouyang Y, Zhao X, Ju Y, *et al.* Comparative study of aromatic compounds in fruit wines from raspberry, strawberry, and mulberry in central Shaanxi area. *Food & Nutrition Research*. 2015;59:29290. <https://doi.org/10.3402/fnr.v59.29290>
29. Joshi VK, Sharma S, Bhushan S. Effect of method of preparation and cultivar on the quality of strawberry wine. *Acta Alimentaria*. 2005;34(4):339–353. <https://doi.org/10.1556/AAlim.34.2005.4.2>
30. Kafkas E, Cabaroglu T, Selli S, Bozdoğan A, Kürkçüoğlu M, *et al.* Identification of volatile aroma compounds of strawberry wine using solid-phase microextraction techniques coupled with gas chromatography-mass spectrometry. *Flavour and Fragrance Journal*. 2006;21(1):68–71. <https://doi.org/10.1002/ffj.1503>
31. Li X, Xia X, Wang Z, Wang Y, Dai Y, *et al.* Cloning and expression of *Lactobacillus brevis* β -glucosidase and its effect on the aroma of strawberry wine. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2022;46(3):e16368. <https://doi.org/10.1111/jfpp.16368>
32. Hidalgo C, Torija MJ, Mas A, Mateo E. Effect of inoculation on strawberry fermentation and acetification processes using native strains of yeast and acetic acid bacteria. *Food Microbiology*. 2013;34(1):88–94. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2012.11.019>
33. Sun Y, Zhang T, Lü H, Yu Z, Li X. Effect of added sulphur dioxide levels on the fermentation characteristics of strawberry wine. *Journal of the Institute of Brewing*. 2016;122(3):446–451. <https://doi.org/10.1002/jib.342>
34. Hornedo O, Álvarez-Fernández RM, Cerezo A, Garcia-Garcia I, Troncoso AM, *et al.* Influence of fermentation process on the anthocyanin composition of wine and vinegar elaborated from strawberry. *Journal of Food Science*. 2017;82(2):364–372. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.13624>
35. Sharma S, Joshi VK, Abrol G. An overview on Strawberry [*Fragaria* \times *ananassa* (Weston) Duchesne ex Rozier] wine production technology, composition, maturation and quality evaluation. *Natural Product Radiance*. 2009;8(4):356–365.
36. Song Y, Zhang Y, Liu N, Ye D, Gong X, *et al.* Volatile compounds in wild strawberry and their odorants of wild strawberry wines: Effects of different stages of fermentation. *International Journal of Food Properties*. 2017;20(1):399–415. <https://doi.org/10.1080/10942912.2017.1297951>
37. Čakar U, Petrović A, Janković M, Pejin B, Vajs V, *et al.* Differentiation of wines made from berry and drupe fruits according to their phenolic profiles. *European Journal of Horticultural Science*. 2018;83(1):49–61. <https://doi.org/10.17660/eJHS.2018/83.1.7>
38. Pereira AP, Mendes-Ferreira A, Dias LG, Oliveira JM, Estevinho LM, *et al.* Volatile composition and sensory properties of mead. *Microorganisms*. 2019;7(10):404. <https://doi.org/10.3390/microorganisms7100404>
39. Nehra KS, Sachdeva H, Kumar P, Jangra M, Jangra S. Production technology and analysis of quality parameters of strawberry wine. *Plant Cell Biotechnology and Molecular Biology*. 2021;22(21–22):40–46.

40. Yang W, Liu S, Marsol-Vall A, Tähti R, Laaksonen O, et al. Chemical composition, sensory profile and antioxidant capacity of low-alcohol strawberry beverages fermented with *Saccharomyces cerevisiae* and *Torulaspora delbrueckii*. LWT. 2021;149:111910. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111910>
41. Гержикова В. Г. Методы технoхимического контроля в виноделии. Симферополь: Таврида; 2002. 260 с. [Gerzhikova VG. Technochemical control in winemaking. Simferopol: Tavrida; 2009. 304 p. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/XXPJXB>
42. Родопуло А. К. Основы биохимии виноделия. М.: Легкая и пищевая промышленность; 1983. 240 с. [Rodopulo AK. Basic winemaking biochemistry. Moscow: Legkaya i pishhevaya promy'shennost'; 1983. 240 p. (In Russ.)]
43. Prat L, Espinoza MI, Agosin E, Silva H. Identification of volatile compounds associated with the aroma of white strawberries (*Fragaria chiloensis*). Journal of the Science of Food and Agriculture. 2013;94(4):752–759. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6412>
44. Zorrilla-Fontanesi Y, Rambla JL, Cabeza A, Medina JJ, Sánchez-Sevilla JF, et al. Genetic analysis of strawberry fruit aroma and identification of *o*-methyltransferase *FaOMT* as the locus controlling natural variation in mesifurane content. Plant Physiology. 2012;159(2):851–870. <https://doi.org/10.1104/pp.111.188318>
45. Wang C, Zhang L, Qiao Y, Liao L, Shi D, et al. Effects of ultrasound and ultra-high pressure pretreatments on volatile and taste compounds of vacuum-freeze dried strawberry slice. LWT. 2022;160:113232. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113232>
46. Yao X-C, Zhang H-L, Ma X-R, Xia N-Y, Duan C-Q, et al. Leaching and evolution of anthocyanins and aroma compounds during Cabernet Sauvignon wine fermentation with whole-process skin-seed contact. Food Chemistry. 2024;436:137727. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137727>
47. Diez-Ozaeta I, Lavilla M, Amárita F. Wine aroma profile modification by *Oenococcus oeni* strains from Rioja Alavesa region: Selection of potential malolactic starters. International Journal of Food Microbiology. 2021;356:109324. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2021.109324>
48. Zabetakis I, Gramshaw JW, Robinson DS. 2,5-Dimethyl-4-hydroxy-2H-furan-3-one and its derivatives: Analysis, synthesis and biosynthesis – A review. Food Chemistry. 1999;65(2):139–151. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(98\)00203-9](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(98)00203-9)
49. Шелехова Н. В., Шелехова Т. М., Скворцова Л. И., Полтавская Н. В. Определение летучих органических примесей в виски методом газовой хромато-масс-спектрометрии. Техника и технология пищевых производств. 2022. Т. 52. № 4. С. 787–796. [Shelekhova NV, Shelekhova TM, Skvortsova LI, Poltavskaya NV. Gas chromatography-mass spectrometry of volatile organic impurities in whiskey. Food Processing: Techniques and Technology. 2022;52(4):787–796. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-4-2406>
50. Li N, Li G, Guan X, Li A, Tao Y. Volatile aroma compound-based decoding and prediction of sweet berry aromas in dry red wine. Food Chemistry. 2025;463(Part 2):141248. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.141248>
51. Wang H, Shang R, Gao S, Huang A, Huang H, et al. Characterization of key aroma compounds in a novel Chinese rice wine *Xijiao Huojiu* during its biological-ageing-like process by untargeted metabolomics. Heliyon. 2024;10(14):e34396. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34396>
52. Ao H, Tang C, Lu Y, Zhang Y, He L, et al. Characterization of physicochemical properties, sensory characteristics, and volatile compounds with a special focus on the terpene profile of commercial Chinese kiwifruit wines. Journal of Food Composition and Analysis. 2025;140:107187. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2025.107187>
53. Welke JE, Nicolli KP, Hernandez KC, Biasoto ACT, Zini CA. Adaptation of an olfactometric system in a GC-FID in combination with GCxGC/MS to evaluate odor-active compounds of wine. Food Chemistry. 2022;370:131004. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131004>
54. Jia X, Cui H, Qin S, Ren J, Zhang Zh, et al. Characterizing and decoding the key odor compounds of *Spirulina platensis* at different processing stages by sensomics. Food Chemistry. 2024;461:140944. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.140944>
55. Qiu Y, He X, Zheng W, Cheng Zh, Zhang J, et al. Odor-induced saltiness enhancement of volatile compounds screened from duck stewed with chili pepper. Food Chemistry. 2025;471:142717. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.142717>
56. Zhang R, Tang Ch, Jiang B, Mo X, Wang Zh. Characterization of volatile compounds profiles and identification of key volatile and odor-active compounds in 40 sweetpotato (*Ipomoea Batatas* L.) varieties. Food Chemistry: X. 2025;25:102058. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.102058>
57. Rodrigues da Silva M, Loos HM, Buettner A. Identification of odor-active compounds in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) from recirculated aquaculture systems: A case study with different depuration procedures. Food Research International. 2024;192:114755. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114755>