

АВГУСТ 2026 | ВЫПУСК №8

АГРОПРОДОВОЛЬСТВЕННАЯ ЭКОНОМИКА



АРЕJ.RU

ISSN 2412-2521

АГРАРНЫЙ РЫНОК
ЭКОНОМИКА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО
ПРЕДПРИЯТИЯ
БУХГАЛТЕРСКИЙ УЧЕТ, АНАЛИЗ И АУДИТ
НА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОМ
ПРЕДПРИЯТИИ
ФИНАНСОВО-КРЕДИТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
АПКАГРАРНЫЙ МАРКЕТИНГ

**НАУЧНАЯ ОБЩЕСТВЕННАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ
ПРОФЕССИОНАЛЬНАЯ НАУКА**

АГРОПРОДОВОЛЬСТВЕННАЯ ЭКОНОМИКА

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ
ЭЛЕКТРОННЫЙ ЖУРНАЛ**

№8/2026

www.apej.ru

Нижний Новгород 2026

УДК 338.43

ББК 65.32

A 263

Международный научно-практический электронный журнал «Агропродовольственная экономика», Нижний Новгород: НОО «Профессиональная наука» - №8 - 2026. – 96 с.

ISSN 2412-2521

Статьи журнала содержат информацию, где обсуждаются наиболее актуальные проблемы современной аграрной науки и результаты фундаментальных исследований в различных областях знаний экономики и управления агропромышленного комплекса.

Журнал предназначен для научных и педагогических работников, преподавателей, аспирантов, магистрантов и студентов с целью использования в научной работе и учебной деятельности.

Все включенные в журнал статьи прошли научное рецензирование и опубликованы в том виде, в котором они были представлены авторами. За содержание статей ответственность несут авторы.

Информация об опубликованных статьях предоставлена в систему Российского индекса научного цитирования – **РИНЦ** по договору № 685-10/2015.

Электронная версия журнала находится в свободном доступе на сайте [www.apej.ru](http://apej.ru) (http://apej.ru/2015/11?post_type=article)

УДК 338.43

ББК 65.32

Редакционная коллегия:

Главный редактор – **Краснова Наталья Александровна**, кандидат экономических наук, доцент

Редакционный совет:

1. **Пестерева Нина Михайловна** – член-корр. Российской академии естественных наук; Действительный член Академии политических наук; Действительный член Международной академии информатизации образования; Доктор географических наук, Профессор метеорологии, профессор кафедры управления персоналом и экономики труда Дальневосточного федерального университета, Школы экономики и менеджмента г. Владивосток. Пестерева Н.М. награждена Медалью Ордена за услуги перед Отечеством II степени (за высокие достижения в сфере образования и науки). Является почетным работником высшего профессионального образования РФ. *В полномочия входят организация и/или проведение экспертной оценки статей по направлению “Экономика труда в АПК”, “Эколого-экономическая эффективность производства”.*
2. **Бухтиярова Татьяна Ивановна** – доктор экономических наук, профессор. Профессор кафедры “Экономика и финансы”. (Финансовый университет при Правительстве РФ, Челябинский филиал). *В полномочия входят организация и/или проведение экспертной оценки статей общеэкономической направленности.*
3. **Гонова Ольга Владимировна** – доктор экономических наук, профессор. Зав. кафедрой менеджмента и экономического анализа в АПК (ФГБОУ ВПО “Ивановская государственная сельскохозяйственная академия им. академика Д.К. Беляева”, г. Иваново). *В полномочия входят организация и/или проведение экспертной оценки статей общеэкономической направленности.*
4. **Носов Владимир Владимирович** – доктор экономических наук, профессор кафедры бухгалтерского учета и статистики ФГБОУ ВПО “Российский государственный социальный университет”. *В полномочия входят организация и/или проведение экспертной оценки статей общеэкономической направленности.*
5. **Самотаев Александр Александрович** – доктор биологических наук, профессор. Зав. каф. Экономики и организации АПК (ФГБОУ ВПО “Уральская государственная академия ветеринарной медицины”, г. Троицк). *В полномочия входят организация и/или проведение экспертной оценки статей общеэкономической направленности.*
6. **Фирсова Анна Александровна** – доктор экономических наук, доцент, профессор кафедры финансов и кредита (ФГБОУ ВПО “Саратовский государственный университета им. Н.Г. Чернышевского”). *В полномочия входят организация и/или проведение экспертной оценки статей общеэкономической направленности.*
7. **Андреев Андрей Владимирович** – кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры финансов, кредита и налогообложения (Поволжский институт управления имени П.А. Столыпина – филиал Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации). *В полномочия входят организация и/или проведение экспертной оценки статей в рубриках: Управление и менеджмент, Экономика хранения и переработки сельскохозяйственной продукции.*
8. **Захарова Светлана Германовна** – кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры менеджмента и управления персоналом НОУ ВПО НИМБ. *В полномочия входят организация и/или проведение экспертной оценки статей в рубриках: Управление и менеджмент.*
9. **Земцова Наталья Александровна** – кандидат экономических наук, доцент кафедры “Бухгалтерский учет, анализ и аудит” (Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова). *В полномочия входят организация и/или проведение экспертной оценки статей общеэкономической направленности.*
10. **Новикова Надежда Александровна** – кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры “Бухгалтерский учет, анализ и аудит” (Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова). *В полномочия входят организация и/или проведение экспертной оценки статей общеэкономической направленности.*
11. **Новоселова Светлана Анатольевна** – кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры “Бухгалтерский учет, анализ и аудит” (Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова). *В полномочия входят организация и/или проведение экспертной оценки статей общеэкономической направленности.*

12. Тиндова Мария Геннадьевна – кандидат экономических наук; доцент кафедры прикладной математики и информатики (Саратовский социально-экономический институт (филиал) ФБГОУ ВПО РЭУ им. Плеханова). *В полномочия входят организация и/или проведение экспертной оценки статей по проблемам экономико-математического моделирования.*

13. Шарикова Ирина Викторовна – кандидат экономических наук, доцент, зав. кафедрой “Бухгалтерский учет, анализ и аудит” (Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова). *В полномочия входят организация и/или проведение экспертной оценки статей общеэкономической направленности.*

14. Шаталов Максим Александрович – кандидат экономических наук. Начальник научно-исследовательского отдела (АНОО ВПО “Воронежский экономико-правовой институт”, г. Воронеж), зам. гл. редактора мульти-дисциплинарного журнала «Территория науки». *В полномочия входят организация и/или проведение экспертной оценки статей общеэкономической направленности.*

Материалы печатаются с оригиналов, поданных в оргкомитет, ответственность за достоверность информации несут авторы статей

© НОО Профессиональная наука, 2015-2026

Оглавление

АГРОИНЖЕНЕРИЯ..... 7

Лукиенко Л.В. Совершенствование гидропривода зерноуборочного комбайна как фактор повышения надежности и энергоэффективности уборочного процесса..... 7

МИРОВОЙ АПК 14

Куликова Е.С. Трансформация агропромышленного комплекса России и Европы: влияние санкций, развитие расчетных механизмов и внедрение устойчивых сельскохозяйственных практик..... 14

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА И ПЕРЕРАБОТКИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ 24

Бурак Л.Ч., Саманкова Н.В., Егорова З.Е. Диоксид серы в пищевых продуктах: механизмы консервации, оценка безопасности и нормативное регулирование..... 24

Бурак Л.Ч., Саманкова Н.В., Егорова З.Е. Современные и интеллектуальные методы обнаружения диоксида серы в пищевых продуктах..... 53

ЭКОНОМИКА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ..... 86

Комарова О.В. Современные тренды и перспективы развития крестьянских (фермерских) хозяйств в России 86

АГРОИНЖЕНЕРИЯ

УДК 631.356.2:621.225

Лукиенко Л.В. Совершенствование гидропривода зерноуборочного комбайна как фактор повышения надежности и энергоэффективности уборочного процесса

Improving the hydraulic drive system of a grain combine harvester as a factor in enhancing the reliability and energy efficiency of the harvesting process

Лукиенко Леонид Викторович

Д-р техн. наук, проф.
Тульский государственный
педагогический университет им. Л.Н. Толстого,
Россия

Lukienko Leonid Viktorovich
Doctor of Techn. Sc., Professor
Tula State Pedagogical University named after L.N. Tolstoy,
Russia

Аннотация. В статье рассмотрены особенности построения и функционирования гидропривода зерноуборочного комбайна, определяющие надежность, управляемость и энергетическую эффективность машины в условиях переменной нагрузки. В статье показано, что для комбайнов характерны высокие переменные нагрузки, значительные требования к маневренности и чувствительность к отказам гидроаппаратуры, что делает актуальными расчет, диагностику и совершенствование гидросистемы. Установлено, что наиболее уязвимыми элементами являются насосно-распределительные узлы, предохранительные клапаны, трубопроводы и исполнительные гидроцилиндры, а отказ отдельных компонентов способен вызвать существенное снижение технической готовности комбайна. Отмечено, что использование фильтров грубой очистки вместо штатных значительно повышает изнашивание прецизионных гидравлических контактных пар и способствует их преждевременному выходу из строя. Обоснована целесообразность перехода к адаптивным гидравлическим системам с регулируемыми режимами подачи рабочей жидкости и диагностическим контролем параметров давления и расхода, поскольку такие решения обеспечивают более устойчивую работу органов управления и ходовой части, а также снижение удельных потерь энергии. На основе анализа технической литературы сформулированы научная новизна, практическая значимость, постановка задачи, методический аппарат и направления дальнейшего совершенствования гидропривода зерноуборочных машин.

Ключевые слова. зерноуборочный комбайн, гидропривод, гидросистема, гидростатическая трансмиссия, надежность, энергоэффективность, диагностика, адаптивное управление, гидроцилиндр, предохранительный клапан.

Abstract. The article examines the features of the design and operation of the hydraulic drive of a grain combine harvester, which determine the reliability, controllability, and energy efficiency of the machine under variable load conditions. The article shows that combines are characterized by high variable loads, significant requirements for maneuverability, and sensitivity to hydraulic equipment failures, which makes the calculation, diagnostics, and improvement of the hydraulic system relevant. It has been established that the most vulnerable components are the pump and distribution units, safety

valves, pipelines, and actuating hydraulic cylinders, and the failure of individual components can cause a significant reduction in the technical readiness of the combine. It has been noted that the use of coarse filters instead of standard ones significantly increases the wear of precision hydraulic contact pairs and contributes to their premature failure. The feasibility of transitioning to adaptive hydraulic systems with adjustable modes of working fluid supply and diagnostic monitoring of pressure and flow parameters has been substantiated, since such solutions ensure more stable operation of the control elements and the running gear, as well as a reduction in specific energy losses. Based on the analysis of technical literature, the scientific novelty, practical significance, problem statement, methodological framework, and directions for further improvement of the hydraulic drive of grain harvesting machines have been formulated.

Keywords. grain combine harvester, hydraulic drive, hydraulic system, hydrostatic transmission, reliability, energy efficiency, diagnostics, adaptive control, hydraulic cylinder, safety valve

Рецензент: Бюллер Елена Александровна – кандидат экономических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «Адыгеский государственный университет»

Вступление. Актуальность избранной темы статьи обусловлена тем, что необходимое и достаточное обеспечение населения продуктами сельского хозяйства российского производства является приоритетной задачей агропромышленного комплекса Тульской области. Решение этой важной народно-хозяйственной задачи во многом зависит от эффективной производительной работы зерноуборочного комбайна. На её выполнение оказывает значительное влияние работа его гидропривода.

Гидропривод является одной из наиболее ответственных систем современного зерноуборочного комбайна. Он используется в ходовой трансмиссии, приводах жатки, мотовила, выгрузного шнека, вентиляторов, измельчителя и других рабочих органов. Особое значение имеет гидростатический ходовой привод, обеспечивающий бесступенчатое изменение скорости, плавное трогание, реверсирование и передачу значительного крутящего момента при малой скорости движения.

Научная новизна исследования состоит в систематизации функциональных требований к гидроприводу зерноуборочного комбайна как к многорежимной энергоуправляющей системе, работающей в условиях резко изменяющейся нагрузки. Предлагается рассматривать гидропривод не только как совокупность исполнительных механизмов, но и как объект адаптивного управления, в котором параметры давления, расхода и дросселирования должны изменяться в зависимости от режима движения, технологической нагрузки и состояния узлов.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования результатов при модернизации существующих комбайнов и проектировании новых машин с повышенной технической готовностью. Предлагаемые подходы позволяют снизить вероятность аварийных отказов, уменьшить простои в уборочный период и сократить эксплуатационные затраты на ремонт и обслуживание гидросистемы. Кроме

того, адаптивное регулирование гидропривода создает предпосылки для снижения удельного расхода топлива и повышения стабильности технологических режимов при уборке зерновых культур.

Цель исследования заключается в разработке научно обоснованных положений по совершенствованию гидропривода зерноуборочного комбайна, обеспечивающих повышение надежности, ремонтпригодности и энергоэффективности.

Для достижения цели необходимо решить следующие **задачи**: проанализировать состав и функции основных элементов гидропривода; выявить типовые отказы и их причины; определить наиболее перспективные направления повышения надежности.

Материалы и методы. В качестве исходной базы использованы результаты опубликованных исследований по гидравлическим системам комбайнов, включая сведения о надежности элементов, особенностях конструкции гидроприводов и эффективности адаптивных схем.

Методическая основа включает системный анализ, сравнительное сопоставление конструктивных решений, функционально-структурный подход и обобщение экспериментальных данных по отказам гидроаппаратуры.

Анализ состояния парка и причин отказов систем зерноуборочных комбайнов позволяет отметить следующее: по данным на 2024 год, из общего наличия парка в 41,3 тыс. зерноуборочных комбайнов около 14,1 тыс. единиц (34%) находились в неисправном состоянии. Значительная часть этих поломок напрямую связана с износом гидравлических систем, включая насосы высокого давления аксиально-поршневого типа. Для комбайнов со сроком эксплуатации более 8–10 лет вероятность внезапного отказа гидронасоса возрастает в 2,5–3 раза по сравнению с новой техникой. В период активной уборки интенсивность работы гидравлики достигает пиковых значений — объемный расход масла может составлять 120–160 л/мин при давлении до 25–30 МПа. Это приводит к ускоренному износу качающих узлов. В современных условиях эксплуатации (2024–2025 годы), из-за дефицита оригинальных запчастей после ухода западных брендов (John Deere, Claas), до 40% времени сезонных простоев зерноуборочных комбайнов приходится на неисправности гидравлической аппаратуры. Это выходы из строя гидрораспределителей (золотниковых клапанов), электромагнитов управления и секций потока. Основная причина — абразивный износ золотников из-за недостаточной фильтрации масла при использовании неоригинальных масел российского или китайского производства. Ресурс золотниковых пар гидропривода зерноуборочных комбайнов ограничивается не объемным износом, а потерей функциональной точности позиционирования из-за радиального люфта, вызванного

10

абразивным воздействием продуктов окисления масла. Фактический выход из строя электроклапанов пропорционально-дистанционного управления (в системах с функцией копирования рельефа) происходит в среднем через 800–1000 моточасов (при плановой норме 1200–1500 часов) активной уборки. Использование альтернативных поставщиков (преимущественно китайских) гидроаппаратуры вместо оригинальных приводит к росту рекламаций по клапанным группам на 15–20% в первый год эксплуатации новой техники.

Таблица 1

Косвенная оценка факторов, влияющих на показатели надёжности гидроаппаратуры зерноуборочных комбайнов.

Показатель	Значение / Диапазон	Условия
Средняя наработка на отказ	800 – 1500 моточасов	Зависит от класса комбайна, чистоты рабочей жидкости и качества фильтрации. Для новых машин импортного производства показатель ближе к верхней границе, для отечественной техники среднего класса — к нижней.
Гарантийный ресурс насоса	1200 – 2000 моточасов	Устанавливается заводами-изготовителями, но часто совпадает с моментом первого капитального ремонта системы.
Критический износ деталей	2500 – 3000 моточасов	Средний срок службы плунжерных пар и распределительного диска до потери герметичности и падения КПД ниже допустимых 85%.
Частота замены уплотнений	каждые 500 – 700 моточасов	Профилактическая мера для предотвращения наружных утечек под высоким давлением.
Основная причина преждевременного выхода из строя	Загрязнение рабочей жидкости	До 60% аварийных отказов происходит из-за попадания абразивных частиц размером свыше 10 мкм, что вызывает задиры на зеркале цилиндрического блока.
Допустимое падение производительности	не более 10–15%	При падении подачи насоса более чем на 15% от номинальной или росте температуры масла выше 90–95 °С узел подлежит замене согласно регламентам ТО «Ростсельмаш» и Claas.

Проводя анализ факторов, критически влияющих на надёжность гидросистем зерноуборочных комбайнов можно выделить следующие: Превышение класса чистоты масла ISO 4406 значения 18/16/13 сокращает ресурс насоса почти вдвое. Использование фильтров грубой очистки (25–40 микрон) вместо штатных (10–15 микрон) является главной причиной разрушения прецизионных пар. Работа двигателя при температуре гидравлического масла выше 95 °С ведет к деградации вязкости и разрушению уплотнений. Каждые 10 градусов сверх нормы снижают вязкость масла

примерно на 15%, увеличивая риск сухого трения. Кавитационный износ разрушает поверхность бронзового распределительного диска за 100–200 часов интенсивной работы. Аксиально-поршневые насосы переменной производительности, применяемые в приводах ходовой части и жатки, имеют на 20–30% меньший ресурс до капремонта, чем шестеренные насосы привода мотовила, из-за сложности механики и высоких оборотов.

При рассмотрении перспективных решений учитывались данные по диагностике гидравлических приводов, а также материалы о применении пропорциональной аппаратуры, датчиков положения и программно-логического управления в системах выравнивания и регулирования рабочих органов. Для интерпретации результатов использован инженерный анализ потерь давления и влияния параметров гидравлической схемы на устойчивость работы комбайна в полевых условиях.

Результаты и обсуждение. Анализ литературы [1-7] показывает, что гидропривод зерноуборочного комбайна выполняет несколько взаимосвязанных функций: управление движением машины, обеспечение работы рулевого управления, подъемно-опускных механизмов, регулирование жатки, а также привод вспомогательных агрегатов. В современных машинах именно объемный гидропривод остается одной из наиболее ответственных систем, определяющих надежность техники, а его отказы составляют заметную долю эксплуатационных неисправностей. Исследования надежности подтверждают, что критическими элементами являются клапанные узлы, насосы и распределители; износ или заклинивание отдельных деталей может вызвать как частичную потерю работоспособности, так и полный отказ гидросистемы.

Практика проектирования показывает, что перспективным направлением является переход к адаптивным гидросистемам с регулируемой подачей и давлением. В работах по гидросистемам комбайнов и жаток отмечено, что применение управляемых клапанов, датчиков перемещения и программных регуляторов обеспечивает более стабильный ход исполнительных механизмов и уменьшает динамические перегрузки. Для ходовой части и гидростатических трансмиссий это особенно важно, поскольку переменная нагрузка в поле требует точного согласования тягового усилия, скорости движения и расхода энергии.

С инженерной точки зрения совершенствование гидропривода целесообразно вести по следующим направлениям: оптимизация насосно-моторной группы, снижение внутренних утечек, повышение качества фильтрации, внедрение пропорциональных распределителей, использование датчиков давления и температуры, а также создание алгоритмов диагностического контроля. В публикациях по комбайнам показано, что

улучшение параметров привода может заметно влиять на производительность, потери зерна и расход топлива; в частности, адаптивные гидравлические решения демонстрируют лучшие результаты по комплексным технико-эксплуатационным показателям по сравнению с механическими системами. Следовательно, гидропривод следует рассматривать как один из ключевых объектов повышения эффективности уборочной машины.

Заключение. Гидропривод зерноуборочного комбайна является функционально сложной и эксплуатационно нагруженной системой, от которой напрямую зависят надежность, управляемость и производительность машины. Для повышения работоспособности и показателей надёжности гидропривода можно рекомендовать следующие практические рекомендации: замена напорных фильтров строго каждые 250–300 моточасов (а не по индикатору загрязнения); ежедневный контроль температуры масла в баке во время пиковых нагрузок; обязательная промывка системы при каждой замене насоса для удаления металлической стружки, иначе новый агрегат выйдет из строя в первые 50–100 часов: использование масел с индексом вязкости не ниже 150 для компенсации температурных перепадов в российских климатических условиях. Анализ источников подтверждает, что основными направлениями совершенствования являются адаптивное регулирование, повышение надежности клапанных и насосных узлов, а также внедрение диагностики состояния гидросистемы. Наиболее перспективной представляется концепция интеллектуализированного гидропривода, в котором изменение расхода и давления согласуется с реальной нагрузкой и условиями движения комбайна. Это обеспечивает снижение отказов, улучшение технологической стабильности и повышение энергоэффективности уборочного процесса.

Библиографический список

1. Морозова А. А., Александров В. А. Совершенствование гидропривода ходовой части зерноуборочного комбайна // Актуальные проблемы развития технических наук. Екатеринбург: УрФУ, 2020. С. 37–44.
2. Xie F. Design on Full-Hydraulic Drive System of Corn Combine Harvester // Proceedings of the 2014 International Conference on Mechatronics, Electronic, Industrial and Control Engineering. Atlantis Press, 2014. DOI: 10.2991/meic-14.2014.97.
3. Hydraulic System Design of Combined Harvester Header and Simulation Analysis // IOP Conference Series / related publication.

4. Tracked Self-Propelled Combine Harvester Typical Hydraulic Systems // Scientific.Net.
5. Design and experiment of chassis automatic lifting hydraulic system for a combine harvester operating in hilly regions // SciOpen, 2024.
6. Model-based efficiency evaluation of combine harvester drive train // Landtechnik / Agricultural Engineering. DOI:10.2991/meic-14.2014.97
7. Structural Fault Detection and Diagnosis for Combine Harvesters // Haiyang Wang, Liyun Lao, Honglei Zhang, Zhong Tang, Pengfei Qian, Qi He. PMC, 2025. Doi: 10.3390/s25133851

МИРОВОЙ АПК

УДК 338.43

Куликова Е.С. Трансформация агропромышленного комплекса России и Европы: влияние санкций, развитие расчетных механизмов и внедрение устойчивых сельскохозяйственных практик

Transformation of the agro-industrial complex in Russia and Europe: the impact of sanctions, the development of settlement mechanisms, and the introduction of sustainable agricultural practices

Куликова Елена Сергеевна,

доктор экономических наук,
профессор кафедры государственного и муниципального управления,
Уральский государственный экономический университет, г. Екатеринбург, Россия
Kulikova Elena Sergeevna,
Doctor of Economics, Professor, Department of Public and Municipal Administration, Ural
State University of Economics, Yekaterinburg, Russia

Аннотация. В статье исследуется трансформация агропромышленного комплекса России и европейских стран под воздействием санкционных ограничений, изменения внешнеторговых потоков, усложнения трансграничных расчетов и усиления требований к экологической устойчивости производства. Цель работы состоит в выявлении различий и точек сближения российской и европейской моделей адаптации аграрного сектора, а также в обосновании направлений развития расчетной инфраструктуры и устойчивых сельскохозяйственных практик. Методологическую основу составили сравнительный, системный и институциональный подходы, методы структурно-логического анализа и качественной оценки регуляторных решений. Установлено, что российская модель трансформации ориентирована преимущественно на технологический суверенитет, импортозамещение, перенаправление экспортных потоков и расширение расчетов в национальных валютах. Европейская модель в большей степени сочетает диверсификацию поставок, компенсационную поддержку производителей, экологическую обусловленность субсидий и ускоренное внедрение ресурсосберегающих технологий. Показано, что устойчивость агропромышленного комплекса определяется не только объемом государственной поддержки, но и согласованностью финансовых, логистических, технологических и природоохранных механизмов. Предложена трехконтурная модель трансформации, включающая адаптацию цепочек поставок, развитие защищенных расчетных каналов и внедрение практик точного земледелия, замкнутого использования ресурсов и снижения углеродной интенсивности. Научная новизна заключается в совместном рассмотрении санкционного, платежного и экологического факторов как взаимосвязанных элементов структурной перестройки агропродовольственных систем. Практическая значимость результатов состоит в возможности их использования при разработке мер аграрной политики, программ поддержки экспорта, региональных стратегий продовольственной безопасности и корпоративных планов модернизации сельскохозяйственного производства.

Ключевые слова: агропромышленный комплекс, санкции, расчетные механизмы, технологический суверенитет, устойчивое сельское хозяйство, импортозамещение, аграрная политика.

Abstract. The article examines the transformation of the agro-industrial complex in Russia and European countries under the influence of sanctions, redirected trade flows, complicated cross-border settlements, and growing environmental requirements. The purpose of the study is to identify differences and convergence points between Russian and European

models of agricultural adaptation and to substantiate priorities for payment infrastructure and sustainable farming practices. The methodology combines systemic and institutional approaches with structural-logical analysis and qualitative assessment of regulatory measures. The findings show that the Russian transformation model is mainly focused on technological sovereignty, import substitution, diversification of export destinations, and wider use of national currencies. The European model combines supply diversification, compensatory support for producers, environmental conditionality of subsidies, and adoption of resource-efficient technologies. The stability of the agro-industrial complex depends not only on public support but also on the coordination of financial, logistical, technological, and environmental mechanisms. A three-contour transformation model is proposed, covering supply-chain adaptation, protected settlement channels, and implementation of precision farming, circular resource use, and lower-carbon production. The scientific novelty lies in considering sanctions, payment systems, and sustainability requirements as interconnected drivers of structural change in agri-food systems. The results may support agricultural policy, export programs, regional food-security strategies and modernization planning.

Keywords: *agro-industrial complex, sanctions, settlement mechanisms, technological sovereignty, sustainable agriculture, import substitution, agricultural policy.*

Рецензент: Бюллер Елена Александровна – кандидат экономических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «Адыгеский государственный университет»

Введение

Современная трансформация агропромышленного комплекса России и Европы определяется одновременным действием нескольких групп факторов: санкционными ограничениями, изменением географии поставок, ростом стоимости ресурсов, перестройкой трансграничных расчетов и усилением требований к экологической результативности сельскохозяйственного производства. В отличие от прежних периодов, когда изменения в аграрной сфере преимущественно связывались с колебаниями спроса, урожайностью и бюджетной поддержкой, текущий этап характеризуется системной взаимозависимостью финансовой, технологической, логистической и природоохранной составляющих. Поэтому устойчивость АПК следует рассматривать не как сохранение прежней структуры, а как способность производственных цепочек изменять поставщиков, рынки, способы оплаты и технологические решения без критического снижения продовольственной доступности.

А. В. Петриков связывает совершенствование аграрной политики в условиях санкционного давления с необходимостью перехода от краткосрочного компенсирования потерь к структурным мерам, укрепляющим научно-технологическую базу, сельские территории и внутренние источники воспроизводства [8]. О. И. Дудина, Д. Х. Бухарова, Ш. А. Мусакаев и Д. С. Аджаматова рассматривают расширение рублевых расчетов как инструмент снижения валютной зависимости внешнеторговых операций и повышения устойчивости национального платежного контура [2]. Такой подход позволяет включить расчетную инфраструктуру в число самостоятельных факторов конкурентоспособности аграрного экспорта.

Е. А. Скворцов и А. С. Митрофанова подчеркивают, что внешнеэкономические ограничения не отменяют экологических и социальных критериев устойчивого развития, а, напротив, требуют более рационального использования земли, техники, энергии и трудовых ресурсов [11]. А. А. Копасов, анализируя зарубежные механизмы аграрной политики, показывает значимость сочетания субсидирования, страхования, регулирования рынков и стимулирования инноваций с учетом особенностей национальной модели сельского хозяйства [5]. Следовательно, прямое копирование отдельных европейских инструментов без адаптации к российской институциональной и пространственной специфике не обеспечивает необходимого эффекта.

И. Н. Шамрай, Р. М. Шахнович и Т. М. Рябухина относят к ключевым проблемам российского сельского хозяйства технологические ограничения, инвестиционный дефицит, кадровые диспропорции и недостаточную развитость сельской инфраструктуры, одновременно отмечая потенциал цифровизации и модернизации производства [14]. А. А. Каравдин обращает внимание на двойственный характер концентрации в агропродовольственном комплексе: рост масштаба способен повышать производительность и инвестиционные возможности, но чрезмерное укрупнение усиливает риски ослабления локальной экономики и занятости сельских территорий [3].

А. Р. Сайфетдинов обосновывает суверенное инновационное развитие как формирование отечественных компетенций в селекции, генетике, технике, цифровых системах и коммерциализации аграрных разработок [9]. К. С. Никколов показывает, что последствия санкций территориально неоднородны и зависят от отраслевой специализации региона, импортной зависимости, транспортной доступности и способности предприятий быстро менять хозяйственные связи [6]. Это означает, что единая федеральная политика должна дополняться дифференцированными региональными инструментами.

О. Д. Фальченко приходит к выводу о невозможности универсального переноса страновых моделей сельского хозяйства и указывает на целесообразность избирательного заимствования механизмов, соответствующих ресурсным, демографическим и институциональным условиям России [12]. И. В. Борзунов, В. В. Калицкая и О. А. Рыкалина трактуют санкции как источник дополнительных издержек и неопределенности, который одновременно ускоряет импортозамещение, поиск новых рынков и организационную адаптацию предприятий АПК [1].

О. И. Хайруллина на основе межстранового анализа выделяет тенденцию к усложнению государственной поддержки, когда прямые выплаты дополняются страховыми, инвестиционными, инновационными и экологическими стимулами [13]. Т.

В. Остапенко акцентирует необходимость укрепления межотраслевых связей между сельским хозяйством, переработкой, транспортом, финансами и торговлей, поскольку разрывы между отдельными звеньями снижают результативность даже при росте производства [7]. В. В. Кирсанов связывает перспективы агропродовольственного комплекса с сочетанием импортозамещения, государственной поддержки, обновления логистики и диверсификации внешнеэкономических партнерств [4]. А. Н. Семин и П. М. Кислицкий дополняют данную позицию требованием согласованного развития федеральных и региональных систем АПК, основанного на стратегическом планировании и институциональной координации [10].

Проведенный анализ показывает, что в литературе подробно раскрыты отдельные аспекты санкционной адаптации, государственной поддержки, расчетов, инновационного суверенитета и устойчивого земледелия. Вместе с тем недостаточно исследована их совместная роль в трансформации агропродовольственных систем России и Европы. Цель статьи состоит в формировании целостного представления о взаимодействии санкционного, платежного и экологического контуров и в определении направлений, позволяющих совместить экономическую устойчивость, технологическое обновление и рациональное природопользование.

Результаты и обсуждения

Трансформация агропромышленного комплекса в настоящем исследовании понимается как изменение устойчивых пропорций между производством, переработкой, финансированием, логистикой и природопользованием. Для ее анализа предлагается трехконтурная модель. Первый контур охватывает санкционную адаптацию и включает замену поставщиков, локализацию критических технологий, изменение географии экспорта и перераспределение инвестиционных ресурсов. Второй контур связан с расчетными механизмами: валютой контракта, доступностью корреспондентской инфраструктуры, страхованием платежного риска, торговым финансированием и цифровым сопровождением сделки. Третий контур объединяет устойчивые сельскохозяйственные практики, обеспечивающие сохранение плодородия, снижение ресурсоемкости, контроль выбросов и адаптацию к климатическим рискам. Результативность преобразований возникает только при согласовании всех трех контуров.

Для российского АПК санкции стали фактором ускоренного пересмотра зависимости от зарубежной техники, семенного материала, ветеринарных препаратов, программного обеспечения и отдельных компонентов пищевого производства. Первоначальная реакция предприятий была преимущественно операционной:

формирование запасов, поиск параллельных каналов поставок, замена логистических посредников и увеличение сроков закупочного планирования. Постепенно акцент сместился к структурным решениям — локализации производства, развитию собственных селекционных программ, созданию сервисных центров и заключению долгосрочных контрактов с поставщиками из новых стран. Однако формальная замена импорта не всегда означает достижение технологического суверенитета. Если отечественное оборудование зависит от иностранных узлов, программных обновлений или лицензионных компонентов, уязвимость лишь переносится на другой уровень цепочки.

Европейская трансформация имеет иную конфигурацию. Для сельскохозяйственных производителей европейских стран существенными вызовами стали удорожание энергии, удобрений, кормовых компонентов и кредитных ресурсов, а также необходимость перестраивать отдельные торговые и логистические связи. Ответом выступило сочетание временной компенсационной поддержки, диверсификации импорта, ускорения энергосбережения и корректировки экологических требований с учетом рисков продовольственной доступности. При этом европейская аграрная модель сохраняет выраженную ориентацию на экологическую обусловленность поддержки: получение части субсидий связывается с соблюдением правил землепользования, защитой почв, сохранением биоразнообразия и сокращением негативного воздействия на окружающую среду. В результате санкционный шок не отменяет экологическую повестку, но усиливает поиск менее затратных способов ее реализации.

Расчетные механизмы становятся связующим звеном между производственной адаптацией и внешней торговлей. Для российских экспортеров наиболее значимы сокращение зависимости от ограниченного круга резервных валют, развитие расчетов в рублях и валютах партнеров, создание устойчивых банковских маршрутов и снижение временного разрыва между отгрузкой и оплатой. Практическая надежность такого механизма определяется не только выбором валюты. Необходимы согласованные процедуры конвертации, доступность кредитования оборотного капитала, страхование коммерческого и странового риска, стандартизированное электронное документирование и понятный порядок разрешения споров. Перспективным направлением является использование многостороннего клиринга, при котором встречные обязательства участников внешней торговли частично погашаются без проведения полного объема трансграничных переводов.

Для европейских компаний расчетная инфраструктура в целом остается более интегрированной, однако санкционный режим увеличивает стоимость комплаенса и требует углубленной проверки контрагентов, происхождения товара, маршрутов поставки и конечных получателей. Это повышает административные издержки даже в разрешенных сегментах торговли. В результате конкурентоспособность определяется способностью не просто провести платеж, а доказать его правомерность и обеспечить прослеживаемость всей сделки. Для обеих сторон цифровизация контрактов, транспортных документов и сертификатов происхождения способна уменьшить задержки, но только при совместимости информационных систем и взаимном признании электронных документов.

Экологическая устойчивость должна рассматриваться не как дополнительная нагрузка, а как способ снижения долгосрочных производственных рисков. Точное земледелие позволяет дифференцировать внесение удобрений и средств защиты растений, уменьшая расходы и нагрузку на почвы. Севооборот, минимальная обработка почвы, покровные культуры и лесозащитные полосы повышают устойчивость земель к эрозии и засухе. Повторное использование органических отходов, производство биогаза и возврат питательных веществ в хозяйственный цикл сокращают зависимость от внешних энергетических и сырьевых ресурсов. Вместе с тем внедрение таких решений требует доступного финансирования, консультационного сопровождения и измеримых критериев результата. Формальное выполнение экологических требований без технологического и экономического обоснования может ухудшить положение малых хозяйств и ускорить концентрацию производства.

Особое значение имеет распределение выгод и затрат трансформации. Крупные агрохолдинги легче привлекают финансирование, создают собственную логистику и внедряют цифровые системы, но их усиление способно сокращать пространство для фермерских хозяйств и локальной переработки. Малые производители обладают гибкостью и лучше связаны с сельскими сообществами, однако сильнее зависят от стоимости кредита, доступа к технике и условий сбыта. Поэтому государственная политика должна поддерживать не отдельный размер предприятия, а конкурентную среду и кооперацию. Совместное использование техники, складов, лабораторий, цифровых платформ и экспортной инфраструктуры позволяет уменьшить издержки без административного укрупнения хозяйств.

Для систематизации различий и общих направлений была сформирована сравнительная матрица. Она отражает не статистическое превосходство одной модели над другой, а институциональную логику принимаемых решений. Сопоставление

проведено по тем элементам, которые непосредственно определяют способность аграрного сектора сохранять производство, проводить внешнеторговые расчеты и внедрять устойчивые технологии. Отдельно выделен потенциал сближения, поскольку даже при политических ограничениях Россия и европейские страны сталкиваются с общими проблемами деградации почв, климатической волатильности, кадрового дефицита и роста капиталоемкости сельского хозяйства. –

Таблица 1

Сравнительная матрица направлений трансформации АПК России и Европы

Направление	Россия	Европа
Реакция на внешние ограничения	Импортзамещение, новые рынки, локализация критических ресурсов	Диверсификация поставок, компенсация издержек, усиление контроля цепочек
Расчетная инфраструктура	Национальные валюты, альтернативные банковские маршруты, клиринг	Сохранение интегрированных платежей при росте комплаенс-нагрузок
Технологическое развитие	Суверенные разработки, локализация техники, селекция и цифровизация	Ресурсосбережение, автоматизация, низкоуглеродные технологии
Государственная поддержка	Льготное финансирование, субсидирование локализации и экспорта	Экологическая обусловленность выплат, страхование и инвестиционные стимулы
Устойчивые практики	Сохранение плодородия, адаптация к засухам, замкнутые циклы ресурсов	Снижение выбросов, биоразнообразие, защита почв и воды
Пространственная структура	Высокая региональная неоднородность и концентрация производства	Различия национальных моделей при общей рамке аграрной политики

Матрица показывает, что различия между российской и европейской траекториями связаны прежде всего с последовательностью приоритетов. В России первоочередной задачей выступает сохранение технологической и платежной доступности, после чего экологические решения включаются в программы модернизации. В Европе экологические критерии уже встроены в систему поддержки, но под влиянием роста издержек они корректируются с учетом производственной реализуемости. Общей проблемой остается риск фрагментарности, когда субсидии, платежные решения, логистика и природоохранные требования разрабатываются разными институтами без единой системы показателей.

Наиболее результативной представляется политика, при которой поддержка предоставляется за достижение одновременно экономического и ресурсного эффекта. Например, модернизация оросительной системы должна оцениваться не только по объему инвестиций, но и по сокращению водопотребления, стабильности урожайности и снижению эксплуатационных затрат. Аналогично развитие расчетов в национальных

валютах следует связывать со скоростью получения экспортной выручки, стоимостью конвертации и доступностью оборотного финансирования. Такой подход переводит аграрную политику от финансирования отдельных мероприятий к управлению устойчивостью всей цепочки создания стоимости. При этом критерии поддержки должны быть прозрачными, проверяемыми и доступными для хозяйств различного масштаба.

Заключение

Дальнейшее развитие агропромышленного комплекса России и европейских стран будет зависеть от способности институтов перейти от реакции на отдельные ограничения к управлению взаимосвязанными рисками. Санкции выявили, что продовольственная безопасность определяется не только наличием производственных мощностей, но и доступом к технологиям, расчетной инфраструктуре, данным, страхованию и компетентным кадрам. Поэтому приоритетом становится формирование архитектуры адаптивного управления, в которой государство задает долгосрочные ориентиры, финансовые организации обеспечивают доступность модернизации, а производители получают возможность выбирать технологически нейтральные способы достижения установленных результатов.

Особую роль приобретает измеримость преобразований. Оценка должна учитывать скорость прохождения платежей, долю локализованных критических компонентов, устойчивость урожайности, состояние почв, энергоемкость переработки и участие малых хозяйств в цепочках сбыта. Совместное использование таких показателей позволит избежать ситуации, когда улучшение одного параметра достигается за счет ухудшения другого. Перспективным направлением исследований является разработка интегральной системы мониторинга, объединяющей экономические, платежные, технологические и экологические индикаторы на уровне предприятия, региона и межгосударственной торговли.

Несмотря на различие политических и институциональных условий, российская и европейская модели могут развиваться в направлении более рационального использования ресурсов, цифровой прослеживаемости и поддержки сельских территорий. Конкурентоспособность будущего будет формироваться не максимальной автономией, а способностью сохранять критические компетенции, диверсифицировать связи и быстро перестраивать хозяйственные процессы при изменении внешней среды.

Библиографический список

1. Борзунов, И. В. Экономика агропромышленного комплекса России в условиях санкций / И. В. Борзунов, В. В. Калицкая, О. А. Рыкалина // Агропродовольственная экономика. – 2025. – № 2. – С. 61-69. – EDN LHLKDW.
2. Дудина, О. И. Влияние расчетов в рублях в агропромышленном комплексе на экономику страны / О. И. Дудина, Д. Х. Бухарова, Ш. А. Мусакаев, Д. С. Аджаматова // Фундаментальные исследования. – 2024. – № 1. – С. 14-19. – DOI 10.17513/fr.43550. – EDN JFHJNM.
3. Каравдин, А. А. Структурные изменения в агропродовольственном комплексе России: влияние концентрации на развитие сельской местности / А. А. Каравдин // Экономика, труд, управление в сельском хозяйстве. – 2024. – № 8(114). – С. 183-192. – DOI 10.33938/248-183. – EDN MSJUVA.
4. Кирсанов, В. В. Агропродовольственный комплекс России в условиях санкций: тенденции и перспективы / В. В. Кирсанов // Региональные агросистемы: экономика и социология. – 2023. – № 2. – С. 13-20. – EDN AUTOIQ.
5. Копасов, А. А. Механизмы реализации аграрной политики в зарубежных странах / А. А. Копасов // Экономика, труд, управление в сельском хозяйстве. – 2023. – № 9(103). – С. 16-28. – DOI 10.33938/239-16. – EDN VZXPCF.
6. Никколов, К. С. Влияние внешнеэкономических санкций на развитие агропромышленного комплекса российских регионов / К. С. Никколов // Журнал монетарной экономики и менеджмента. – 2024. – № 4. – С. 124-132. – DOI 10.26118/2782-4586.2024.48.88.017. – EDN OEOSMI.
7. Остапенко, Т. В. Тенденции и перспективы развития межотраслевых связей в АПК в условиях санкций / Т. В. Остапенко // Экономические науки. – 2024. – № 238. – С. 159-165. – DOI 10.14451/1.238.159. – EDN AFOUUQ.
8. Петриков, А. В. Стратегические направления совершенствования аграрной политики России в условиях санкционного давления / А. В. Петриков // Научные труды Вольного экономического общества России. – 2022. – Т. 235, № 3. – С. 122-133. – DOI 10.38197/2072-2060-2022-235-3-122-133. – EDN EATOKW.
9. Сайфетдинов, А. Р. Потенциал суверенного инновационного развития российского сельского хозяйства / А. Р. Сайфетдинов // АПК: экономика, управление. – 2025. – № 4. – С. 49-61. – DOI 10.33305/254-49. – EDN LWDIPI.
10. Семин, А. Н. Аспекты совершенствования функционирования АПК России и его региональных систем / А. Н. Семин, П. М. Кислицкий // Вестник Национального Института Бизнеса. – 2025. – № 3(59). – С. 153-159. – EDN VRRERH.

11. Скворцов, Е. А. К проблеме устойчивого развития сельского хозяйства в условиях внешнеэкономических ограничений / Е. А. Скворцов, А. С. Митрофанова // Теория и практика мировой науки. – 2024. – № 10. – С. 2-5. – EDN DQSYBA.
12. Фальченко, О. Д. Эволюция страновых моделей сельского хозяйства и оценка их применимости для России / О. Д. Фальченко // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2025. – № 8(107). – С. 422-426. – DOI 10.24412/2500-1000-2025-8-422-426. – EDN ZVORXM.
13. Хайруллина, О. И. Актуальные направления государственной поддержки сельского хозяйства: межстрановой анализ / О. И. Хайруллина // Креативная экономика. – 2025. – Т. 19, № 3. – С. 643-662. – DOI 10.18334/ce.19.3.122688. – EDN EJXUJW.
14. Шамрай, И. Н. Современные проблемы и тренды развития сельского хозяйства в Российской Федерации / И. Н. Шамрай, Р. М. Шахнович, Т. М. Рябухина // Вестник Торайгыров университета. Экономическая серия. – 2022. – № 4. – С. 106-116. – DOI 10.48081/VRAZ4170. – EDN MHQDCV.

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА И ПЕРЕРАБОТКИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ

УДК 664.08

Бурак Л.Ч., Саманкова Н.В., Егорова З.Е. Диоксид серы в пищевых продуктах: механизмы консервации, оценка безопасности и нормативное регулирование

Sulfur dioxide in food products: mechanisms of preservation, safety assessment and regulatory framework

Бурак Леонид Чеславович

Директор Общества с ограниченной ответственностью "БЕЛПРОСАКВА" город Минск,

Саманкова Наталья Викторовна

Доцент кафедры товароведения и экспертизы товаров Белорусского государственного экономического университета город Минск,

Егорова Зинаида Евгеньевна

Доцент факультета технологии органических веществ Белорусского государственного технологического университета город Минск

Burak Leonid Cheslavovich

Director of BELROSAKVA Limited Liability Company, Minsk,

Samankova Nataliya Viktorovna

Associate Professor of the Department of Commodity Science and Product Expertise, Belarusian State University of Economics, Minsk,

Egorova Zinaida Evgenievna

Associate Professor of the Faculty of Organic Substances Technology, Belarusian State Technological University, Minsk

Аннотация. Введение. Диоксид серы (SO_2) остаётся востребованным консервантом благодаря многофункциональным свойствам: сохранение аромата, антимикробное, антипотемняющее и антиоксидантное действие. Однако его применение требует строгого баланса между технологической эффективностью и безопасностью остаточных веществ, что обусловлено зависимостью форм SO_2 от pH, температуры, активности воды и состава пищевой матрицы.

Цель исследования. Обобщить современные данные о физико-химических свойствах SO_2 , механизмах его консервирующего действия, формах применения в пищевых системах, а также систематизировать сведения о токсикокинетике, биологических эффектах и нормативных подходах к регулированию остаточных уровней в продуктах питания.

Материалы и методы. Материалом для исследования послужили научные публикации, индексируемые в базах данных Scopus, Web of Science, PubMed, а также официальные документы международных и национальных регулирующих органов (ФАО/ВОЗ, EFSA, FDA, Европейский союз, ЕАЭС, Китай) за период 2010–2026 гг. Поиск проводился по ключевым словам: «диоксид серы», «сульфиты», «механизм консервации», «безопасность пищевых продуктов», «токсичность», «нормативное регулирование», «остаточные уровни». В обзор включены оригинальные исследования, мета-анализы и систематические обзоры, выполненные на английском и русском языках.

Результаты и их обсуждение. В статье рассмотрены физико-химические свойства SO_2 , включая его растворимость, летучесть и зависимость форм (SO_2 , HSO_3^- , SO_3^{2-} , $\text{S}_2\text{O}_5^{2-}$) от pH и температуры. Описаны четыре ключевых механизма консервирующего действия: (1) сохранение аромата за счёт защиты летучих соединений и регуляции метаболических путей; (2) антибактериальный и противогрибковый эффект, реализуемый через окислительный стресс, повреждение клеточных мембран и нарушение метаболизма микроорганизмов; (3) ингибирование ферментативного (полифенолоксидаза) и неферментативного (реакция Майяра) потемнения; (4) антиоксидантная активность, связанная с удалением активных форм кислорода и активацией эндогенных защитных систем. Проанализированы основные формы применения SO_2 : прямая фумигация, системы медленного высвобождения (прокладки, таблетки на основе метабисульфита натрия) и использование сульфитных солей в водных растворах. Показано, что эффективность и безопасность зависят от условий хранения, особенно в холодовой цепи, где колебания температуры и влажности могут вызывать неравномерное высвобождение и локальное накопление SO_2 . Представлены данные об эндогенном метаболизме SO_2 в организме человека: при физиологических концентрациях он выполняет роль газотрансммиттера, регулируя сосудистый тонус, однако избыточное экзогенное поступление (особенно у лиц со сниженной активностью сульфитооксидазы или с гиперчувствительностью) вызывает окислительный стресс, повреждение ДНК, аллергические реакции и обострение астмы. Систематизированы современные нормативные требования: допустимая суточная норма потребления 0–0,7 мг/кг массы тела, максимальные остаточные уровни для разных продуктов (от 10 до 350 мг/кг), обязательная маркировка при содержании SO_2 выше 10 мг/кг. Отмечена вариабельность пределов в разных странах, а также кумулятивное воздействие из нескольких источников.

Выводы. SO_2 остаётся незаменимым консервантом, однако его применение требует дифференцированного подхода с учётом типа продукта, условий хранения и чувствительности потребителей. Приоритетными направлениями дальнейших исследований являются: (1) разработка альтернативных консервирующих стратегий (глутатион, эфирные масла, нетермические технологии) для снижения зависимости от SO_2 ; (2) создание систем контролируемого высвобождения, адаптированных к условиям холодовой цепи, с использованием сенсорной обратной связи; (3) углублённое изучение механизмов непереносимости сульфитов у различных групп населения; (4) гармонизация нормативов на международном уровне с учётом кумулятивного воздействия из разных пищевых категорий.

Ключевые слова: диоксид серы, сульфиты, консервация пищевых продуктов, антимикробная активность, антиоксидант, подавление потемнения, токсичность, нормативно-правовая база, максимально допустимые остаточные количества, безопасность пищевых продуктов.

Abstract. Introduction. Sulfur dioxide (SO_2) remains a widely used preservative in the food industry due to its multifunctional properties: aroma preservation, antimicrobial, anti-browning and antioxidant effects. However, its application requires a strict balance between technological efficiency and residue safety, which is determined by the dependence of SO_2 forms on pH, temperature, water activity and food matrix composition.

Objective of the study. To summarize current data on the physicochemical properties of SO_2 , its preservation mechanisms, application forms in food systems, as well as to systematize information on toxicokinetics, biological effects and regulatory approaches to controlling residue levels in food products.

Materials and methods. The material for the study was scientific publications indexed in Scopus, Web of Science, PubMed databases, as well as official documents of international and national regulatory bodies (FAO/WHO, EFSA, FDA, European Union, China) for the period 2010–2026. The search was carried out using the keywords: "sulfur dioxide", "sulfites", "preservation mechanism", "food safety", "toxicity", "regulatory framework", "residual levels". The review includes original studies, meta-analyses and systematic reviews in English and Russian.

Results and discussion. The article examines the physicochemical properties of SO_2 , including its solubility, volatility and the dependence of its forms (SO_2 , HSO_3^- , SO_3^{2-} , $\text{S}_2\text{O}_5^{2-}$) on pH and temperature. Four key preservation mechanisms are described: (1) aroma preservation through protection of volatile compounds and regulation of metabolic pathways; (2) antimicrobial and antifungal effects realized through oxidative stress, cell membrane damage and disruption of microbial metabolism; (3) inhibition of enzymatic (polyphenoloxidase) and non-enzymatic (Maillard reaction) browning; (4) antioxidant activity associated with scavenging reactive oxygen species and activation of endogenous defense systems. The main application forms of SO_2 are analyzed: direct fumigation, slow-release systems (pads, tablets based on sodium metabisulfite) and the use of sulfite salts in aqueous solutions. It is shown that effectiveness and safety depend on storage conditions, especially in the cold chain, where temperature and humidity fluctuations can cause uneven release and local

accumulation of SO₂. Data on endogenous SO₂ metabolism in the human body are presented: at physiological concentrations it acts as a gasotransmitter regulating vascular tone, but excessive exogenous intake (especially in individuals with reduced sulfite oxidase activity or with hypersensitivity) causes oxidative stress, DNA damage, allergic reactions and asthma exacerbation. Modern regulatory requirements are systematized: acceptable daily intake of 0–0.7 mg/kg body weight, maximum residue levels for different products (from 10 to 350 mg/kg), mandatory labeling when SO₂ content exceeds 10 mg/kg. Variability of limits in different countries, as well as cumulative exposure from multiple sources, are noted.

Conclusions. *SO₂ remains an indispensable preservative, but its application requires a differentiated approach taking into account product type, storage conditions and consumer sensitivity. Priority areas for further research are: (1) development of alternative preservation strategies (glutathione, essential oils, non-thermal technologies) to reduce dependence on SO₂; (2) creation of controlled release systems adapted to cold chain conditions using sensor feedback; (3) in-depth study of sulfite intolerance mechanisms in different population groups; (4) harmonization of regulations at the international level taking into account cumulative exposure from different food categories.*

Keywords: *sulfur dioxide, sulfites, food preservation, antimicrobial activity, antioxidant, browning inhibition, toxicity, regulatory framework, maximum residue limits, food safety*

Рецензент: Бюллер Елена Александровна – кандидат экономических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «Адыгеский государственный университет»

Введение

В процессе обработки и хранения пищевые продукты постоянно подвергаются воздействию изменений температуры, влажности, кислорода и микробных факторов. Эти факторы ускоряют окисление, ферментативное или неферментативное потемнение и микробную порчу, что снижает органолептические качества, сокращает срок годности и ухудшает пищевую ценность [1]. Поэтому замедление этого процесса ухудшения при сохранении безопасности на всех этапах обработки и хранения стало неотложной задачей для исследований в области консервации пищевых продуктов. Среди них диоксид серы (SO₂) широко используется в качестве консерванта благодаря своим многофункциональным свойствам, включая сохранение аромата, антимикробное, антипотемняющее и антиоксидантное действие [2]. В пищевых системах термин «диоксид серы» обычно используется как собирательный термин, охватывающий газообразный SO₂, а также ионы сульфита, бисульфита и метабисульфита (S₂O₅²⁻) [3]. В международной системе нумерации пищевых добавок SO₂ и различным сульфитам присваиваются соответствующие номера INS, которые соответствуют Е-кодам, используемым в европейской системе классификации пищевых добавок. К ним относятся диоксид серы (Е 220), сульфит натрия (Е 221), гидросульфит натрия (Е 222), метабисульфит натрия (Е 223), метабисульфит калия (Е 224), сульфит кальция (Е 226), гидросульфит кальция (Е 227) и гидросульфит калия (Е 228) [4, 5].

Несмотря на эти важные преимущества, применение SO₂ по-прежнему ограничено необходимостью баланса между технологической эффективностью и безопасностью

остаточных веществ. Эта проблема возникает потому, что SO_2 не ведет себя как единая, статичная добавка в пищевых продуктах; скорее, его высвобождение, трансформация и стойкость сильно зависят от pH, активности воды, температуры, состава пищевых продуктов и условий хранения. В результате SO_2 может демонстрировать колеблющиеся скорости высвобождения, неравномерное распределение и локальное накопление в реальных условиях производства и хранения, что усложняет как контроль эффективности, так и оценку воздействия [6]. В то же время это также создает риски в практическом применении, прежде всего потому, что существует четкая зависимость между уровнем высвобождения SO_2 и сохранением качества пищевых продуктов от дозы. Когда высвобождение SO_2 недостаточно или замедлено, его антимикробные и антиоксидантные эффекты не могут быть проявлены в полной мере. В результате быстрое размножение патогенов и усиление ферментативного потемнения часто трудно обратить вспять, что приводит к потемнению цвета, ухудшению органолептических свойств и сокращению срока годности [7]. И наоборот, чрезмерное или пространственно неравномерное выделение SO_2 может создавать локально высокие концентрации и напрямую повреждать растительные ткани. Например, при консервировании столового винограда высокие концентрации SO_2 могут вызывать осыпание ягод, растрескивание, повреждение кожицы, обесцвечивание кожуры и появление заметного сернистого запаха [8]. В светлых фруктах, овощах и сухофруктах высокие концентрации SO_2 могут вызывать деградацию пигментов и чрезмерное их накопление [9]. В вине избыток SO_2 может нарушить баланс аромата, замаскировать сортовые вкусовые характеристики и усилить опасения потребителей по поводу воздействия сульфитов и реакций гиперчувствительности. Поэтому ключ к практическому применению SO_2 заключается в тщательном балансе между эффективным консервированием и риском чрезмерного повреждения. Поддержание этого баланса особенно затруднительно при транспортировке на большие расстояния и хранении в условиях холодной цепи, поскольку колебания влажности и температуры могут изменять условия срабатывания и кинетику высвобождения веществ, выделяющих SO_2 , что увеличивает неопределенность в оценке кумулятивного воздействия.

Что еще более важно, неопределенность в отношении высвобождения и остатков SO_2 влияет не только на эффективность консервантов, но и напрямую на безопасность пищевых продуктов. Биологические эффекты SO_2 зависят от дозы. При физиологических концентрациях эндогенный SO_2 функционирует как газообразная сигнальная молекула, участвующая в таких процессах, как вазодилатация [10]. Однако,

когда экзогенный SO_2 или сульфиты, поступающие с пищей, превышают метаболическую способность сульфитоксидазы (SO), они могут вызывать окислительный стресс, повреждение клеток и потенциальный канцерогенный риск [11]. Для уязвимых групп населения риски еще более выражены. У больных астмой и лиц с непереносимостью сульфитов могут возникать побочные реакции даже при уровнях воздействия, переносимых населением в целом, начиная от дерматита и крапивницы и заканчивая приступами астмы и даже анафилактическими реакциями [12]. Поэтому использование SO_2 в пищевых продуктах должно отдавать приоритет не только эффективности консервантов, но и строгому контролю как уровней выбросов, так и конечных остатков. Исходя из соображений риска для здоровья, многие страны установили максимально допустимые уровни остатков (MRL) и требования к маркировке SO_2 в пищевых продуктах. Например, Управление по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и медикаментов США (FDA) прямо требует, чтобы любой пищевой продукт, содержащий более 10 мг/кг SO_2 , имел предупреждающую этикетку [13]. В Европейском союзе (EC) использование SO_2 и сульфитов в качестве пищевых добавок регулируется Регламентом (EC) № 1333/2008 и его поправками [4], в то время как их безопасность и воздействие на организм человека продолжают переоцениваться EFSA. Совсем недавно EFSA обновило оценку воздействия на организм человека SO_2 и сульфитов в качестве пищевых добавок в рамках альтернативных сценариев максимальных уровней [14]. Эти изменения в законодательстве отражают растущее понимание того, что управление SO_2 должно выходить за рамки соблюдения требований к остаточным концентрациям и охватывать поведение при высвобождении, динамику воздействия и предупреждение о риске в режиме реального времени. Появление активной упаковки открыло новые подходы к безопасному применению SO_2 . Активная упаковка использует реактивные вещества внутри упаковки, что позволяет контролировать высвобождение SO_2 и динамически регулировать условия хранения пищевых продуктов [15]. В широко используемой активной упаковке в основном применяется метабисульфит натрия ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) в форме таблеток или порошка для подавления роста патогенов в пищевых продуктах [7]. Однако активные упаковочные системы основаны на механизмах, запускаемых окружающей средой, и их поведение при высвобождении тесно связано с физико-химическими условиями пищевой системы. Поэтому достижение стабильного и предсказуемого контроля высвобождения при сохранении эффективности консерванта остается ключевым направлением современных исследований.

Цель данного обзора – на системном уровне обобщить знания о физико-химических свойствах SO_2 , механизмах его консервирующего действия, формах применения в различных пищевых системах, а также о современном состоянии безопасности и нормативного регулирования. В работе поставлены следующие исследовательские вопросы: (1) каковы основные физико-химические факторы, определяющие распределение форм SO_2 в пищевых матрицах; (2) каковы молекулярные механизмы сохранения аромата, антимикробного, антипотемняющего и антиоксидантного действия SO_2 ; (3) как условия обработки и хранения (температура, влажность, pH) влияют на кинетику высвобождения SO_2 из различных форм применения; (4) каковы риски для здоровья и нормативные ограничения, регулирующие использование SO_2 в пищевых продуктах. Обзор призван создать основу для разработки научных стандартов применения SO_2 и снижения рисков, связанных с его остаточным содержанием.

Материалы и методы

Материалом для данного исследования послужили научные публикации, индексируемые в базах данных Scopus, Web of Science, PubMed, а также официальные документы международных и национальных регулирующих органов (ФАО/ВОЗ, EFSA, FDA, Европейский союз, ЕАЭС, Китай) за период 2010–2026 гг. Поиск осуществлялся по ключевым словам: «диоксид серы», «сульфиты», «механизм консервации», «безопасность пищевых продуктов», «токсичность», «нормативное регулирование», «остаточные уровни» (на русском и английском языках). В обзор включены оригинальные исследования, мета-анализы, систематические обзоры и нормативные акты, соответствующие теме. Анализ проводился методом сравнительного обобщения с выделением ключевых физико-химических, биологических и регуляторных закономерностей.

Результаты и их обсуждение

1. Свойства SO_2

Диоксид серы, химическая формула SO_2 , является простейшим и наиболее распространенным оксидом серы. При стандартной температуре и давлении это бесцветный и прозрачный газ с раздражающим запахом; температура плавления составляет $-75,5^\circ\text{C}$, температура кипения — -10°C , а его плотность в газообразном состоянии составляет приблизительно $2,93 \text{ кг/м}^3$ при стандартных условиях [16]. Согласно данным Агентства США по токсичным веществам и регистрации заболеваний

[17], кратковременное воздействие SO_2 в концентрациях выше 5 ppm может увеличить сопротивление дыхательных путей. Воздействие в концентрациях около 10 ppm может вызвать чихание и кашель, а раздражение слизистых оболочек становится более выраженным в диапазоне 10–20 ppm. После приема внутрь большая часть SO_2 и сульфитов из обработанных продуктов всасывается через желудочно-кишечный тракт, окисляется до сульфата под действием SO_2 и выводится с мочой. Однако у людей со сниженной активностью SO_2 или чувствительностью к сульфитам сульфиты могут накапливаться и вызывать неблагоприятные реакции, такие как бронхоконстрикция [18]. Помимо этих газообразных характеристик, SO_2 легко растворяется в воде, этаноле, эфире и других растворителях. Его растворимость в воде сильно зависит от температуры, достигая 0,215 моль/кг при 24,6 °C и уменьшаясь с повышением температуры [19]. Типичные условия обработки сушеных продуктов включают фумигацию сульфитами или погружение в растворы сульфитов. Поскольку сушка обычно включает нагрев воздуха и снижение влажности, температура обработки может изменять летучесть, удержание и остаточное поведение SO_2 , влияя на его распределение между газом и водой [20]. Во время хранения и транспортировки в условиях холодной цепи свежие фрукты и овощи обычно хранятся или транспортируются при температурах от 0 °C до 4 °C, как правило, в сочетании с высокой относительной влажностью. Zutahy и др. [7] сообщили, что во время коммерческого хранения винограда температура колебалась от 0,32 до –1,68 °C, а относительная влажность — от 90,8% до 97,0%. Температура, относительная влажность и содержание водяного пара влияли на скорость выделения SO_2 из SO_2 -генерирующих подушечек. При растворении в водных системах SO_2 реагирует с водой, образуя сернистую кислоту (H_2SO_3), умеренно сильную дипротонную кислоту, обладающую отбеливающими свойствами. Затем H_2SO_3 диссоциирует в воде, образуя бисульфитный (гидросульфитный) ион (HSO_3^-) и сульфитный ион (SO_3^{2-}), как показано в формуле (1) [21]. pH пищевых продуктов напрямую определяет распределение химических форм SO_2 . В сильноокислых условиях преобладает молекулярный SO_2 , склонный к испарению в зависимости от упаковки, температуры и времени хранения. По мере повышения pH HSO_3^- становится наиболее стабильным и распространенным видом в слабоокислых матрицах, таких как мясные продукты (pH 4,5–6,8) [18]. При pH выше примерно 6,5 преобладает SO_3^{2-} [22]. При высокой концентрации и низкой активности воды HSO_3^- также может достигать равновесия с $\text{S}_2\text{O}_5^{2-}$, что особенно важно для обезвоженных продуктов [23]. В качестве примера рассмотрим винные системы. В условиях низкого

pH свободный SO_2 включает три формы, а именно молекулярный SO_2 , HSO_3^- и SO_3^{2-} , помимо связанных форм, и эти свободные формы тесно связаны с бактериостатическими и антиоксидантными функциями SO_2 [24].

2. SO_2 функция и механизм действия

2.1 Поддержание аромата

Как распространенная добавка в пищевой промышленности и производстве напитков, SO_2 играет жизненно важную роль в формировании вкуса. Характерные ароматы фруктов и овощей в основном состоят из летучих соединений, включая терпены, спирты, альдегиды и эфиры. На примере винограда сорта Мускат Гамбург исследования показали, что SO_2 эффективно регулирует уровни гексаналя и (E)-2-гексеналя, тем самым сохраняя эти летучие соединения со свежим, зеленым ароматом и поддерживая характерный ароматический профиль винограда [25]. Этот эффект в основном объясняется регулирующей ролью SO_2 в метаболических путях, связанных с ароматом, поскольку он повышает экспрессию ключевых генов, участвующих в метаболическом пути α -линоленовой кислоты, а также во многих антиоксидантных путях, тем самым обеспечивая стабильность ароматических соединений. Помимо своей роли в сохранении фруктов и овощей, SO_2 также оказывает выраженное влияние на регуляцию аромата при производстве фруктового вина [26]. В процессе ферментации вин из клубники и черники развитие аромата в значительной степени зависит от условий ферментации, при этом SO_2 выступает в качестве ключевого регулирующего фактора, в первую очередь, избирательно модулируя микробное сообщество во время ферментации и хранения. С одной стороны, он подавляет рост невиногенных дрожжей, тем самым снижая чрезмерное потребление субстрата и образование нежелательных побочных продуктов, таких как летучие кислоты и спирты с посторонним привкусом; с другой стороны, он способствует метаболической активности винодельческих дрожжей, тем самым оптимизируя соотношение производства спирта и альдегида, что в конечном итоге улучшает ароматический баланс и чистоту вина [26]. Однако после образования ароматических молекул они подвергаются окислительному воздействию кислорода, ионов металлов и свободных радикалов. Сильные восстановительные свойства SO_2 позволяют напрямую удалять активные формы кислорода (АФК), блокировать цепную реакцию свободнорадикального окисления и снижать окислительные потери ароматических веществ; В то же время, SO_2 и ацетальдегид, образуя стабильный аддукт, также могут уменьшить раздражающий запах ацетальдегида, а также могут окислять фенольный хинон обратно до фенола или с

образованием стабильных производных сульфоновой кислоты, тем самым избегая гидролиза сложных эфиров или хиноновых аддуктов [27]. Помимо защиты уже сформировавшихся ароматов, SO_2 может продлевать сохранение аромата в определенных системах за счет обратимых реакций присоединения [28]. Например, в контексте вина HSO_3^- , образующийся при диссоциации SO_2 , реагирует с 3-S-глутатионгексаналем (Glut-3MHaI), предшественником 3-меркапто-1-гексанола (3MH). В результате этой реакции образуется стабильный аддукт, тем самым ингибирующий окислительную деградацию предшественника. Во время ферментации ацетальдегид конкурирует с HSO_3^- за реакцию, вызывая диссоциацию этого аддукта и высвобождение Glut-3MHaI. Затем этот предшественник повторно используется в метаболизме для образования 3MH, тем самым повышая конечную концентрацию фруктовых ароматов [28]. Таким образом, SO_2 не только защищает сформировавшиеся ароматы, но и продлевает высвобождение фруктового аромата, регулируя диссоциацию и рециркуляцию предшественников. Однако его роль в поддержании аромата на молекулярном уровне все еще требует дальнейшего исследования. Эти результаты показывают, что SO_2 способствует сохранению аромата не только за счет предотвращения его порчи, но и за счет модуляции метаболических путей, связанных с ароматом, и поддержания стабильности ключевых летучих соединений во время хранения.

2.2 Антибактериальный эффект

Антибактериальный и противогрибковый эффект диоксида серы (SO_2) в фруктах и овощах остается значительным. Он проявляет бактерицидное действие широкого спектра действия против патогенов, передающихся с пищей, таких как бактерии и грибы на поверхности продуктов, а также патогенов, сохраняющихся после сбора урожая [29]. Вследствие этого многочисленные исследования использовали SO_2 для уничтожения микроорганизмов во время хранения фруктов и овощей, таких как имбирь [30], сушеные абрикосы [31] и черника [32]. Исследования показали, что использование коммерческой упаковки для винограда в условиях охлаждения в сочетании с прокладками с медленным высвобождением SO_2 значительно снижает выживаемость *Listeria* и *Salmonella enterica*, а также оказывает определенное ингибирующее действие на *Escherichia coli* O157:H7 [33]. Аналогичным образом, обработка сушеных абрикосов диоксидом серы (SO_2) также эффективно подавляла выживание этих трех категорий патогенов [31]. В борьбе с грибковыми заболеваниями виноград часто подвержен заражению серой гнилью. Фумигация 200 или 500 мкл/л SO_2 в течение 2 часов повышает

устойчивость плодов к серой гнили [34, 35]. Что касается механизма действия, SO_2 сначала реагирует с водой, образуя SO_3^{2-} или HSO_3^- . Используя мощную восстановительную способность сульфитов, он потребляет кислород во время окисления микробных клеток, тем самым оказывая бактерицидное действие [29]. Более того, сульфиты могут вызывать повреждение клеток посредством реакций электрофильного замещения и препятствовать метаболической активности бактерий, такой как репликация ДНК и производство энергии [36]. Следует отметить, что антибактериальный эффект сульфитов выходит за рамки реакций их химического восстановления. В более фундаментальном смысле, они воздействуют на систему глутатиона (GSH), способствуя окислению восстановленного GSH до окисленного глутатиона (GSSG). Это приводит к повышению внутриклеточного окислительного стресса и нарушению клеточной восстановительной среды, тем самым подавляя рост и метаболизм бактерий [37]. Таким образом, антимикробное преимущество SO_2 заключается в способности подавлять патогенные микроорганизмы, поражающие продукты после сбора урожая, и микроорганизмы, вызывающие пищевые отравления, тем самым снижая риск порчи и продлевая срок годности продукта.

2.3 Защита от потемнения

Свежие фрукты и овощи содержат биоактивные природные соединения, такие как полифенолы и флавоноиды, которые помогают предотвратить потемнение, нейтрализуя активные формы кислорода и замедляя ферментативные реакции, тем самым сохраняя цвет и качество продукции [38]. Однако длительное хранение, механические повреждения, обезвоживание или другие неправильные действия после сбора урожая могут нарушить целостность клеток фруктов и овощей, ускоряя истощение эндогенных соединений, препятствующих потемнению, и способствуя быстрому ферментативному потемнению. Этот процесс значительно ухудшает внешний вид и снижает коммерческую ценность [39]. Многочисленные исследования показали, что SO_2 обладает превосходной эффективностью в подавлении потемнения фруктов и овощей, например, эффективно предотвращает потемнение стеблей и гроздей винограда [40], ограничивает окислительное потемнение молодого имбиря [30] и уменьшает потемнение хранящихся груш сорта Дангшань [41]. Потемнение можно разделить на ферментативный и неферментативный типы. Ферментативное потемнение, наиболее распространенная форма, обычно катализируется полифенолоксидазой (PPO). PPO сначала окисляет полифенолы до бесцветных ортохинонов, которые затем полимеризуются, образуя коричневые пигменты [42]. Восстанавливающие агенты, такие

как SO_2 , могут ингибировать этот процесс [43]. Этот эффект в основном обусловлен ингибированием активности PPO под действием SO_2 , восстановлением о-хинона и образованием бесцветных аддуктов, блокирующих образование пигментов [44]. Неферментативное потемнение в основном связано с реакцией Майяра (PM) и часто встречается в сушеных продуктах, таких как абрикосы [9]. SO_2 обратимо реагирует с карбонильными группами восстанавливающих сахаров (например, глюкозы и фруктозы) и с промежуточными продуктами альдольной конденсации через свою форму HSO_3^- , тем самым блокируя образование оснований Шиффа с аминокислотами и эффективно замедляя протекание PM [2]. В совокупности, SO_2 действует как эффективный антипотемняющий агент, вмешиваясь в пути ферментативного окисления и стабилизируя цветовые характеристики фруктов и овощей.

2.4 Антиоксидантное действие

SO_2 играет решающую роль в поддержании стабильности качества вина и замедлении окислительного разложения фруктов и овощей [45]. Цвет и антиоксидантная активность вина в значительной степени зависят от экстракции фенольных соединений. Обработка SO_2 значительно снижает потери общего количества фенолов и эффективно ингибирует деградацию антоцианов, которые являются ключевыми антиоксидантными компонентами вина. Наблюдается зависимый от концентрации защитный эффект по мере увеличения дозы SO_2 [45]. Окислительное повреждение является существенным фактором, способствующим старению и ухудшению качества фруктов и овощей. Для управления процессами окисления после сбора урожая SO_2 широко используется. Например, обработка SO_2 помогает предотвратить накопление перекиси водорода (H_2O_2) в винограде после сбора урожая [46]. H_2O_2 признана важной сигнальной молекулой, регулирующей антиоксидантные реакции, играя решающую роль в их регуляции [47]. Исследования показывают, что SO_2 может активировать никотинамидадениндинуклеотидфосфат-оксидазу (NOX), побуждая ее переносить электроны от никотинамидадениндинуклеотидфосфата (NADPH) к молекулярному кислороду, тем самым генерируя супероксидный анион (O_2^-). Этот супероксид впоследствии превращается в H_2O_2 с помощью супероксиддисмутазы (SOD). Образующийся H_2O_2 действует как вышестоящая сигнальная молекула, иницируя и усиливая общую антиоксидантную защитную систему растения. SO_2 дополнительно усиливает экспрессию генов и ферментативную активность NOX/SOD, тем самым поддерживая динамическое равновесие АФК внутри клеток [48]. Кроме того, синергетическое действие пероксидазы (POD) и каталазы (CAT) разлагает избыток H_2O_2

на воду и кислород, предотвращая его чрезмерное накопление внутри клеток и тем самым снижая окислительный стресс [49]. Цикл аскорбиновой кислоты-глутатиона (ASA-GSH) дополнительно усиливает антиоксидантную способность и защищает от связанных с ним метаболических процессов, синергически взаимодействуя с POD [49]. Таким образом, антиоксидантная функция SO_2 играет ключевую роль в замедлении окислительной деградации, сохранении стабильности фенольных соединений и пигментов, а также поддержании общего качества пищевых продуктов в процессе обработки и хранения.

3. Формы применения SO_2 в пищевых системах: газообразная и сульфитная формы

3.1 Газообразная форма SO_2

Функции диоксида серы (SO_2) в пищевой промышленности в основном основаны на его многоуровневом механизме действия, включая антипотемнение, антимикробные, антиоксидантные свойства и сохранение аромата. Однако на практике SO_2 не существует в одной форме. Обычно его вводят путем фумигации или добавления сульфитов (растворы которых выделяют газообразный SO_2) для достижения отбеливания, стерилизации, консервации, улучшения цвета и продления срока хранения.

3.1.1 Прямая фумигация

Использование газообразного SO_2 в консервации продуктов питания и напитков имеет долгую историю. Ранние применения SO_2 можно проследить до римского виноделия, где сера сжигалась внутри винных сосудов, таких как амфоры, для получения сернистых паров, используемых для дезинфекции емкостей для хранения, подавления микроорганизмов, вызывающих порчу, и снижения ацетификации, тем самым предотвращая появление в вине дефектов, подобных уксусу [50]. На ранних этапах развития современных исследований в области послеуборочной консервации Винклер и Якоб [51] впервые предложили использовать фумигацию SO_2 для винограда. С тех пор эта техника получила широкое распространение и дальнейшее развитие для послеуборочной обработки различных фруктов и овощей [15]. Например, обработка винограда сорта «Мунаг» в течение 2 часов в среде, содержащей 200 мкл/л SO_2 , эффективно подавляет гниение и снижает степень окислительного повреждения. Этот механизм тесно связан с SO_2 , который усиливает цикл ASA-GSH внутри плода и повышает его антиоксидантную способность [46]. Обработка SO_2 помогает сохранить содержание сахара и вкус клубники, способствуя синтезу GSH и повышая устойчивость

к серой гнили [34]. При производстве алкогольных напитков SO_2 в основном добавляется в виде $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$. При растворении в воде это соединение выделяет газообразный SO_2 , который эффективно подавляет рост нежелательных микроорганизмов, предотвращает появление посторонних привкусов и защищает напиток от окисления. Этот процесс поддерживает стабильность цвета и вкуса конечного продукта [26]. Для сушеных продуктов, таких как абрикосы, обработка жидким SO_2 подавляет ферментативное потемнение, усиливает антиоксидантную активность и продлевает срок хранения [52].

3.1.2 Медленное высвобождение

Кроме того, $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ может быть использован в виде таблеток или порошков и включен в упаковку для создания активной упаковки. Было показано, что активное высвобождение газа SO_2 подавляет рост грибов и регулирует атмосферу в упаковке, тем самым продлевая срок хранения продукта. Типичным примером является работа Zutahy и др. [7], которые объединили полиэтиленовый материал с прокладкой с медленным высвобождением SO_2 , увеличив период высвобождения SO_2 в три раза и обеспечив до четырех месяцев хранения свежести винограда сорта Red Globe. Полиэтиленовая прокладка для коробок с активным высвобождением SO_2 , содержащая бисульфит натрия, непрерывно высвобождает низкие концентрации SO_2 (5–8 ppm) без внешних триггеров, эффективно подавляя рост серой гнили в винограде и чернике [32, 53]. Для достижения более длительного и контролируемого высвобождения система доставки может быть интегрирована с многослойными пленочными структурами. В последнее время исследования сосредоточены на биоразлагаемой и экологически чистой активной упаковке. Например, биоразлагаемая пенопластовая упаковка на основе крахмала использует влагопоглощающие свойства крахмала для стимулирования выделения SO_2 , одновременно обеспечивая амортизирующую защиту, тем самым сочетая контролируемое высвобождение, механическую защиту и экологическую устойчивость [54].

Однако, несмотря на то, что эти системы контролируемого высвобождения продемонстрировали значительную эффективность в условиях окружающей среды, практическая эффективность упаковки с контролируемым высвобождением SO_2 по-прежнему сталкивается с серьезными проблемами в условиях холодовой цепи, которая обычно поддерживается при температуре 0–4 °C. С одной стороны, низкая температура может замедлить гидролиз сульфитсодержащих высвобождающих агентов, таких как $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$, что приводит к недостаточному образованию SO_2 и к тому, что концентрация SO_2 в газовом пространстве остается ниже эффективного противогрибкового уровня

[55]. С другой стороны, повышенная растворимость SO_2 при низкой температуре, наряду с конденсацией на поверхности фруктов или внутренней стенке упаковки, может способствовать повторному растворению высвобожденного SO_2 и дальнейшему снижению эффективной концентрации газообразного SO_2 [20]. В условиях колебаний температуры, вызванных погрузкой, разгрузкой, транспортировкой или временным нарушением холодовой цепи, накопление конденсата и локальное потепление могут ускорить гидролиз $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ и снизить растворимость SO_2 , что приводит к резкому или пространственно неравномерному высвобождению SO_2 . Такое локальное избыточное высвобождение может вызвать обесцвечивание тканей, содержащих антоцианы, повреждение поверхности плодов, ускоренное размягчение тканей и повышенный риск превышения остаточных количеств SO_2 допустимых норм [56]. Таким образом, дисбаланс между недостаточным высвобождением и локальным избыточным высвобождением отражает ограниченную адаптивность к окружающей среде обычных прокладок или вкладышей для медленного высвобождения SO_2 . Существующие системы медленного высвобождения в основном основаны на контроле проницаемости материала или оптимизации начальной загрузки высвобождающего агента и поэтому могут быть недостаточными в качестве самостоятельных стратегий для применения в холодовой цепи. Дальнейшее развитие должно выйти за рамки пассивного контролируемого высвобождения и перейти к интегрированным системам, сочетающим материалы, выделяющие SO_2 , с датчиками реального времени, визуальными индикаторами или компонентами, реагирующими на внешние воздействия. Такая интеграция позволит упаковке в условиях холодовой цепи отслеживать колебания концентрации SO_2 , заблаговременно предупреждать о недостаточном или чрезмерном высвобождении и обеспечивать более точную координацию между эффективностью консерванта и безопасностью остаточных веществ.

3.2 Сульфитная форма

SO_3^{2-} и HSO_3^- , как водные производные SO_2 , широко используются в качестве основных консервантов в пищевых продуктах [57]. В водной среде SO_2 может превращаться в производные, такие как HSO_3^- и SO_3^{2-} , посредством реакций гидратации и диссоциации [58]. Эти ионы составляют основную активную форму SO_2 , проявляя не только мощные антиоксидантные, антибактериальные свойства и способность сохранять цвет, но и потенциально выступая в качестве сигнальных молекул для регулирования антиоксидантных защитных систем [59]. Антиоксидантный механизм сульфита в основном проявляется в его способности реагировать с

хиноновыми соединениями, образующимися в процессе окисления, с образованием стабильных продуктов, тем самым обращая вспять процесс ферментативного потемнения и предотвращая дальнейшее образование коричневых пигментов [60]. В практическом применении сульфиты широко используются для консервации различных продуктов питания. В переработке фруктов и овощей они обычно используются в качестве красящих агентов для предотвращения окислительного потемнения полифенольных соединений [60]. В водных продуктах метабисульфит натрия обычно используется для борьбы с черными пятнами на креветках и микробной порчей. Liang и др. [61] показали, что обработка 1,25% метабисульфитом натрия эффективно замедляет потемнение креветок, при этом значение L достигает 36,40 после 8 дней хранения, что на 14,32 выше, чем в необработанной контрольной группе. Между тем, комбинация низкой дозы метабисульфита натрия с низином и этилендиаминтетрауксусной кислотой показала более сильный антибактериальный эффект, при этом количество аэробных бактерий достигло всего 2,37 log CFU/г на 8-й день, что значительно ниже, чем в контрольной группе; количество психротрофных бактерий также снизилось до неопределяемого уровня. В виноделии сульфиты являются наиболее распространенными и экономичными антиоксидантами, защищая фенольные соединения и другие вкусовые компоненты от окисления, сохраняя свежесть вина и стабильность его цвета [62].

4. Оценка безопасности и механизмы регулирования SO_2

Несмотря на широкое использование SO_2 в качестве консерванта и антиоксиданта в пищевой промышленности, опасения по поводу его остаточного содержания в продуктах питания сохраняются уже давно, даже несмотря на то, что он продлевает срок хранения пищевых продуктов. Поэтому правильное понимание процессов абсорбции, метаболизма и безопасности SO_2 имеет решающее значение для научного применения SO_2 , оценки его безопасности для пищевых продуктов и разработки разумных нормативных актов.

4.1 Эндогенная регуляция и экзогенное воздействие SO_2

В отличие от традиционного представления, рассматривающего SO_2 исключительно как атмосферный загрязнитель или остаток пищевой добавки, современные медицинские исследования подтвердили, что SO_2 больше не считается просто экзогенным токсином, а скорее ключевой газообразной сигнальной молекулой в организме человека на физиологическом уровне [63]. Он образуется

преимущественно в результате эндогенных метаболических путей, продуцирующих серосодержащие аминокислоты ([L]-цистеин). Под последовательным катализом цистеиндиоксигеназы (CDO) и аспартатаминотрансферазы (AAT) [L]-цистеин генерирует β -сульфинилпируват, который в конечном итоге разлагается с образованием эндогенного SO_2 . Этот эндогенный SO_2 играет решающую роль в поддержании сердечно-сосудистого гомеостаза [64, 65]. Исследования показывают, что SO_2 может оказывать значительное вазодилатирующее действие, модулируя сосудистый тонус посредством активации АТФ-чувствительных калиевых каналов (K_2ATP) и кальций-активируемых калиевых каналов (BK_{Ca}) [66]. Кроме того, SO_2 в физиологических концентрациях может ингибировать аномальную пролиферацию клеток гладкой мускулатуры сосудов, тем самым улучшая легочную гипертензию и уменьшая ремоделирование сосудов [10].

Тем не менее, это физиологическое равновесие легко нарушается. В сфере безопасности пищевых продуктов его детоксикационная способность зависит от метаболической способности организма к SO_2 [67]. Газообразный SO_2 в основном связан с ингаляционным воздействием. Из-за высокой растворимости в воде вдыхаемый SO_2 может растворяться на поверхности слизистой оболочки дыхательных путей, образуя SO_3^{2-} и HSO_3^- , тем самым раздражая дыхательные пути и вызывая кашель, бронхоконстрикцию и астмоподобные реакции. При чрезмерном вдыхании SO_2 , превышающем ферментативную детоксикационную способность SO_2 , нарушается метаболический гомеостаз организма. Чрезмерное воздействие может вызвать усиление окислительного стресса, способствуя образованию свободных радикалов, повреждающих клеточные мембраны, белки и ДНК, что приводит к повреждению клеток. В конечном итоге это может привести к повреждению множества отдаленных органов (таких как легкие, печень, почки и сердце), ускоряя старение организма или вызывая заболевания [11]. Кроме того, сообщалось, что SO_2 и его производные вызывают разрывы ДНК и хромосомные aberrации при высоких дозах или длительном воздействии, тем самым нарушая геномную стабильность и увеличивая риск генетических заболеваний, таких как рак [68]. Напротив, сульфитные и метабисульфитные соли, используемые в пищевых продуктах, в основном связаны с пероральным воздействием. После приема внутрь эти соединения могут превращаться в SO_3^{2-} и HSO_3^- в водной среде желудочно-кишечного тракта и плазмы и обычно окисляются митохондриальным SO_2 до менее реактивного сульфата, после чего выводятся с мочой [64]. Всё больше клинических данных связывают воздействие сульфитов с реакциями гиперчувствительности и непереносимости, особенно у

астматиков [69]. К числу сообщаемых симптомов относятся желудочно-кишечный дискомфорт, дерматит, крапивница, респираторные симптомы, похожие на астму, и даже анафилактический шок [12]. Однако лежащие в основе патологические механизмы остаются недостаточно изученными. Современные гипотезы предполагают, что сульфиты могут связываться с эндогенными белками, тем самым вызывая контактные аллергические реакции [70]. В случаях непереносимости сульфитов в качестве возможных механизмов также предлагаются холинергические рефлексy и прямые токсические или фармакологические эффекты, включая образование радикалов во время ферментативного окисления сульфитов, что может способствовать раздражению легких и воспалительным реакциям, связанным с эозинофилами [71]. Хотя имеющиеся данные не подтверждают однозначно канцерогенное, репродуктивное или тератогенное воздействие, разнообразие и тяжесть реакций гиперчувствительности, связанных с сульфитами, побудили многие регулирующие органы ужесточить требования к маркировке и ограничить их использование в некоторых свежих продуктах питания.

4.2 Стандарты безопасности и система регулирования SO₂

Как уже обсуждалось ранее, несмотря на значительную ценность SO₂ в пищевой промышленности, при превышении его метаболической детоксикационной способности организма экзогенное поступление может вызывать окислительный стресс, перекисное окисление липидов и генотоксические реакции, приводящие к системному повреждению сердечно-сосудистой, дыхательной и репродуктивной систем. Учитывая, что его токсическое воздействие может распространяться от молекулярного уровня до дисфункции органов, установление научно обоснованных пределов остаточного содержания до выпуска на рынок пищевых продуктов и обеспечение соответствия требованиям стали основными условиями для защиты общественного здоровья. В связи с этим страны и международные организации последовательно разработали соответствующие стандарты безопасности и нормативные рамки для регулирования его применения в пищевой промышленности. Еще в 1973 году Объединенный экспертный комитет ФАО/ВОЗ по пищевым добавкам установил допустимую суточную норму потребления SO₂ на уровне 0–0,7 мг/кг массы тела на основе токсикологических данных, заложив научную основу для установления глобальных предельных значений [72]. Опираясь на эту основу, Комиссия Codex Alimentarius [73] устанавливает дифференцированные стандарты для различных пищевых матриц. Например, предел для белого сахара установлен на уровне ≤ 15 мг/кг, в то время как содержание сырых

замороженных креветок разрешено до ≤ 100 мг/кг [74]. В винодельческой отрасли, широко использующей SO_2 , национальные стандарты демонстрируют значительные региональные различия: Управление по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и медикаментов США (FDA) устанавливает верхний предел примерно в 350 мг/л [75], в то время как ЕС устанавливает отдельные пределы в 150 мг/л для красного вина и 200 мг/л для белого вина [76]. Однако китайский стандарт GB 2760-2024 единообразно ограничивает этот уровень до 250 мг/л [77]. Кроме того, Китай установил строгие исключительные пределы для сушеных овощей (≤ 200 мг/кг) и некоторых сухофруктов (≤ 200 мг/кг). Следует отметить, что указанные выше пределы не охватывают все категории продуктов питания, в которых разрешены сульфиты SO_2 (E220-E228). В странах Евразийского экономического союза (ЕАЭС), в том числе в России и Беларуси, содержание диоксида серы и сульфитов регулируется техническими регламентами Таможенного союза. Ключевыми нормативными документами в этой сфере выступают:

- ТР ТС 022/2011 «Пищевая продукция в части ее маркировки»;
- ТР ТС 029/2012 «Требования безопасности пищевых добавок, ароматизаторов и технологических вспомогательных средств» [2].

В соответствии с ТР ТС 022/2011, диоксид серы и сульфиты включены в перечень наиболее распространенных компонентов, способных вызывать аллергические реакции. В связи с этим они подлежат обязательному указанию в составе продукции, если их общее содержание превышает 10 мг/кг или 10 мг/л в пересчете на диоксид серы. При этом содержание диоксида серы менее указанных величин оценивается как остаточное количество и может не указываться на маркировке [2]. Предельно допустимые уровни (МДУ) суммарного содержания диоксида серы и сульфитов из всех источников для различных категорий продуктов установлены в Приложении 8 к ТР ТС 029/2012. Эти лимиты дифференцированы в зависимости от типа продукта. Приведем некоторые примеры. В таблице 1 показаны предельно допустимые уровни для некоторых продуктов.

Таблица 1

Примеры предельно допустимого уровня (МДУ)

Категория продукта	МДУ, мг/кг
Вина виноградные	300
Вина плодовые	200
Сахар белый	15
Сухофрукты (абрикосы, персики, изюм)	до 2000
Ракообразные продукты (свежие и замороженные)	150

В 2024 году в ТР ТС 029/2012 были внесли поправки, был обновлен список разрешенных добавок и правила их использования [1, 78]. Тем не менее, исследователи указывают на то, что система техрегулирования в ЕАЭС в вопросах нормирования и контроля SO_2 всё ещё имеет ряд уязвимостей. Главная проблема кроется в рассогласовании требований самих регламентов и национальных стандартов на методы анализа. Единые подходы к измерению показателей пока не выработаны [1]. Из-за этого возникают технические барьеры во внутренней торговле Союза. Сближение национальных стандартов с международными нормами сейчас признано одной из приоритетных задач. Отдельного внимания заслуживает метод Монье-Вильямса (АОАС 990.28) — международный арбитражный способ определения диоксида серы и сульфитов. Чтобы полноценно внедрить его в контрольную практику ЕАЭС, необходимо провести дополнительную валидацию и адаптировать методику под специфику местных пищевых матриц. Обновленные данные EFSA за 2025 год о воздействии сульфитов на организм человека через пищу показывают, что, помимо перечисленных выше примеров, многие другие категории продуктов питания также имеют соответствующие максимальные уровни, включая переработанные картофельные продукты, некоторые мясные блюда, ароматизированные напитки, алкогольные напитки и некоторые закуски [14]. Это указывает на то, что воздействие SO_2 /сульфитов может происходить из нескольких источников в рационе питания, а не из одной категории продуктов. Поэтому при оценке риска следует учитывать не только предельные значения остаточных количеств в отдельных продуктах питания, но и кумулятивное воздействие через пищу в результате комбинированного потребления из нескольких источников. Оценка EFSA в рамках альтернативных сценариев с максимальными уровнями показала, что наибольшее воздействие наблюдалось у детей младшего возраста, в то время как основные категории продуктов питания, вносящие наибольший вклад, различались в зависимости от возраста: вино, пиво и мясные блюда были основными источниками для взрослых и пожилых людей; фруктовые и овощные соки и ароматизированные напитки — для подростков и детей; а сухофрукты и овощи — для младенцев и детей младшего возраста [14]. Эти различия в максимально допустимых уровнях остаточных веществ (МДВ) и источниках воздействия отражают не только вариации в пищевых привычках и условиях окружающей среды в разных регионах, но и подчеркивают влияние кумулятивного потребления и сложности пищевой матрицы на контроль остаточных веществ. Поэтому для обеспечения эффективного внедрения МДВ в процессе фактического производства и распределения необходимы точные, эффективные и устойчивые к помехам технологии обнаружения. Такие методы являются ключевым

компонентом, связывающим оценку безопасности SO_2 с регулирующим надзором, особенно в условиях сложных помех, создаваемых пищевой матрицей.

В рамках этой дифференцированной нормативной базы многие страны ввели дополнительные ограничения для двух ситуаций высокого риска. Первая касается сенсibiliзирующего потенциала сульфитов и соответствующих требований к маркировке. В связи с сенсibiliзирующим потенциалом сульфитов многие страны и международные организации включили их в системы маркировки пищевых продуктов и установили обязательные пороговые значения для указания содержания аллергенов, чтобы защитить восприимчивых потребителей, особенно астматиков и лиц с непереносимостью сульфитов. ФАО/ВОЗ предоставляет научные рекомендации по оценке риска пищевых аллергенов, а Кодекс требует указания содержания сульфитов при концентрации 10 мг/кг или выше [79]. В ЕС диоксид серы и сульфиты должны указываться, если их концентрация превышает 10 мг/кг или 10 мг/л, выраженных в пересчете на SO_2 [80]. В Соединенных Штатах, хотя сульфиты не классифицируются как основные пищевые аллергены, продукты, содержащие сульфитирующие агенты в определяемых концентрациях 10 ppm или выше в готовом продукте, должны указывать на этикетке об их наличии [81].

Второй аспект регулирования касается обманного или несанкционированного применения сульфитов в пищевых продуктах. Эта проблема особенно важна для свежего мяса, где сульфиты могут замедлить изменение цвета и придать продуктам ложный и потенциально опасный вид свежести. Соответственно, правила США устанавливают, что SO_2 не должен использоваться в мясе, продуктах, признанных источниками витамина B1, а также в фруктах и овощах, предназначенных для подачи или продажи в сыром виде или представленных как свежие [81]. ЕС придерживается аналогичного принципа, разрешая использование сульфитов только в утвержденных категориях пищевых продуктов и в пределах установленных лимитов [4, 5, 82]. В Китае использование сульфитов в мясных продуктах полностью запрещено.

Выводы

В целом, благодаря своей окислительно-восстановительной активности и биологическому воздействию, SO_2 поддерживает качество пищевых продуктов посредством множества механизмов, включая антимикробное действие, защиту от потемнения, антиоксидантную активность и сохранение аромата. Однако SO_2 не существует в пищевых системах в виде статической добавки; на его распределение, формы, высвобождение и повторное растворение совместно влияют состав матрицы,

pH, активность воды, температура и условия в воздушном пространстве упаковки. По мере ужесточения правил безопасности пищевых продуктов, главная задача применения SO₂ сместилась от простого достижения консервирующей эффективности к точному балансу между сохранением качества и безопасностью остатков. Поэтому точный количественный мониторинг форм и уровней SO₂ в пищевых матрицах и внутренней атмосфере упаковки необходим для скоординированного контроля качества и безопасности пищевых продуктов.

Дальнейшие исследования, направленные на решение проблем применения SO₂ в холодной цепи и снижения рисков, необходимо сосредоточить на разработке альтернативных или дополнительных стратегий консервации, таких как более безопасные добавки GSH, системы упаковки с контролируемым высвобождением, содержащие эфирные масла растений, и новые нетермические технологии обработки, для синергетической оптимизации сохранения качества пищевых продуктов и обеспечения гарантии безопасности. Кроме того, необходимо продолжать углубленное изучение механизмов непереносимости сульфитов у различных групп населения и гармонизировать нормативные требования на международном уровне.

Библиографический список

1. Xing Y., Teng H., San Y., et al. Flavor Substances of Plant Foods: A Review of Structural Properties, Biogenic Flavor Mechanisms, and Challenges // Journal of Food Science. 2025. Vol. 90. No. 7. P. e70437. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.70437>
2. Бурак Л. Ч. Влияние современных способов обработки и стерилизации на качество плодоовощного сырья и соковой продукции // Москва : Общество с ограниченной ответственностью «Научно-издательский центр ИНФРА-М», 2025. 236 с. SBN 978-5-16-020036-1. <https://doi.org/10.12737/0.12737/2154991>
3. Ruiz-Capillas C., Jiménez-Colmenero F. Application of flow injection analysis for determining sulphites in food and beverages: A review // Food Chemistry. 2008. Vol. 112. No. 2. P. 487-493. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.05.085>
4. European Union. Regulation (EC) No. 1333/2008 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2008 on food additives // Official Journal of the European Union L. 2008. Vol. 51. No. 354. P. 16-33. <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:354:0016:0033:en:PDF>
5. European Union. Regulation (EU) No. 1129/2011 of 11 November 2011 amending Annex II to Regulation (EC) No. 1333/2008 of the European Parliament and of the Council by

establishing a Union list of food additives // Official Journal of the European Union L. 2011. Vol. 54. No. 295. P. 1-177. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/>

6. Zaki E. I., El-Mahdy A. R., El-Gamal H. M., El-Seedy A. S. Cytogenetic and Testicular Histological Alterations Induced by Sulphur Dioxide in Dried Apricot Leather // Cellular and Molecular Biology. 2021. Vol. 67. No. 2. P. 66-75. <https://doi.org/10.14715/cmb/2021.67.2.10>

7. Бурак Л. Ч. Обеззараживание и детоксикация сельскохозяйственной продукции холодной плазмой: ограничения и перспективы применения // Агропродовольственная экономика. 2026. № 2. С. 13-28.

8. Yuan Y., Wei J., Xing S., Zhang Z., Wu B., Guan J. Sulfur dioxide (SO₂) accumulation in postharvest grape: the role of pedicels of four different varieties // Postharvest Biology and Technology. 2022. Vol. 190. P. 111953. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2022.111953>

9. Hamzaoglu F., Türkyılmaz M., Özkan M. Effect of SO₂ on sugars, indicators of Maillard reaction, and browning in dried apricots during storage // Journal of the Science of Food and Agriculture. 2018. Vol. 98. No. 13. P. 4988-4999. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9033>

10. Wu H.-J., Huang Y.-Q., Chen Q.-H., et al. Sulfur dioxide inhibits extracellular signal-regulated kinase signaling to attenuate vascular smooth muscle cell proliferation in angiotensin II-induced hypertensive mice // Chinese Medical Journal. 2016. Vol. 129. No. 18. P. 2226-2232. <https://doi.org/10.4103/0366-6999.189927>

11. Maiti B. K. Cross-talk between (hydrogen)sulfite and metalloproteins: impact on human health // Chemistry – A European Journal. 2022. Vol. 28. No. 23. P. e202104342. <https://doi.org/10.1002/chem.202104342>

12. Häberle M., Geier J., Mahler V. Contact allergy and intolerance to sulphite compounds: clinical and occupational relevance // Allergo Journal International. 2017. Vol. 26. No. 3. P. 53-66. <https://doi.org/10.1007/s40629-016-0003-x>

13. Qian B., Zhao J., He Y., Peng L., Ge H., Han B. Miniaturized dielectric barrier discharge-molecular emission spectrometer for determination of total sulfur dioxide in food // Food Chemistry. 2020. Vol. 317. P. 126437. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126437>

14. EFSA (European Food Safety Authority), Horváth Z., Dujardin B. Update of the dietary exposure to sulfur dioxide (E220), sodium sulfite (E221), sodium bisulfite (E222), sodium metabisulfite (E223), potassium metabisulfite (E224), calcium sulfite (E226), calcium bisulfite (E227), and potassium bisulfite (E228) with alternative maximum levels when used as food additives // EFSA Supporting Publication. 2025. Vol. 2025. P. EN-9754. <https://doi.org/10.2903/sp.efsa.2025.EN-9754>

15. Zhang W., Pan Y., Jiang Y., Zhang Z. Advances in gas fumigation technologies for postharvest fruit preservation // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2024. Vol. 64. No. 24. P. 8689-8708. <https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2202775>
16. National Center for Biotechnology Information. PubChem Compound Summary for CID 1119, Sulfur Dioxide. 2026. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Sulfur-Dioxide>
17. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Medical Management Guidelines for Sulfur Dioxide // *Toxic Substance Portal*. U.S. Department of Health and Human Services, 2014. <https://wwwn.cdc.gov/TSP/MMG/MMGDetails.aspx?mmgid=249&toxid=46>
18. D'Amore T., Di Taranto A., Berardi G., et al. Sulfites in meat: occurrence, activity, toxicity, regulation, and detection. A comprehensive review // *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2020. Vol. 19. No. 5. P. 2701-2720. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12607>
19. Shaw A. C., Romero M. A., Elder R. H., Ewan B. C. R., Allen R. W. K. Measurements of the solubility of sulphur dioxide in water for the sulphur family of thermochemical cycles // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2011. Vol. 36. No. 8. P. 4749-4756. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.01.105>
20. Sander R. Compilation of Henry's law constants (version 5.0.0) for water as solvent // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2023. Vol. 23. No. 19. P. 10901-12440. <https://doi.org/10.5194/acp-23-10901-2023>
21. O'Brien J. A., Hinkley J. T., Donne S. W., Lindquist S. E. The electrochemical oxidation of aqueous sulfur dioxide: A critical review of work with respect to the hybrid sulfur cycle // *Electrochimica Acta*. 2009. Vol. 55. No. 3. P. 573-591. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2009.09.067>
22. Gould G. W. The Use of Other Chemical Preservatives: Sulfite and Nitrite // *Microbiological Safety and Quality of Food* / Ed. Lund B. M., Baird-Parker T. C., Gould G. W. Gaithersburg, MD: Aspen Publishers, Inc., 2000. P. 200-213.
23. Бурак Л. Ч. Ультрапереработанные продукты питания: методы снижения их калорийности и повышения пищевой ценности (Обзор предметного поля) // *Health, Food & Biotechnology*. 2025. Т. 7, № 2. С. 41-75. <https://doi.org/10.36107/hfb.2025.i2.s258>
24. Shi R., Li W., Xu X., Song Y., Liu Y., Guo A. A modified pararosaniline hydrochloride method for determination of total and bound sulfur dioxide in wine // *Journal of Food Composition and Analysis*. 2024. Vol. 134. P. 106491. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106491>

25. Ren J., Zheng P., Yu J., et al. Enhancing cold storage quality of 'Muscat Hamburg' grapes: SO₂ slow-release preservative and aroma dynamics // *Food Control*. 2025. Vol. 178. P. 111501. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2025.111501>
26. Liu B., Zhao M., Ai Y., et al. Effects of sulfur dioxide on the volatile composition and aroma of blueberry wine // *Journal of Food Science and Technology*. 2025. Vol. 62. No. 6. P. 1032-1046. <https://doi.org/10.1007/s13197-024-06171-1>
27. Díaz I., Castro R. I., Ubeda C., Loyola R., Laurie V. F. Combined effects of sulfur dioxide, glutathione and light exposure on the conservation of bottled Sauvignon Blanc // *Food Chemistry*. 2021. Vol. 356. P. 129689. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129689>
28. Clark A. C., Deed R. C. The chemical reaction of glutathione and trans-2-hexenal in grape juice media to form wine aroma precursors: the impact of pH, temperature, and sulfur dioxide // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2018. Vol. 66. No. 5. P. 1214-1221. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b04991>
29. Zhang Z., Liu T., Xu Y., et al. Sodium pyrosulfite inhibits the pathogenicity of *Botrytis cinerea* by interfering with antioxidant system and sulfur metabolism pathway // *Postharvest Biology and Technology*. 2022. Vol. 189. P. 111936. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2022.111936>
30. Jia X., Du M., Zheng Y., et al. Automatic periodical SO₂ fumigation improves the storage quality of tender ginger // *Journal of Food Processing and Preservation*. 2021. Vol. 45. No. 4. P. e14949. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14949>
31. Liu Z., Liao C., Golson K., Phillips S., Wang L. Survival of common foodborne pathogens on dried apricots made with and without sulfur dioxide treatment // *Food Control*. 2021. Vol. 121. P. 107569. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107569>
32. Saito S., Obenland D., Xiao C.-L. Influence of sulfur dioxide-emitting polyethylene packaging on blueberry decay and quality during extended storage // *Postharvest Biology and Technology*. 2020. Vol. 160. P. 111045. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2019.111045>
33. Carter M. Q., Feng D., Chapman M. H., Gabler F. Survival of foodborne pathogens on commercially packed table grapes under simulated refrigerated transit conditions // *Food Microbiology*. 2018. Vol. 72. P. 199-205. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2017.12.004>
34. Xing S., Wang M., Zhang Z., et al. Sulfur dioxide enhances postharvest grape resistance to *Botrytis cinerea* by promoting glutathione level // *Scientia Horticulturae*. 2024. Vol. 334. P. 113295. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113295>
35. Xing S., Tian Q., Zheng Y., et al. Sulfur dioxide enhances the resistance of postharvest grape berries to gray mold through hydrogen peroxide signaling // *Postharvest Biology and Technology*. 2024. Vol. 221. P. 113325. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2024.113325>

36. Bellés M., Alonso V., Roncalés P., Beltrán J. A. Sulfite-free lamb burger meat: antimicrobial and antioxidant properties of green tea and carvacrol // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2019. Vol. 99. No. 1. P. 464-472. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9208>
37. Liang Y., Liu X., Chang H., Yap J., Sun W., Gao H. Inhibitory effects of nitrite and sulfite/peroxymonosulfate on bacteria are mediated respectively through respiration and intracellular GSH homeostasis // *Microbiological Research*. 2025. Vol. 290. P. 127962. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2024.127962>
38. Jafari F., Sab M. K., Darvishi H. Solar-dried fig quality: A comparative study of ultrasonic, ohmic blanching, and sulfur dioxide pre-treatments on bioactive retention, antioxidant activity, and physical properties // *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2025. Vol. 104. P. 104105. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2025.104105>
39. Boudboud A., Ben Aziz M., Hajjaj H., Hajji L., de Meulenaer B., Mazouz H. Impact of pretreatment and drying factors on chemical and biochemical attributes of Moroccan Thompson seedless grapes // *International Journal of Food Science*. 2023. Vol. 2023. No. 1. P. 4438353. <https://doi.org/10.1155/2023/4438353>
40. Li Z., Chen S., Qi M., et al. Inhibition of postharvest rachis browning of table grapes by sulfur dioxide: Evidence from phenolic metabolism and sulfur assimilation // *Postharvest Biology and Technology*. 2023. Vol. 204. P. 112413. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2023.112413>
41. Yang H., Chen X., Li X., Wu D., Cai G., Lu J. Effects of 5 antibrowning agents on the color parameters of Dangshan pear (*Pyrus* spp.) wine during storage // *Journal of Food Processing and Preservation*. 2022. Vol. 46. No. 5. P. e16582. <https://doi.org/10.1111/jfpp.16582>
42. Zhou L., Liao T., Liu W., Zou L., Liu C., Terefe N. S. Inhibitory effects of organic acids on polyphenol oxidase: from model systems to food systems // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2019. Vol. 60. No. 21. P. 3594-3621. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1702500>
43. Romanini E., Colangelo D., Lucini L., Lambri M. Identifying chemical parameters and discriminant phenolic compounds from metabolomics to gain insight into the oxidation status of bottled white wines // *Food Chemistry*. 2019. Vol. 288. P. 78-85. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.02.073>
44. Kuijpers T. F. M., Narváez-Cuenca C. E., Vincken J. P., Verloop A. J. W., van Berkel W. J. H., Gruppen H. Inhibition of enzymatic browning of chlorogenic acid by sulfur-containing compounds // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2012. Vol. 60. No. 13. P. 3507-3514. <https://doi.org/10.1021/jf205290w>

45. Gabriele M., Gerardi C., Lucejko J. J., Longo V., Pucci L., Domenici V. Effects of low sulfur dioxide concentrations on bioactive compounds and antioxidant properties of Aglianico red wine // Food Chemistry. 2017. Vol. 245. P. 1105-1112. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.11.060>
46. Zhang Z., Wu Z., Yuan Y., Zhang J., Wei J., Wu B. Sulfur dioxide mitigates oxidative damage by modulating hydrogen peroxide homeostasis in postharvest table grapes // Postharvest Biology and Technology. 2022. Vol. 188. P. 111877. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2022.111877>
47. Ben Rejeb K., Benzarti M., Debez A., Bailly C., Savouré A., Abdelly C. NADPH oxidase-dependent H₂O₂ production is required for salt-induced antioxidant defense in Arabidopsis thaliana // Journal of Plant Physiology. 2015. Vol. 174. P. 5-15. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2014.08.022>
48. Joradol A., Uthaibutra J., Lithanatudom P., Saengnil K. Induced expression of NOX and SOD by gaseous sulfur dioxide and chlorine dioxide enhances antioxidant capacity and maintains fruit quality of 'Daw' longan fruit during storage through H₂O₂ signaling // Postharvest Biology and Technology. 2019. Vol. 156. P. 110938. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2019.110938>
49. Li L., Yi H. Effect of sulfur dioxide on ROS production, gene expression and antioxidant enzyme activity in Arabidopsis plants // Plant Physiology and Biochemistry. 2012. Vol. 58. P. 46-53. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2012.06.009>
50. Harutyunyan M., Malfeito-Ferreira M. Historical and heritage sustainability for the revival of ancient wine-making techniques and wine styles // Beverages. 2022. Vol. 8. No. 1. P. 10. <https://doi.org/10.3390/beverages8010010>
51. Winkler A. J., Jacob H. E. The utilization of sulfur dioxide in the marketing of grapes // Hilgardia. 1925. Vol. 1. No. 6. P. 107-131. <https://doi.org/10.3733/HILG.V01N06P107>
52. Altındağ M., Türkyılmaz M., Özkan M. Changes in polyphenol profile of dried apricots containing SO₂ at various concentrations during storage // Journal of the Science of Food and Agriculture. 2017. Vol. 98. No. 7. P. 2530-2539. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8740>
53. Dantas B. C., Higuchi M. T., de Aguiar A. C., Bosso B. E., Roberto S. R. Postharvest conservation of 'BRS Nubia' hybrid table grape subjected to field ultra-fast SO₂-generating pads before packaging // Horticulturae. 2022. Vol. 8. No. 4. P. 285. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8040285>
54. Бурак Л. Ч. Устойчивая упаковка продуктов питания. Новые разработки в области биоразлагаемых материалов, умных технологий и роль искусственного

интеллекта // Научное обозрение. Технические науки. 2026. № 1. С. 11-18. <https://doi.org/10.17513/srts.1526>

55. Kaplunov T., Zutahy Y., Lurie S., Lichter A. A method for determination of emission rates from SO₂ sheets for storage of grapes // Quality Assurance and Safety of Crops & Foods. 2011. Vol. 3. No. 4. P. 191-197. <https://doi.org/10.1111/j.1757-837X.2011.00111.x>

56. Yin F., Li Z., Lai T., et al. The effect of SO₂ fumigation, acid dipping, and SO₂ combined with acid dipping on metabolite profile of 'Heiye' litchi (*Litchi chinensis* Sonn.) pericarp // Horticulturae. 2025. Vol. 11. No. 8. P. 923. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11080923>

57. Feng H., Liu J., Qaitoon A., et al. Responsive small-molecule luminescence probes for sulfite/bisulfite detection in food samples // TrAC Trends in Analytical Chemistry. 2021. Vol. 136. P. 116199. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2021.116199>

58. Liu F. T., Wang Y. P., Jiang P. F., Zhao B. X. A FRET-based ratiometric fluorescent probe for sensing bisulfite/sulfite and viscosity and its applications in food, water samples and test strips // Food Chemistry. 2024. Vol. 436. P. 137755. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137755>

59. Huang L., Lu Y., Wang A., et al. Complementary assay to determine residual sulfite of the preserved fruit with ratiometric probe // Journal of Food Composition and Analysis. 2025. Vol. 147. P. 108034. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2025.108034>

60. Бурак, Л. Ч. Современные методы дезактивации афлатоксинов в пищевых продуктах // Научное обозрение. Биологические науки. 2024. № 4. С. 31-40. <https://doi.org/10.17513/srbs.1383>

61. Liang Z. R., Hsiao H. I., Jhang D. J. Synergistic antibacterial effect of nisin, ethylenediaminetetraacetic acid, and sulfite on native microflora of fresh white shrimp during ice storage // Journal of Food Safety. 2020. Vol. 40. No. 4. P. e12794. <https://doi.org/10.1111/jfs.12794>

62. Nardini M., Garaguso I. Effect of sulfites on antioxidant activity, total polyphenols, and flavonoid measurements in white wine // Foods. 2018. Vol. 7. No. 3. P. 35. <https://www.mdpi.com/2304-8158/7/3/35>

63. Ma T., Huo F., Chao J., Li J., Yin C. A highly sensitive ratiometric fluorescent probe for real-time monitoring sulfur dioxide as the viscosity change in living cells and mice // Sensors and Actuators B: Chemical. 2020. Vol. 320. P. 128044. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.128044>

64. Huang Y., Zhang H., Lv B., Tang C., Du J., Jin H. Endogenous sulfur dioxide is a new gasotransmitter with promising therapeutic potential in cardiovascular system // *Science Bulletin*. 2021. Vol. 66. No. 16. P. 1604-1607. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2021.04.003>
65. Бурак Л. Ч. Использование современных технологий обработки для увеличения срока хранения фруктов и овощей. Обзор предметного поля // *Ползуновский вестник*. 2024. № 1. С. 99-119. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.013>
66. Zhang Q., Tian J., Bai Y., et al. Effects of gaseous sulfur dioxide and its derivatives on the expression of KATP, BKCa and L-Ca²⁺ channels in rat aortas in vitro // *European Journal of Pharmacology*. 2014. Vol. 742. P. 31-41. <https://doi.org/10.1016/j.ejphar.2014.08.025>
67. Öztürk O. H., Küçükataş V., Yönden Z., Ağar A., Bağcı H., Delibaş N. Expressions of N-methyl-D-aspartate receptors NR2A and NR2B subunit proteins in normal and sulfite-oxidase deficient rat's hippocampus: effect of exogenous sulfite ingestion // *Archives of Toxicology*. 2006. Vol. 80. No. 10. P. 671-679. <https://doi.org/10.1007/s00204-006-0125-x>
68. Alola A. A., Udemba E. N., Iwuagwu C., Abdallah I. Assessing the human development aspects of CO, PM_{2.5}, PM₁₀, NO_x, and SO₂ in the United States // *Heliyon*. 2023. Vol. 9. No. 7. P. e18072. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18072>
69. Nassif A. Ammonium bisulfite contact dermatitis: face eczema due to a bleaching ointment used during hair-dyeing // *Contact Dermatitis*. 2006. Vol. 55. No. 2. P. 124. <https://doi.org/10.1111/j.0105-1873.2006.0866j.x>
70. Roberts D. W., Basketter D., Kimber I., White J., McFadden J., White I. R. Sodium metabisulfite as a contact allergen—an example of a rare chemical mechanism for protein modification // *Contact Dermatitis*. 2012. Vol. 66. No. 3. P. 123-127. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0536.2011.02038.x>
71. Ranguelova K., Chatterjee S., Ehrenshaft M., et al. Protein radical formation resulting from eosinophil peroxidase-catalyzed oxidation of sulfite // *Journal of Biological Chemistry*. 2010. Vol. 285. No. 31. P. 24195-24205. <https://doi.org/10.1074/jbc.M109.069054>
72. FAO/WHO. Toxicological Evaluation of Certain Food Additives With a Review of General Principles and of Specifications: Seventeenth Report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives. World Health Organization, 1973. 42 p.
73. Codex Alimentarius Commission. Codex Standard for Sugars (CODEX STAN 212-1999, Rev. 1-2001). FAO/WHO, 1999.
74. FAO/WHO. Codex Standard for Sugars (CODEX STAN 212-1999). Codex Alimentarius Commission, 2001.

75. Gunnison A. F., Jacobsen D. W., Schwartz H. J. Sulfite hypersensitivity. A critical review // CRC Critical Reviews in Toxicology. 1987. Vol. 17. No. 3. P. 185-214. <https://doi.org/10.3109/10408448709071208>

76. European Commission. Commission Delegated Regulation (EU) 2019/934 of 12 March 2019 supplementing Regulation (EU) No 1308/2013 of the European Parliament and of the Council as regards wine-growing areas where the alcoholic strength may be increased, authorised oenological practices and restrictions applicable to the production and conservation of grapevine products, the minimum percentage of alcohol for by-products and their disposal, and publication of OIV files // Official Journal of the European Union L. 2019. Vol. 62. No. 149. P. 1-52.

77. State Administration for Market Regulation of the People's Republic of China. National Food Safety Standard – Standards for Uses of Food Additives (GB 2760-2024). China Standards Press, 2024.

78. Бурак Л. Ч. Обеспечение качества и безопасности пищевых продуктов в цепочке поставок. Обзор // The Scientific Heritage. 2024. № 147(147). С. 10-19. <https://doi.org/10.5281/zenodo.13996189>

79. FAO/WHO Codex Committee on Food Labelling. Food Labelling Guidance. 5th ed. FAO/WHO, 2007.

80. European Union. Regulation (EU) No. 1169/2011 of the European Parliament and of the Council of 25 October 2011 on the provision of food information to consumers // Official Journal of the European Union L. 2011. Vol. 54. No. 304. P. 18-63. <https://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:304:0018:0063:en:PDF>

81. U.S. Food and Drug Administration. A Food Labeling Guide: Guidance for Industry. 2013.

82. U.S. Food and Drug Administration. Code of Federal Regulations Title 21: Food and Drugs. Electronic Version. 2019. https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=f8a2a8eadcdf4d12038eb7a20ffe8931&mc=true&tpl=/ecfrbrowse/Title21/21tab_02.tpl

83. European Union. Regulation (EC) No. 853/2004 of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004 laying down specific hygiene rules for food of animal origin // Official Journal of the European Union L. 2004. Vol. 47. No. 139. P. 55-205. <https://eurlex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX%3A32004R0853>

УДК 664.8

Бурак Л.Ч., Саманкова Н.В., Егорова З.Е. Современные и интеллектуальные методы обнаружения диоксида серы в пищевых продуктах

Modern and intelligent methods for sulfur dioxide detection in food products

Бурак Леонид Чеславович

Директор Общества с ограниченной ответственностью "БЕЛРОСАКВА" город Минск,

Саманкова Наталья Викторовна

Доцент кафедры товароведения и экспертизы товаров Белорусского государственного экономического университета город Минск,

Егорова Зинаида Евгеньевна

Доцент факультета технологии органических веществ Белорусского государственного технологического университета город Минск

Burak Leonid Cheslavovich

Director of BELROSAKVA Limited Liability Company, Minsk,

Samankova Nataliya Viktorovna

Associate Professor of the Department of Commodity Science and Product Expertise, Belarusian State University of Economics, Minsk,

Egorova Zinaida Evgenievna

Associate Professor of the Faculty of Organic Substances Technology, Belarusian State Technological University, Minsk

Аннотация. Введение. Точное определение содержания диоксида серы (SO_2) и его производных в пищевых продуктах и упаковочной среде является критически важным для обеспечения качества и безопасности продуктов, а также для соблюдения нормативных требований. Сложность анализа обусловлена множественными формами существования SO_2 (газообразный SO_2 , HSO_3^- , SO_3^{2-} , $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$), зависимостью от pH, температуры и матрицы, а также динамическим характером его распределения и высвобождения.

Цель исследования. Систематизировать и сравнить существующие методы обнаружения SO_2 в пищевых продуктах – от традиционных лабораторных подходов до новейших интеллектуальных технологий, с акцентом на их применимость для мониторинга в реальном времени и интеграции в системы упаковки.

Материалы и методы. Материалом для исследования послужили научные публикации, индексируемые в базах данных Scopus, Web of Science, PubMed, за период 2010–2026 гг. Поиск проводился по ключевым словам: «диоксид серы», «сульфиты», «обнаружение», «аналитические методы», «сенсоры», «флуоресцентные зонды», «интеллектуальная упаковка» (на русском и английском языках). В обзор включены оригинальные исследования, обзоры и методические руководства, описывающие аналитические подходы к определению SO_2 в различных пищевых матрицах.

Результаты и их обсуждение. В работе представлена классификация методов обнаружения SO_2 на три группы: (1) традиционные методы (йодометрическое титрование, дистилляция с кислотно-щелочным титрованием, колориметрия с парарозанилином) – они остаются стандартными для рутинного контроля, но трудоемки, требуют длительной пробоподготовки и имеют ограниченную селективность; (2) современные инструментальные методы (ионная хроматография, ЖХ-МС/МС, газовая хроматография, атомно-флуоресцентная спектроскопия, поверхностно-усиленная рамановская спектроскопия) – обеспечивают высокую чувствительность и специфичность, но требуют дорогостоящего оборудования и квалифицированного персонала; (3) интеллектуальные системы обнаружения – электрохимические сенсоры на основе наноматериалов (пористое золото, CeO_2) с пределами обнаружения до 0,023 мкМ; флуоресцентные зонды с механизмами PET, ICT, ESIPT, AIE

и FRET, позволяющие проводить визуализацию и количественное определение; интеллектуальная упаковка с колориметрическими и флуоресцентными индикаторами, встроенными в этикетки; системы цифрового анализа с использованием смартфонов и алгоритмов машинного обучения для автоматической интерпретации сигналов. Проведён сравнительный анализ преимуществ и недостатков (табл. 1). Обсуждены проблемы матричных эффектов и способы их минимизации (предварительная обработка, оптимизация молекулярных зондов, двухканальная коррекция).

Выводы. Переход от пассивного лабораторного анализа к интеллектуальному мониторингу в реальном времени является ключевым трендом. Приоритетными направлениями дальнейших исследований являются: (1) разработка мультимодальных сенсоров (колориметрических/флуоресцентных/SERS) для повышения надёжности; (2) создание гибких, биоразлагаемых и недорогих сенсорных субстратов для интеграции в упаковку; (3) внедрение искусственного интеллекта для обработки данных и прогнозирования рисков; (4) создание систем с обратной связью, сочетающих обнаружение и регулируемое высвобождение SO_2 , особенно для условий холодной цепи.

Ключевые слова: диоксид серы, сульфиты, обнаружение, аналитические методы, электрохимические датчики, флуоресцентные зонды, интеллектуальная упаковка, SERS, хроматография, обнаружение с помощью смартфонов, искусственный интеллект

Abstract. Introduction. Accurate determination of sulfur dioxide (SO_2) and its derivatives in food products and packaging environments is critical for ensuring product quality and safety, as well as for regulatory compliance. The complexity of the analysis is due to the multiple forms of SO_2 (gaseous SO_2 , HSO_3^- , SO_3^{2-} , $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$), dependence on pH, temperature and matrix, as well as the dynamic nature of its distribution and release.

Objective of the study. To systematize and compare existing methods for SO_2 detection in food products – from traditional laboratory approaches to the latest intelligent technologies, with an emphasis on their applicability for real-time monitoring and integration into packaging systems.

Materials and methods. The material for the study was scientific publications indexed in Scopus, Web of Science, PubMed databases for the period 2010–2026. The search was carried out using the keywords: "sulfur dioxide", "sulfites", "detection", "analytical methods", "sensors", "fluorescent probes", "intelligent packaging" (in Russian and English). The review includes original studies, reviews and methodological guidelines describing analytical approaches to SO_2 determination in various food matrices.

Results and discussion. The paper presents a classification of SO_2 detection methods into three groups: (1) traditional methods (iodometric titration, distillation with acid-base titration, pararosaniline colorimetry) – they remain standard for routine control, but are labor-intensive, require lengthy sample preparation and have limited selectivity; (2) modern instrumental methods (ion chromatography, LC-MS/MS, gas chromatography, atomic fluorescence spectroscopy, surface-enhanced Raman spectroscopy) – provide high sensitivity and specificity, but require expensive equipment and qualified personnel; (3) intelligent detection systems – electrochemical sensors based on nanomaterials (porous gold, CeO_2) with detection limits down to $0.023 \mu\text{M}$; fluorescent probes with PET, ICT, ESIPT, AIE and FRET mechanisms enabling visualization and quantitative determination; intelligent packaging with colorimetric and fluorescent indicators integrated into labels; digital analysis systems using smartphones and machine learning algorithms for automatic signal interpretation. A comparative analysis of advantages and disadvantages is performed (Table 1). The problems of matrix effects and ways to minimize them (sample preparation, optimization of molecular probes, dual-channel correction) are discussed.

Conclusions. The transition from passive laboratory analysis to intelligent real-time monitoring is a key trend. Priority areas for further research are: (1) development of multimodal sensors (colorimetric/fluorescent/SERS) to increase reliability; (2) creation of flexible, biodegradable and low-cost sensor substrates for integration into packaging; (3) implementation of artificial intelligence for data processing and risk prediction; (4) creation of feedback systems combining detection and controlled SO_2 release, especially for cold chain conditions.

Keywords: sulfur dioxide, sulfites, detection, analytical methods, electrochemical sensors, fluorescent probes, intelligent packaging, SERS, chromatography, smartphone-based detection, artificial intelligence

Рецензент: Бюллер Елена Александровна – кандидат экономических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «Адыгеский государственный университет»

Введение

Учитывая многообразное присутствие SO_2 в пищевой системе, точное измерение его содержания и форм стало еще одним критически важным фактором обеспечения качества и безопасности пищевых продуктов [1]. Традиционные методы обнаружения с трудом справляются с требованиями к точности и мониторингу в реальном времени [2]. На этом фоне развитие технологий интеллектуальной упаковки произвело революцию в обнаружении SO_2 [3]. Интеграция сенсорных систем с интеллектуальными упаковочными материалами позволяет осуществлять визуальный динамический мониторинг концентрации SO_2 в пищевых продуктах и их внутренней атмосфере упаковки в реальном времени, обеспечивая важнейшую техническую поддержку для баланса между качеством и безопасностью пищевых продуктов [4]. В настоящее время обнаружение SO_2 постепенно эволюционировало от традиционного лабораторного химического анализа к новой фазе, характеризующейся экологической устойчивостью, интеллектуальностью и эффективностью.

Хотя SO_2 широко известен своими применениями в пищевой промышленности, остаются значительные пробелы в исследованиях его физико-химических свойств, механизмов действия и, в частности, его динамического поведения и управления в режиме реального времени в сложных пищевых системах. Существующие исследования в основном сосредоточены на конкретных сценариях применения или отдельных пищевых матрицах [5]. Например, D'Amore и др. [6] рассмотрели наличие сульфитов, их активность, токсичность, регулирование и обнаружение в мясных продуктах. De Aguiar и др. [7] обобщили использование SO_2 для консервации столового винограда после сбора урожая. Noël и др. [8] рассмотрели формы сульфитов и аналитическое количественное определение в вине. Эти обзоры обеспечивают прочную основу в соответствующих областях. Однако в совокупности эти исследования выявляют явный пробел, поскольку ни одно исследование еще не объединило данные по различным пищевым системам, чтобы связать определение форм SO_2 , пороговые значения безопасности и механизмы действия с координацией интеллектуального обнаружения и регулирования контролируемого высвобождения. Такая интеграция особенно необходима в динамичных, многофакторных условиях, характерных для реальной обработки и хранения пищевых продуктов.

Цель данного обзора – обобщить современные достижения в области обнаружения SO_2 в пищевых продуктах, включая традиционные, инструментальные и интеллектуальные методы, с особым акцентом на их пригодность для мониторинга в реальном времени и интеграции в упаковочные системы. Исследовательские вопросы

включают: (1) каковы преимущества и ограничения различных аналитических методов; (2) какие технологии наиболее перспективны для портативного и экспресс-обнаружения; (3) как интеллектуальные системы могут быть интегрированы в активную упаковку для динамического контроля; (4) каковы пути преодоления матричных интерференций и повышения селективности сенсоров.

Материалы и методы

Материалом для данного исследования послужили научные публикации, индексируемые в базах данных Scopus, Web of Science, PubMed, за период 2010–2026 гг. Поиск проводился по ключевым словам: «диоксид серы», «сульфиты», «обнаружение», «аналитические методы», «сенсоры», «флуоресцентные зонды», «интеллектуальная упаковка», «хроматография», «спектроскопия» (на русском и английском языках). В обзор включены оригинальные исследования, обзоры и методические руководства, описывающие аналитические подходы к определению SO_2 в различных пищевых матрицах (вино, фрукты, овощи, мясо, морепродукты, сушёные продукты). Анализ проведён методом сравнительного обобщения с выделением метрологических характеристик (предел обнаружения, предел количественного определения, точность, воспроизводимость) и практической применимости методов.

Результаты и их обсуждение

Поскольку нормативные пределы, состав матрицы и преобладающие формы SO_2 различаются в разных пищевых системах, анализ остатков SO_2 требует различных аналитических приоритетов для разных продуктов. Существующие методы обнаружения существенно различаются по целевым формам SO_2 , применимым пищевым матрицам, процедурам предварительной обработки образцов, чувствительности и практической пригодности. Эти различия особенно важны, поскольку SO_2 в пищевых системах присутствует не в виде единственного статического аналита, а распределяется в рамках матрично-зависимого равновесия, включающего газообразный SO_2 , гидратированный/растворенный SO_2 , HSO_3^- , SO_3^{2-} и обратимые или необратимые аддукты, образующиеся с эндогенными компонентами, такими как карбонильные соединения, фенолы и антоцианы. Относительное содержание этих форм в значительной степени зависит от pH, температуры, активности воды, доступности кислорода, состава матрицы и условий хранения. Следовательно, аналитические операции, такие как подкисление, нагревание, разбавление, продувка газом, дериватизация, экстракция или воздействие воздуха, могут нарушить исходное

равновесное состояние, способствовать окислению сульфита до сульфата, вызвать высвобождение обратимо связанного SO_2 или не позволить извлечь необратимо связанные фракции, тем самым изменяя измеряемую концентрацию. Поэтому статические измерения конечной точки, особенно те, которые основаны на обширной предварительной обработке, могут давать операционально определенное значение, а не полное представление фактического состояния SO_2 в пищевых матрицах и газовом пространстве упаковки. С этой точки зрения, систематическое сравнение существующих технологий обнаружения SO_2 имеет важное значение для оценки их практической применимости в контроле качества пищевых продуктов и регулировании безопасности. Технологии обнаружения SO_2 можно условно разделить на три категории. Традиционные методы, представленные титрованием и колориметрическими анализами; современные инструментальные аналитические методы, основанные на хроматографии и спектроскопии; и быстро развивающиеся интеллектуальные технологии обнаружения, включая электрохимические датчики, флуоресцентные зонды, интеллектуальную упаковку и системы обнаружения с использованием искусственного интеллекта (ИИ). Соответственно, в этом разделе рассматриваем основные принципы обнаружения, технические преимущества и ограничения, текущий прогресс исследований и специфическая для матрицы применимость этих аналитических методов, с особым вниманием к их способности сохранять, трансформировать или различать различные виды SO_2 во время отбора проб, предварительной обработки и анализа (таблица 1).

Таблица 1

Преимущества и недостатки методов обнаружения SO_2 (составлена авторами по результатам обзора научных публикаций)

Метод обнаружения	Типы обнаруженного SO_2	Тестовые продукты	Коэффициент восстановления	Предел обнаружения (LOD) и предел количественного определения (LOQ)	RSD	Преимущества	Недостатки
Йодометрический метод дистилляции	Общее содержание SO_2	Конфеты из молока, свежий лонган, изюм, тапиоковый крахмал, яблочный сок	90,2–93,2%	LOD: 1,5–3 мг/л; LOQ: 5–10 мг/л	1,14–5,11%	Простота, хорошая воспроизводимость, безопасные реагенты	Не применимо для серосодержащих ароматических соединений

58

Метод обнаружения	Типы обнаруженного SO ₂	Тестовые продукты	Коэффициент восстановления	Предел обнаружения (LOD) и предел количественного определения (LOQ)	RSD	Преимущества	Недостатки
Перегонка с добавлением азота в сочетании с кислотно-щелочным титрованием	Общее содержание SO ₂	Юба	95,2–98,1%	LOD: 1 мг/кг; LOQ: 10 мг/кг	2,8–3,9%	Высокая устойчивость к матричным помехам	Сложно контролировать микрокипение, низкая воспроизводимость
ПРА (парарозанилин)	Общее содержание SO ₂	Вино	82,78–98,3%	LOD: $0,17 \times 10^{-3}$ –1 мг/л; LOQ: $0,51 \times 10^{-3}$ –6 мг/л	0,57–6,45%	Простое управление, низкая стоимость	Трудоёмкая пробоподготовка, токсичные реагенты, цветовые помехи
Ионная хроматография (ИК)	Сульфиты	Красное вино, креветки	88,6–100%	LOD креветок: 0,32 мг/л; LOD красного вина: 2,7 мг/кг; LOQ: 8,2 мг/кг	1,8–4,2%	Низкие требования к очистке, высокая чувствительность, широкий линейный диапазон	Окислительные потери при пробоподготовке
ЖХ-МС/МС	Сульфиты	Сухофрукты, сушёные овощи, жидкости, подсластители, морепродукты	84–115%	LOD: 0,12–1,0 мг/кг; LOQ: 0,12–2,5 мг/кг	2,0–22,5%	Высокая точность, прецизионность, воспроизводимость	Сложная пробоподготовка, не подходит для летучих образцов
Газовая хроматография (ГХ)	Сульфиты	Вино	98–103%	LOD: 0,5–1,0 мг/л; LOQ: 0,7–1,2 мг/л	2,6–4,6%	Различает формы SO ₂	Требуется время на разделение, не для реального времени
Атомно-флуоресцентная спектроскопия (АФС)	Общее содержание SO ₂	Вино	87–107%	LOD: 0,79 мг/л	0,4–2,0%	Непрерывный отбор проб, высокая чувствительность	Ограниченный анализ элементов

59

Метод обнаружения	Типы обнаруженного SO ₂	Тестовые продукты	Коэффициент восстановления	Предел обнаружения (LOD) и предел количественного определения (LOQ)	RSD	Преимущества	Недостатки
Поверхностно-усиленная рамановская спектроскопия (SERS)	Общее содержание SO ₂	Вино	89,1–114,7%	LOD: 0,03 мг/л	3,1–5,8%	Широкая область применения, подходит для испытаний на месте	Высокая стоимость
Электрохимический датчик	Сульфиты	Молоко, кимчи, вино, вода	87,7–105,4%	LOD: $0,15 \times 10^{-2}$ –0,88 мг/л; LOQ: $0,49 \times 10^{-2}$ –2,68 мг/л	1,9–10%	Высокая чувствительность, точность, преобразование сигналов	Каталитическая эффективность на непокрытых электродах низкая
Флуоресцентный зонд	Сульфиты	Сахар, красное вино, печенье, морские водоросли, медузы, креветки, кальмары, нори, сушёное манго, лапша, изюм, орехи	84,06–109,63%	LOD: $0,46 \times 10^{-1}$ –29,3 мкМ; LOQ: 16,2 мкМ	0,45–3,06%	Высокая чувствительность, быстрая реакция, неинвазивный, визуализируемый	Высокий предел обнаружения, высокая биологическая токсичность
Интеллектуальная упаковка	Газообразный SO ₂	Загрязнённый воздух	97–105%	LOD: 2,36 мг/м ³ (флуоресценция); 4,98 мг/м ³ (колориметрия)	0,07–1,21%	Простой, эффективный, неразрушающий	Высокая стоимость
Обнаружение с помощью ИИ	Сульфиты	Вода, яблоки, капуста, сахар, стеклянная лапша, сушёный тофу, белый гриб	92–107%	LOD: $1,14 \times 10^{-2}$ –0,20 мкМ	1,78–5,9%	Тестирование на месте, экспресс-анализ и визуализация	Низкий уровень внедрения

1. Традиционные методы обнаружения

Традиционные методы обнаружения в основном включают титрование и колориметрические анализы, которые остаются важными инструментами для рутинного мониторинга и стандартизированного нормативного тестирования остаточного SO_2 в пищевых продуктах. Методы, основанные на титровании, такие как дистилляционная йодометрия и кислотнo-щелочное титрование с продувкой азотом, широко используются благодаря их низкой стоимости, простоте оборудования и широкой применимости к различным пищевым матрицам [9]. Однако эти методы, как правило, основаны на дистилляционном разделении и титровании до конечной точки, и на их точность могут влиять скорость потока азота, условия нагрева, неполное высвобождение связанных сульфитов и помехи от летучих соединений серы или других окислительно-восстановительных веществ [10]. Поэтому методы титрования подходят для стандартизированного определения общего содержания SO_2 , но менее пригодны для быстрого мониторинга на месте или в режиме реального времени. Колориметрические методы, представленные методом гидрохлорида парарозанилина (PRA), обладают относительно высокой чувствительностью и низкими требованиями к оборудованию, обычно требуя только спектрофотометрического считывания [11]. Однако традиционные методы PRA включают использование токсичных реагентов, длительные процедуры предварительной обработки и помехи от оптической матрицы, особенно в окрашенных или сложных по составу пищевых экстрактах [12]. Кроме того, недостаточный контроль pH и температуры во время предварительной обработки может нарушить равновесие между свободными и связанными сульфитами, что приводит к отклонению измеренных значений от фактического состояния SO_2 на момент отбора проб [11]. В целом, хотя традиционные методы остаются работоспособными, все еще необходимы дальнейшие улучшения в плане экологичности, селективности, аналитической точности и эффективности обнаружения.

2. Современные инструментальные аналитические методы

Этот подход в основном основан на использовании высокоточных приборов для разделения, концентрирования и количественного анализа SO_2 и его производных. Хроматография и спектроскопия являются ключевыми методами определения содержания SO_2 в пищевых продуктах, характеризующимися высокой чувствительностью, быстротой, простотой и широкой применимостью.

2.1 Хроматография

При хроматографическом анализе SO_2 , SO_2 в образце преобразуется в стабильные ионные или дериватизированные формы путем подкисления, дериватизации или абсорбции щелочным раствором. После хроматографического разделения отдельные компоненты последовательно попадают в детектор и преобразуются в обнаруживаемые сигналы электропроводности или поглощения ультрафиолетовых лучей, образуя характерные хроматографические пики. Путем количественного анализа площади или высоты пика и сопоставления результатов со стандартной калибровочной кривой можно точно определить содержание SO_2 .

2.1.1 Ионная хроматография

Ионная хроматография (ИК) является производной от высокоэффективной жидкостной хроматографии. В этом методе сульфиты в образце сначала подкисляют для высвобождения SO_2 , который затем перегоняют с помощью пара, продуваемого азотом. Высвободившийся SO_2 затем окисляют до сульфата с помощью H_2O_2 , а полученный сульфат-ион измеряют с помощью кондуктометрического детектора. Однако на результаты могут влиять неполное окисление сульфитов, диссоциация связанных сульфитов во время кислотной перегонки и матричные вариации степени извлечения [13]. Это ограничение тесно связано с динамическим равновесием между различными видами сульфитов в пищевых матрицах. В исходной матрице обратимо связанные сульфиты и свободный HSO_3^- могут сосуществовать в равновесии, тогда как кислотная перегонка может сместить это равновесие в сторону диссоциации и высвобождения SO_2 . Степень диссоциации зависит от силы связывания сульфитных соединений, pH, температуры и состава матрицы в конкретных пищевых системах, что может приводить к различиям в степени извлечения, зависящим от матрицы. Для уменьшения этих проблем для определения сульфитных ионов без полного окислительного превращения используется прямая ионообменная хроматография. Iammarino и др. [14] разработали метод прямой ионообменной хроматографии с кондуктометрическим детектированием для определения сульфитов в свежем мясе и креветках, достигнув степени извлечения 85,2–92,1% и более короткого времени анализа, чем метод Монье–Уильямса. Эта работа послужила методологической основой для стандарта UNI/TS 11868:2022 для определения диоксида серы и его солей в мясных и рыбных продуктах. Позже Iammarino и др. [15] сравнили прямое кондуктометрическое детектирование методом ИК с модифицированным методом Монье–Уильямса в сыром и переработанном мясе и обнаружили, что последний более подвержен ложноположительным результатам от серосодержащих соединений, таких как

сульфид, 2-метил-3-фурантиол и [L]-метионин. Эти исследования показывают, что прямой метод ИК особенно подходит для подтверждающего анализа сульфитов в мясных и морепродуктовых матрицах благодаря более быстрой работе и лучшей специфичности.

2.1.2 Жидкостная хроматография – tandemная масс-спектрометрия

Жидкостная хроматография-тандемная масс-спектрометрия (ЖХ-МС/МС) признана альтернативным методом определения сульфитов в пищевых продуктах и обеспечивает хорошую точность, прецизионность и воспроизводимость [16]. Современные стратегии ЖХ-МС/МС в основном включают прямое количественное определение сульфитов, определение после окислительного превращения в сульфат и обнаружение на основе дериватизации [17]. Дериватизация формальдегидом до гидроксиметансульфоната обычно используется для стабилизации сульфитов и уменьшения потерь, вызванных окислением или связыванием с карбонилсодержащими компонентами пищевых продуктов [18]. Однако ЖХ-МС/МС по-прежнему зависит от этапов экстракции и дериватизации, что делает ее трудоемкой, дорогостоящей и менее подходящей для летучих или динамически изменяющихся образцов.

2.1.3 Газовая хроматография

Газовая хроматография (ГХ), особенно газовая хроматография с анализом паровой фазы, позволяет анализировать свободный и обратимо связанный SO_2 в образцах путем измерения летучего SO_2 и более эффективна, чем традиционные методы, основанные на подкислении, в различении истинного свободного SO_2 , номинального свободного SO_2 и общего SO_2 [19]. Carrascon и др. [1] и Jenkins и др. [20] использовали различные детекторы ГХ для исследования завышенной оценки свободного SO_2 традиционными методами в красном вине. Их результаты показали, что антоцианы являются основным фактором, поскольку слабо связанный SO_2 , ассоциированный с компонентами матрицы, может диссоциировать в кислых аналитических условиях, тем самым увеличивая кажущуюся концентрацию свободного SO_2 . Это открытие подчеркивает взаимопревращение между формами SO_2 , обусловленное равновесием, указывая на то, что матричные эффекты в анализе SO_2 следует интерпретировать как динамические процессы определения форм, а не как фиксированные аналитические помехи. В последние годы портативные микрофлюидные устройства на бумажной основе, использующие принципы разделения газовой фазы, начали преобразовывать концепции хроматографического разделения в платформы для быстрого обнаружения на месте [21].

2.2 Спектроскопические методы

Спектроскопический анализ SO_2 включает преобразование SO_2 в активный сигнал, который может быть обнаружен спектроскопически; благодаря его взаимодействию с электромагнитным излучением генерируются характерные отклики, такие как флуоресценция или рамановские сигналы, что позволяет проводить количественный анализ.

2.2.1 Атомно-флуоресцентная спектроскопия

Атомно-флуоресцентная спектроскопия (АФС) — это качественный и количественный аналитический метод, основанный на длине волны и интенсивности линий атомной флуоресценции, обеспечивающий непрерывный отбор проб и высокую чувствительность [22]. Однако прямое определение серы затруднено, поскольку ее чувствительные резонансные линии расположены в вакуумно-ультрафиолетовой области около 180 нм, где поглощение кислорода и оптические ограничения обычных приборов АФС могут мешать обнаружению [23]. Поэтому SO_2 или серосодержащие соединения обычно анализируются с использованием косвенных стратегий генерации паров. В ранних исследованиях неорганический сульфид превращался в H_2S в кислых условиях для обнаружения методом АФС, а контроль pH позволял поэтапно выделять H_2S и SO_2 из одного и того же образца воды [24]. Для соединений серы, таких как сульфат, которые не могут легко образовывать летучие гидриды, электрохимическое восстановление также использовалось для их преобразования в режиме реального времени в H_2S с последующим обнаружением посредством молекулярной эмиссии или спектроскопических сигналов, связанных с атомно-флуоресцентной спектроскопией (AFS). Tyson и Palmer [25] продемонстрировали, что усовершенствованная система проточной инъекции-электрохимической генерации паров-атомной флуоресценции/молекулярной эмиссии может одновременно отслеживать атомную флуоресценцию селена и молекулярную эмиссию серы, что позволяет проводить одновременный анализ селената, сульфата и сульфита. Для определения SO_2 /сульфита в пищевых продуктах более подходящим методом, связанным с AFS, является химическая генерация паров-спектрометрия молекулярной флуоресценции (CVG-MFS). В этом методе сульфит в жидкой фазе преобразуется в газообразный SO_2 с помощью CVG, а сигнал молекулярной флуоресценции SO_2 детектируется при 213,8 нм с использованием цинковой полый катодной лампы в качестве источника возбуждения, без необходимости зажигания пламени. Yu и др. [26] применили этот метод для определения общего содержания SO_2 в образцах вина, достигнув предела обнаружения

0,79 мкг/мл и относительного стандартного отклонения 5,2%, тем самым расширив область применения методов, связанных с АФС, для обнаружения SO_2 .

2.2.2 Поверхностно-усиленная рамановская спектроскопия

Спектроскопия комбинационного рассеяния света с усилением на поверхности (SERS) — это быстрый и неразрушающий метод, который усиливает сигналы комбинационного рассеяния на наноструктурированных металлических поверхностях и все чаще используется для анализа пищевых продуктов на месте благодаря своей высокой чувствительности и молекулярной специфичности [27]. Для обнаружения сульфитов наиболее простой стратегией является прямая идентификация по отпечаткам пальцев, в основном основанная на колебании изгиба O-S-O вблизи 620 см^{-1} и колебании растяжения S-O вблизи 927 см^{-1} [28]. Эта стратегия особенно подходит для обнаружения поверхностных остатков в пищевых продуктах и обычно не требует сложного разделения матриц. Например, Yuan, Zhao и др. [28] на копировальную бумагу наносили наночастицы серебра (AgNPs) и отслеживали эти два характерных пика для проведения гомогенизационного и неразрушающего скрининга остатков метабисульфита натрия на поверхности креветок. Однако неравномерное распределение остатков и недостаточный контакт между жесткими субстратами и неровными поверхностями могут привести к плохой воспроизводимости сигнала. Для решения этой проблемы Wang и др. [29] разработали функционализированный наночастицами серебра SERS-тампон на печатной бумаге для обнаружения сульфита натрия на съедобных грибах *in situ*. Гибкий бумажный субстрат лучше соответствовал изогнутым и шероховатым поверхностям, расширяя возможности прямого обнаружения на основе «отпечатков пальцев» от относительно ровных поверхностей до более сложных пищевых матриц. Тем не менее, этот подход все еще больше подходит для непосредственно доступных остатков на поверхности, чем для растворенных сульфитов в сложных жидких образцах.

Для уменьшения влияния матричных помех в жидких образцах сульфит/бисульфит часто преобразуют в летучий SO_2 , который затем отделяют от жидкой фазы и улавливают с помощью пробоотбора из паровой фазы. Li и др. [30] разработали бумажное устройство на основе газоразделения для колориметрического/SERS-двухрежимного обнаружения SO_2 в вине, достигнув предела обнаружения 1 мкМ. В этом устройстве выделяемый кислотой SO_2 сначала переносили в паровую фазу, а затем улавливали сенсорным интерфейсом, тем самым уменьшая помехи от винной матрицы. Однако пассивная экстракция из паровой фазы страдает от медленного массопереноса и ограниченного обогащения следовых количеств SO_2 . Для повышения

эффективности улавливания и обогащения Fan и др. [31] объединили устройство для анализа паровой фазы, напечатанное на 3D-принтере, с мембраной Si@Ag@PEI для обнаружения незаконно добавленного SO₂ в традиционных китайских лекарственных препаратах. Мембрана Si@Ag@PEI позволила проводить количественное SERS-детектирование после 15 минут микроэкстракции из паровой фазы с линейным диапазоном 2,5–250 мг/кг и пределом обнаружения 0,25 мг/кг, что значительно ниже самого строгого предела остаточного содержания SO₂ в 10 мг/кг, установленного в Китайской фармакопее. Развивая это направление, Wu и др. [32] предложили метод микротермической продувки и улавливания (MTPT), который активно ускорял высвобождение SO₂ из вина и обогащал газообразный SO₂ перед оптическим считыванием. Это представляло собой переход от пассивного отбора проб из паровой фазы к активному обогащению, повышая эффективность массопереноса и делая более осуществимым обнаружение следовых количеств SO₂ на месте.

Когда собственный рамановский сигнал целевого вещества слаб или требуется более высокая селективность, можно использовать химические реакции для преобразования воздействия SO₂ в изменения рамановских сигналов молекулы-репортера. Например, Huo и др. [33] создали гибридную пленку TM-Ag@NU-901, обернув модифицированные тиол-пурпурной AgNP пористым NU-901. SO₂ проходил через поры NU-901 и подвергался нуклеофильному присоединению к участку C=C тиол-пурпурной группы на поверхности AgNP, образуя производные парарозанилина и тем самым вызывая изменения цвета и усиление сигналов SERS. Этот метод объединяет обогащение SO₂, селективную реакцию и усиление сигнала SERS в одном сенсорном интерфейсе, преодолевая ограничение однофазного обнаружения и позволяя применять его к газам, вину и другим пищевым образцам.

Современные инструментальные методы обеспечивают более высокую чувствительность, количественную точность и возможность определения форм соединений, чем традиционные анализы, но они по-прежнему различаются по экологичности, стоимости и устойчивости к матричным помехам. ИК и ЖХ-МС/МС улучшают распознавание SO₂/сульфита за счет хроматографического разделения в сочетании с кондуктометрическим или масс-спектрометрическим детектированием, но часто требуют окисления, дериватизации, очистки, органических подвижных фаз или дорогостоящего оборудования. ГХ, АФС и SERS снижают матричные помехи за счет разделения летучих веществ, элементного отклика или распознавания спектральных отпечатков; однако важными ограничениями остаются нелетучие или прочно связанные фракции SO₂, кислотная предварительная обработка, воспроизводимость субстрата и

конкурентная адсорбция в сложных пищевых матрицах. Поэтому, хотя инструментальные методы являются мощным инструментом для лабораторного подтверждения и анализа форм соединений, они менее подходят для непрерывного, портативного, *in situ* и интегрированного в упаковку мониторинга. Это ограничение особенно важно для SO_2 , поскольку его концентрация и формы соединений могут динамически изменяться в зависимости от pH, температуры, влажности, времени хранения и условий газового пространства упаковки. Эти проблемы сместили акцент в последних исследованиях в сторону интеллектуальных стратегий обнаружения, включая колориметрические и флуоресцентные зонды, бумажные датчики, считывание данных с помощью смартфонов, интеллектуальные этикетки и интеллектуальные системы обнаружения, интегрированные в упаковку, которые лучше подходят для визуализации в реальном времени и мониторинга остаточного SO_2 в пищевых продуктах непосредственно на месте.

3. Интеллектуальное обнаружение

По сравнению с традиционными и инструментальными аналитическими методами, интеллектуальные стратегии обнаружения уделяют больше внимания портативности, визуальному считыванию, реагированию в реальном времени и интеграции с системами упаковки пищевых продуктов. Поскольку концентрация и формы SO_2 могут динамически изменяться в процессе обработки, хранения и транспортировки, интеллектуальное обнаружение предоставляет практический способ мониторинга остаточного SO_2 и изменений газового пространства упаковки непосредственно на месте. Поэтому в последнее время исследования все больше сосредотачиваются на электрохимических датчиках, флуоресцентных зондах, интеллектуальной упаковке и обнаружении с помощью искусственного интеллекта.

3.1 Электрохимические датчики

Электрохимические сенсоры преобразуют сигналы электрохимической реакции в измеримые электрические сигналы, обеспечивая высокую чувствительность и точность, и поэтому широко используются для обнаружения сульфидов и сульфитов [34]. Однако электрохимическое окисление сульфидов и сульфитов на чистых электродах, таких как стеклоуглеродные электроды или платиновые электроды, обычно демонстрирует низкую каталитическую эффективность и плохую чувствительность обнаружения, что препятствует их способности соответствовать требованиям обнаружения следовых количеств веществ. Следовательно, рабочие электроды часто модифицируются

наноматериалами [35]. Wang, Qi и др. [36] подготовили трехмерные непрерывные пористые наночастицы золота (NPG) для модификации чистых электродов. Благодаря их превосходной проводимости и обилию активных центров, этот подход позволил достичь степени извлечения сульфитов в различных образцах пищевых продуктов в диапазоне 87,7–105,4% при пределе обнаружения 5,12 мкМ. Эта производительность значительно превзошла некоторые существующие датчики. Основываясь на этой работе, Mohammadzadeh Jahani и др. [37] разработали электрохимический датчик для обнаружения следовых количеств сульфитов. Они использовали наночастицы диоксида церия (CeO_2), которые обладают обратимым циклом валентности $\text{Ce}^{3+}/\text{Ce}^{4+}$ и большой площадью поверхности, облегчают перенос электронов от SO_3^{2-} и обеспечивают дополнительные активные центры. Такой подход снизил предел обнаружения до 0,023 мкМ, что позволило высокочувствительно обнаруживать сульфиты в сложных образцах воды. Основная проблема методов обнаружения, основанных на путях окисления, заключается в том, что восстанавливаемые вещества могут подвергаться соокислению в том же диапазоне потенциалов, что и сульфиты, что приводит к перекрывающимся токовым сигналам и снижению аналитической точности. Для решения этой проблемы Winiarski и др. [38] предложили электрохимический метод обнаружения, основанный на пути восстановления. В кислой среде SO_2 действует как электроактивное вещество и подвергается восстановлению на поверхности электрода. Благодаря синергетическому взаимодействию с положительно заряженными стабилизаторами и проводящими наночастицами золота, этот подход повышает скорость переноса электронов и увеличивает количество активных центров, тем самым значительно усиливая пиковый ток восстановления. С пределом обнаружения 0,88 мг/л в образцах напитков этот метод предоставляет новые возможности для электрохимического обнаружения сульфитов путем восстановления в кислой среде.

3.2 Флуоресцентные зонды

Флуоресцентные зонды привлекли широкое внимание исследователей благодаря их эффективному применению в биологических, химических, медицинских и экологических процессах. Механизм реакции флуоресцентных зондов на аналиты основан на изменениях флуоресцентных сигналов, вызванных взаимодействием молекул зонда со специфическими аналитами, что привело к разработке различных типов флуоресцентных зондов [39]. Когда свободный зонд связывается с аналитом, происходят фотофизические процессы, приводящие к изменениям флуоресцентных свойств, таких как длина волны возбуждения/излучения, квантовый выход,

интенсивность флуоресценции и время жизни флуоресценции. К распространенным механизмам распознавания относятся фотоиндуцированный перенос электронов (PET), внутримолекулярный перенос заряда (ICT), внутримолекулярный перенос протона в возбужденном состоянии (ESIPT), механизм агрегационно-индуцированного излучения (AIE) и механизм флуоресцентного резонансного переноса энергии (FRET).

3.2.1 PET-зонды

Такие зонды обычно состоят из флуорофора, линкера и распознающего фрагмента. Процесс распознавания в основном включает нуклеофильное присоединение HSO_3^- к электронодефицитным участкам в молекуле зонда, включая альдегидные группы, бензопиразиновые звенья, винильные группы или углерод-углеродные двойные связи, тем самым нарушая исходную сопряженную структуру. Это структурное изменение модулирует состояние флуоресценции зонда, переключая его между незмиссионной и эмиссионной формами и тем самым генерируя обнаруживаемый сигнал [40]. Зонды 1–3 представляют собой типичные системы на основе PET, работающие посредством механизмов тушения-восстановления флуоресценции, при этом зонды 1 и 2 подходят для визуализации $\text{SO}_3^{2-}/\text{HSO}_3^-$ в биологической среде. Зонд 1 обладает большей длиной волны излучения, что эффективно снижает фоновые флуоресцентные помехи и делает его пригодным для визуализации *in vivo* [41]. Зонд 2 имеет более низкий предел обнаружения (LOD) всего 8,3 нМ, обеспечивая несколько более высокую чувствительность, чем зонд 1 [42]. В отличие от него, зонд 3 предлагает более широкий диапазон допустимых значений pH, что позволяет повысить точность обнаружения в различных пищевых матрицах. Nandhini и др. [43] применили этот PET-зонд на основе антрацена-индола для обнаружения бисульфита в реальных образцах, включая красное вино, белый сахар и коричневый сахар, с коэффициентами извлечения 98,5–110,4%. Зонд 4 [44] представляет собой систему на основе PET, работающую по механизму тушения-восстановления флуоресценции, обеспечивающую двухканальные колориметрические и ближнеинфракрасные флуоресцентные отклики. Этот зонд позволяет проводить качественное обнаружение невооруженным глазом и количественный анализ в распространенных пищевых продуктах, таких как сахар, красное вино и печенья, с коэффициентом извлечения 96,90–104,92%.

3.2.2 ICT-зонды

В рамках механизма внутримолекулярного переноса заряда (ICT) происходит перенос заряда между различными функциональными группами внутри молекулы, при этом распознающая группа выступает либо в качестве донора электронов (D), либо в

качестве акцептора электронов (А). В типичной сопряженной системе D– π –А, D передает электроны А через π -сопряженный мостик, тем самым создавая эффективный внутримолекулярный путь переноса электронов. Когда зонд связывается с аналитом, изменяется способность к переносу электронов, или нарушается сопряженная структура, что приводит к изменению спектральных характеристик [45]. Зонды 5–8 нарушают сопряженную структуру D– π –А через производные SO₂, тем самым подавляя эффект ICT и обеспечивая активацию флуоресценции. Зонд 5 обладает преимуществами простой структуры и быстрого отклика, но его флуоресценция легко разбавляется в матрицах с высоким содержанием воды, что делает его пригодным только для систем с белым сахаром или чистой водой [46]. Зонд 6 решил проблему низкой чувствительности, наблюдаемую в зонде 5, достигнув шестнадцатикратного увеличения интенсивности флуоресценции [47]. Зонд 7 дополнительно повысил устойчивость к матричным помехам, что позволило применять его в сложных образцах, таких как водоросли и кальмары, хотя инструментальное детектирование по-прежнему необходимо [48]. В отличие от вышеописанного, зонд 8 претерпевает переход от структуры А– π –А к структуре D– π –А посредством индукции SO₂, тем самым усиливая внутримолекулярный перенос заряда и генерируя быстрый оптический отклик [49]. Как правило, реакции с участием внутримолекулярного переноса заряда обычно быстрые и стабильные; Однако из-за относительно небольшого расстояния электронного перехода их эффективность люминесценции часто низка.

3.2.3 ESIPT-зонды

Процесс ESIPT был впервые описан Веллером в 1950 году [50]. Он включает четыре энергетических уровня: молекула существует в основном состоянии в форме енола (Е), образуя стабильную внутримолекулярную водородную связь. После поглощения фотона она переходит в возбужденное состояние енола (Е), где перераспределение электронов усиливает кислотность донора водородной связи и основность акцептора. Перенос протона происходит в возбужденном состоянии, быстро превращая Е в возбужденное состояние кетона (К), которое обычно служит источником флуоресцентного излучения. К возвращается в основное состояние кетона (К) посредством радиационного перехода, испуская фотон, и впоследствии возвращается в исходное основное состояние енола (Е) посредством обратного переноса протона [50]. Поскольку возбужденные енольная и кето-формы генерируют двойные полосы излучения с большими стоксовыми сдвигами и сверхбыстрой динамикой (в пикосекундном масштабе), большинство молекул с ESIPT могут быть сконструированы как ратиометрические флуоресцентные зонды. Зонды 9 [51] и 10 [52] используют

стратегию двойного функционального блока для высокоселективного и низкотоксичного обнаружения. Один конец обеспечивает возможность флуоресценции ESIPT через 2-(2'-гидроксифенил)бензотиазол (HBT), в то время как другой конец содержит химический центр, который специфически реагирует с $\text{SO}_2/\text{HSO}_3^-$ для модуляции переключения ESIPT. Зонд 9 демонстрирует излучение ESIPT в ближнем инфракрасном диапазоне при 836 нм. В отличие от этого, зонд 10 включает в себя D-π-A структуру на фрагменте HBT, что делает его высокочувствительным к конъюгатному присоединению HSO_3^- . Эта реакция вызывает заметное усиление синей флуоресценции (в 21–24 раза), что позволяет количественно определять физиологические уровни HSO_3^- . В целом, ESIPT обладает такими преимуществами, как большой стоксовский сдвиг, высокое отношение сигнал/шум и возможность определения соотношения. Однако процесс миграции протона легко подавляется в полярных или сильно связанных водородными связями средах, что остается основным ограничением в практических применениях.

3.2.4 AIE-зонды

Традиционные флуоресцентные молекулы демонстрируют выраженную люминесценцию в разбавленных растворах, однако в агрегированном состоянии они подвержены тушению флуоресценции из-за сопряженной плоскостной укладки, что ограничивает их применение в сложных биологических средах [53]. В 2001 году Luo и др. [54] предложили концепцию AIE (Aggregation-Induced Emission), обнаружив, что молекулы с пропеллерными структурами демонстрируют усиленную люминесценцию в агрегированном состоянии. Это явление можно объяснить ограниченным внутримолекулярным движением, включающим как внутримолекулярное вращение, так и внутримолекулярную вибрацию, что подавляет безызлучательные переходы. Следовательно, сильная флуоресценция сохраняется даже при высоких концентрациях [55]. В настоящее время широко используемые каркасы, такие как трифениламин (TPA) и тетрафенилэтилен (TPE), могут быть объединены с ICT для образования D-π-A структур, что позволяет получать специфические отклики и флуоресценцию с определенным соотношением [56, 57]. Зонды 11 и 12 демонстрируют преимущества эффекта усиления флуоресценции при агрегации (AIE) в сложных системах. Зонд 11 относится к каркасу TPA и предназначен для мониторинга в широком диапазоне pH и во внутренней атмосфере упаковки. Он позволяет точно определять HSO_3^- в таких образцах, как питьевая вода, речная вода, пиво, байцзю и бренди [58]. Зонд 12 относится к каркасу TPE и демонстрирует эффект AIE при 710 нм. Интенсивность его флуоресценции показывает сильную линейную корреляцию с концентрацией

производного SO_2 , что позволяет проводить обнаружение исключительно с помощью анализа цвета на смартфоне. Он подходит для глубокой визуализации и обнаружения на месте [59].

3.2.5 FRET-зонды

FRET-зонды основаны на расстоянии между донором и акцептором в 1–10 нм для переноса энергии, при этом эффективность в основном определяется расстоянием между донором и акцептором, а также спектральным перекрытием между спектрами излучения донора и поглощения акцептора. В частности, большее перекрытие между спектрами излучения и поглощения способствует более эффективному переносу энергии [60]. Зонд 13 демонстрирует самую высокую скорость переноса (98,02%) и максимальный стоксовский сдвиг (273 нм), что делает его подходящим для биовизуализации с низким фоном автофлуоресценции [61]; зонд 14 обладает самой высокой чувствительностью (9,9 нМ) и преимуществом излучения в ближнем инфракрасном диапазоне [62]; Зонд 15 впервые обеспечил межсистемную визуализацию от клеток до растений, положив начало новому подходу к обнаружению SO_2 в растениях [63]. Кроме того, некоторые зонды на основе FRET в сочетании с механизмом скрученной ИК-спектроскопии сохраняют стабильную эффективность распознавания в высоковязких или сложных матрицах [61].

Хотя упомянутые выше зонды демонстрируют чрезвычайно высокую чувствительность на уровне нМ или даже пМ для обнаружения SO_2 и его производных, стабильность их работы в реальных пищевых матрицах остается ограниченной множеством механизмов интерференции. Нуклеофильные или восстанавливающие вещества в сложных матрицах, такие как биотиолы, аскорбиновая кислота, полифенолы, восстанавливающие сахара, нитриты, сульфиды и аминокислоты, могут конкурировать с $\text{HSO}_3^-/\text{SO}_3^{2-}$ за участки распознавания, гасить флуоресценцию или изменять микросреду обнаружения, вызывая тем самым дрейф сигнала. В то же время, полярность раствора и колебания pH также могут влиять на процессы отклика зондов с различными механизмами. Например, в полярных или сильно водородно-связанных водных средах перенос протонов в зондах ESIPT может быть подавлен, в то время как состояние переноса заряда в зондах ICT может быть стабилизировано, что приводит к флуктуациям флуоресценции или снижению эффективности отклика [64, 65]. Системы AIE-ICT также могут быть подвержены влиянию сильно полярных и водородно-связанных сред, тогда как зонды FRET могут демонстрировать снижение эффективности переноса энергии из-за изменений расстояния между донором и акцептором, ориентации диполей, фонового поглощения или рассеяния света [64, 66]. В

системах, богатых нуклеофильными веществами, селективность зондов РЕТ также может быть нарушена конкурентными реакциями [44].

Для повышения надежности обнаружения в сложных пищевых матрицах современные стратегии в основном сосредоточены на предварительной обработке образцов и оптимизации молекулярной структуры. Во-первых, такие методы предварительной обработки, как разбавление образцов, точное регулирование pH и твердофазная экстракция (ТФЭ), могут эффективно уменьшить матричные эффекты и фоновые помехи, тем самым повышая точность анализа следовых количеств [67]. Во-вторых, оптимизация конъюгированных систем D-π-A, введение стерических препятствий для повышения специфического распознавания, усиление внутримолекулярных водородных связей и разработка ратиометрических флуоресцентных сигналов и стратегий двухканальной коррекции могут улучшить помехоустойчивость и количественную стабильность зондов в полярных или сложных средах [68, 69, 70, 71]. Таким образом, синергетическая оптимизация стратегий предварительной обработки и дизайна молекулярных зондов может помочь преодолеть неспецифические помехи в сложных системах и обеспечить надежную техническую поддержку для точного мониторинга SO₂ в пищевых продуктах.

3.3 Интеллектуальная упаковка

В последние годы, в связи с растущим спросом на безопасность пищевых продуктов и проведение экспресс-тестирования, значительно расширились исследования в области технологий интеллектуальной упаковки для мониторинга и регулирования SO₂. Суть технологии интеллектуальной упаковки заключается в обеспечении обнаружения в реальном времени и оценки риска остаточного SO₂ с помощью индикаторных или сенсорных устройств [4]. Индикаторная упаковка предоставляет четкую информацию посредством изменения цвета или физических свойств. Сенсорная упаковка использует химические или физические датчики для обеспечения чувствительного и количественного обнаружения. Например, нанесение β-циклодекстрина на фильтровальную бумагу позволяет быстро обнаруживать уровни SO₂ выше нормативных пределов с помощью изменения цвета. Это работает потому, что SO₂ восстанавливает Mn⁴⁺, превращая бумагу из коричневой в белую [3]. Система недорога и многоразовая, что делает ее подходящей для быстрого качественного обнаружения в жидкостях. Ее чувствительность ограничена, с пределом обнаружения около 30 мг/л. Yang и др. [72] разработали интеллектуальную упаковку, реагирующую на SO₂, с использованием неорганических наноматериалов (SiO₂@MCM-41). Эта

система позволяет визуально контролировать концентрацию SO_2 в упаковочной среде посредством изменения цвета этикетки и оценивать ухудшение качества фруктов и овощей. Для повышения чувствительности в последних исследованиях все чаще комбинируются колориметрические и флуоресцентные механизмы обнаружения. Используя химические реакции или физическую координацию, эти интеллектуальные этикетки могут обеспечивать как четкие визуальные сигналы, так и селективное количественное обнаружение в рамках одного упаковочного материала. Например, флуоресцентный зонд на основе трифениламин-хинолиновой структуры модулирует перенос заряда посредством реакции Михаэля. При внедрении в поливиниловый спиртовой субстрат этикетка демонстрирует постепенное изменение цвета от красного к розовому и синему под ультрафиолетовым светом, обеспечивая визуальный мониторинг SO_2 во время хранения фруктов [73]. Система обнаружения на основе ионной жидкости позволяет быстро и обратимо обнаруживать SO_2 . Принцип работы основан на координации между флуоресцеином и SO_2 , с использованием статического тушения флуоресценции и ослабления $\pi-\pi$ поглощения. Поскольку система работает за счет физической координации без разрыва химических связей, она демонстрирует исключительно короткое время отклика — менее 15 секунд. Это позволяет напрямую интегрировать ее в упаковку фруктов и овощей для мониторинга в реальном времени [74]. Между тем, применение экологически чистых и биоразлагаемых субстратов постепенно становится предметом исследований. Yuan, Gao и др. [75] создали метки обнаружения на основе полимолочной кислоты с использованием натурального красителя петунии и чередующихся слоев хитозана/трегалозы, достигнув колориметрического отклика при концентрации SO_2 всего 1,52 ppm, при этом общая разница цветов (ΔE) достигла 74,8, сохраняя при этом высокую чувствительность и биобезопасность. Такие интеллектуальные метки на основе природных материалов демонстрируют экологичный и устойчивый подход к обнаружению. Хотя интеллектуальные системы упаковки предлагают очевидные преимущества для сохранения продуктов питания, их существенная стоимость ограничивает широкое использование.

Таким образом, будущие интеллектуальные системы упаковки могут быть интегрированы с традиционными системами контролируемого высвобождения SO_2 для повышения эффективности динамического мониторинга, предупреждения об отклонениях и управления рисками, особенно в условиях хранения и транспортировки в холодной цепи, где дисбаланс высвобождения и риски остаточного содержания сложнее контролировать. В частности, колориметрические этикетки могут обеспечить

быстрое визуальное предупреждение об аномальном накоплении SO_2 ; флуоресцентные или двухрежимные колориметрические-флуоресцентные системы могут повысить чувствительность обнаружения и снизить риск неправильной интерпретации, вызванной сложным фоном пищевых продуктов или переменными условиями освещения; а быстродействующие обратимые сенсорные материалы подходят для регистрации кратковременных изменений SO_2 , вызванных конденсацией или колебаниями температуры во время транспортировки. Кроме того, биоразлагаемые и природные сенсорные подложки могут повысить безопасность и экологичность интеллектуальных этикеток для упаковки свежих продуктов. В целом, будущие системы упаковки SO_2 должны перейти от однофункционального режима активного высвобождения к интегрированным платформам, которые сочетают контролируемое высвобождение, внутриупаковочный мониторинг, визуальную индикацию и оперативное регулирование, что позволит более эффективно управлять дисбалансом высвобождения и рисками остаточного содержания во время хранения и транспортировки в условиях холодной цепи.

3.4 Обнаружение с помощью ИИ

В последние годы технологии искусственного интеллекта привлекают значительное внимание в научных исследованиях и контроле качества пищевых продуктов. Благодаря дальнейшему внедрению машинного обучения, глубокого обучения и хемометрических моделей, изображения или спектральные сигналы могут использоваться для автоматического извлечения признаков, классификации образцов и прогнозирования концентрации, что позволяет перейти от простого цифрового считывания к интеллектуальной интерпретации результатов обнаружения SO_2 . По сравнению с традиционными методами обнаружения SO_2 , цифровые методы обнаружения с использованием смартфонов и подходы, основанные на искусственном интеллекте, демонстрируют явные преимущества в быстром анализе на месте. Существующие флуоресцентные зонды на основе сульфитов хорошо работают при клеточной визуализации, но страдают от значительных фоновых помех при тестировании пищевых продуктов. Кроме того, для их обнаружения требуется специализированное оборудование, такое как флуоресцентные микроскопы или флуоресцентные анализаторы, что ограничивает их применимость для быстрого тестирования на месте [76]. Для решения этой проблемы исследователи использовали смартфоны для извлечения значений или соотношений красного, зеленого и синего (RGB) каналов, тем самым оцифровывая видимые сигналы для количественного

анализа. Этот подход подходит для предприятий пищевой промышленности, супермаркетов и полевых условий, поскольку не требует громоздких приборов, прост в использовании и обеспечивает быстрое обнаружение. Например, разработанный Du, Yang и др. [77] зонд на основе тιοфена подвергается нуклеофильному присоединению с ионами $\text{SO}_2/\text{SO}_3^{2-}$, что позволяет проводить количественное обнаружение с помощью получения значений RGB на смартфоне. Однако его чувствительность остается относительно ограниченной. Хие и др. [76] добились структурной трансформации из AAA в DAD посредством 1,4-реакции Михаэля, одновременно вызывая изменение цвета от бледно-желтого до красного и активацию флуоресценции от нефлуоресцентного до красного. Эта двухсигнальная система позволяет проводить перекрестную проверку, значительно снижая риск неправильной интерпретации. Предложенный подход позволил улучшить предел обнаружения с 0,20 мМ до 11,4 нМ и сократить время отклика с 10 мин до менее 6 с, что делает его пригодным для быстрого экспресс-анализа пищевых продуктов на месте. Кроме того, Shahvar и др. [78] предложили метод, сочетающий микроэкстракцию из паровой фазы с использованием бумажных мембран. После подкисления образца выделяющийся газ SO_2 диффундирует в паровую фазу и адсорбируется на мембране. Для обнаружения требуется всего 9 мкл реагента, что эффективно снижает количество химических отходов и соответствует принципам экологически чистого анализа.

Модели машинного обучения и глубокого обучения дополнительно расширяют функциональность анализа, связанного с SO_2 , позволяя не только получать сигналы, но и изучать признаки, классифицировать образцы и прогнозировать содержание. Wang, He и др. [79] предложили метод на основе метаобучения для идентификации имбиря, обработанного серой, с использованием изображений, полученных с разных смартфонов. Faster R-CNN использовался для предварительной обработки изображений и удаления фона, в то время как глубокие нейронные сети и метаобучение применялись для извлечения стабильных для устройств признаков и повышения адаптивности модели к различным устройствам обработки изображений. Метод достиг значений полноты, F1-меры и AUC-ROC выше 0,9, а также точности распознавания выше 0,95. Аналогично, Zhang и др. [80] объединили гиперспектральную визуализацию с моделью сверточной нейронной сети с долговременной кратковременной памятью (CLSTM) для различения лилий, обработанных серой, и прогнозирования показателей качества, включая содержание SO_2 . Модель CLSTM в сочетании с выбранными характерными длинами волн достигла значения R^2 равного 0,755 для прогнозирования

содержания SO_2 , что указывает на потенциал глубокого обучения для быстрой и неразрушающей оценки качества, связанной с SO_2 .

В целом, сочетание цифрового считывания с помощью смартфона с анализом на основе искусственного интеллекта или алгоритмов повышает портативность и применимость обнаружения SO_2 на месте, а также позволяет автоматизировать извлечение признаков, распознавание образов и прогнозирование концентрации. Этот переход от визуального восприятия к цифровому сбору данных, а затем к интеллектуальной интерпретации, открывает новый технический путь для быстрого, недорогого и неразрушающего обнаружения SO_2 /сульфитов в пищевых продуктах.

Выводы

В ходе обзора обобщены современные достижения исследований в области технологий обнаружения остаточных количеств SO_2 . Результаты обзора показывают, что исследования в области обнаружения остаточных количеств SO_2 в основном сосредоточены на двух ключевых направлениях: разработка интеллектуальных технологий обнаружения и оптимизация методов предварительной обработки образцов для эффективного преобразования свободного или обратимо связанного SO_2 в обнаруживаемые формы, совместимые с аналитическими методами. На основе сравнительного анализа преимуществ и недостатков различных методов, существующие технологии обнаружения в целом соответствуют требованиям рыночных нормативных актов. Тем не менее, сохраняются некоторые ограничения, включая сложные процедуры подготовки образцов, высокую стоимость тестирования, недостаточную селективность и непригодность для быстрого экспресс-тестирования на месте.

На этом фоне разработка интеллектуальной упаковки стала весьма перспективным направлением. Благодаря интеграции контролируемого высвобождения, обратной связи от датчиков, экологического регулирования и подключения к Интернету вещей, такая интеллектуальная упаковка может продлить срок годности, сохранить качество продукции и обеспечить мониторинг упаковочной среды в режиме реального времени, тем самым поддерживая отслеживаемость цепочки поставок. Сочетание этих подходов с многомодальными технологиями обнаружения, такими как SERS в сочетании с ИИ, может еще больше повысить точность и чувствительность экспресс-обнаружения на месте, обеспечивая мониторинг в режиме реального времени и контроль рисков, связанных с остатками SO_2 . Кроме того, из-за скоропортящегося характера свежих сельскохозяйственных продуктов их

транспортировка представляет значительные проблемы и риски в традиционных логистических системах. Следовательно, для их транспортировки обычно используется логистика холодной цепи. Однако колебания температуры и связанная с ними конденсация в логистике холодной цепи могут нарушить баланс контролируемого высвобождения SO₂ внутри упаковки, что приводит к чрезмерно низким концентрациям SO₂ во внутренней атмосфере упаковки или локальному избыточному высвобождению, в результате чего остаточные количества превышают нормативные пределы. Эти проблемы серьезно ограничивают стабильное и широкое применение технологий консервации на основе SO₂ в системах холодной цепи. Приоритетными направлениями дальнейших исследований являются: (1) разработка мультимодальных сенсоров (колориметрических/флуоресцентных/SERS) для повышения надёжности; (2) создание гибких, биоразлагаемых и недорогих сенсорных субстратов для интеграции в упаковку; (3) внедрение искусственного интеллекта для обработки данных и прогнозирования рисков; (4) создание систем с обратной связью, сочетающих обнаружение и регулируемое высвобождение SO₂, особенно для условий холодной цепи.

Библиографический список

1. Бурак, Л. Ч. Устойчивое производство. Концепция качества 4.0 // Фундаментальные исследования. 2025. № 9. С. 81-90. <https://doi.org/10.17513/fr.43905>
2. Бурак Л.Ч., Завалей А.П., Яблонская В.В., Сапач А.Н. Влияние термоультразвуковой обработки на антиоксидантную активность сока бузины (*Sambucus nigra* L.) // Пищевые системы. 2025. Т. 8, № 1. С. 58-65. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-1-58-72>
3. Joseph V., Warhaftig O., Klein S., Levine M. Paper-based manganese and β -cyclodextrin sensors for colorimetric sulfur dioxide detection // Analytica Chimica Acta. 2022. Vol. 1200. P. 339629. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2022.339629>
4. Du L., Huang X., Li Z., et al. Application of smart packaging in fruit and vegetable preservation: A review // Foods. 2025. Vol. 14. No. 3. P. 447. <https://www.mdpi.com/2304-8158/14/3/447>
5. Li Z., Huang J., Wang L., et al. Novel Insight Into the Role of Sulfur Dioxide in Fruits and Vegetables: Chemical Interactions, Biological Activity, Metabolism, Applications, and Safety // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2023. Vol. 64. No. 24. P. 8741-8765. <https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2203737>
6. D'Amore T., Di Taranto A., Berardi G., et al. Sulfites in meat: occurrence, activity, toxicity, regulation, and detection. A comprehensive review // Comprehensive Reviews in Food

Science and Food Safety. 2020. Vol. 19. No. 5. P. 2701-2720. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12607>

7. De Aguiar A. C., Higuchi M. T., Yamashita F., Roberto S. R. SO₂-generating pads and packaging materials for postharvest conservation of table grapes: A review // Horticulturae. 2023. Vol. 9. No. 6. P. 724. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9060724>

8. Noël M., Carballido L., Bou-Maroun E., Karbowiak T. Sulfites chemistry in wines: From reference quantification methods to more sustainable innovative approaches // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2026. Vol. 25. No. 2. P. e70396. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70396>

9. National Health Commission of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation of the People's Republic of China. National Food Safety Standard – Determination of Sulfur Dioxide in Foods (GB 5009.34-2022). China Standards Press, 2022.

10. National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. National Food Safety Standard – Determination of Sulfur Dioxide in Foods (GB 5009.34-2016). China Standards Press, 2016.

11. Shi R., Li W., Xu X., Song Y., Liu Y., Guo A. A modified pararosaniline hydrochloride method for determination of total and bound sulfur dioxide in wine // Journal of Food Composition and Analysis. 2024. Vol. 134. P. 106491. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106491>

12. Kowalska J., Jezewska A. Determination of pararosaniline hydrochloride in workplace air // Environmental Monitoring and Assessment. 2019. Vol. 191. No. 7. P. 444. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7568-z>

13. Lin J., Zhu Y., Cheng W., Wang J., Wu B., Wang J. Determination of free and total sulfite in Red Globe grape by ion chromatography // Food Science and Technology Research. 2014. Vol. 20. No. 5. P. 1079-1085. <https://doi.org/10.3136/fstr.20.1079>

14. Iammarino M., Di Taranto A., Muscarella M., Nardiello D., Palermo C., Centonze D. Development of a new analytical method for the determination of sulfites in fresh meats and shrimps by ion-exchange chromatography with conductivity detection // Analytica Chimica Acta. 2010. Vol. 672. No. 1-2. P. 61-65. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2010.04.002>

15. Iammarino M., Di Taranto A., Centonze D. Determination of sulphiting agents in raw and processed meat: comparison between a modified Monier-Williams method and the direct analysis by ion chromatography with conductometric detection // Food Analytical Methods. 2017. Vol. 10. No. 12. P. 3956-3963. <https://doi.org/10.1007/s12161-017-0960-9>

16. Association of Official Analytical Chemists. Official method 990.28: Determination of Sulfites in Foods. American Association of Analytical Chemists, 1994.

17. Yang K., Zhou C., Yang Z., et al. Establishing a method of HPLC involving precolumn derivatization by 2,2'-dithiobis (5-nitropyridine) to determine the sulfites in shrimps in comparison with ion chromatography // Food Science & Nutrition. 2019. Vol. 7. No. 6. P. 2151-2158. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1060>
18. Robbins K. S., Shah R., MacMahon S., de Jager L. S. Development of a liquid chromatography-tandem mass spectrometry method for the determination of sulfite in food // Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2015. Vol. 63. No. 21. P. 5126-5132. <https://doi.org/10.1021/jf505525z>
19. Carlos K. S., De Jager L. S. Determination of sulfite in food by liquid chromatography tandem mass spectrometry: collaborative study // Journal of AOAC International. 2017. Vol. 100. No. 6. P. 1785-1794. <https://doi.org/10.5740/jaoacint.17-0033>
20. Jenkins T. W., Howe P. A., Sacks G. L., Waterhouse A. L. Determination of molecular and "truly" free sulfur dioxide in wine: a comparison of headspace and conventional methods // American Journal of Enology and Viticulture. 2020. Vol. 71. No. 3. P. 222-230. <https://doi.org/10.5344/ajev.2020.19052>
21. Fukana N., Sonasard T., Prasertying P., et al. Dual-headspace microfluidic paper-based analytical device for rapid and simultaneous determination of sulfite and ethanol in wine // Talanta. 2025. Vol. 297. P. 128689. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2025.128689>
22. Butcher D. J. Atomic fluorescence spectrometry: a review of advances in instrumentation and novel applications // Applied Spectroscopy Reviews. 2016. Vol. 51. No. 5. P. 397-416. <https://doi.org/10.1080/05704928.2016.1141099>
23. Limburg T., Einax J. W. Determination of bromine using high-resolution continuum source molecular absorption spectrometry in a graphite furnace // Microchemical Journal. 2013. Vol. 107. P. 31-36. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2012.05.016>
24. Shahwan G. J., Heithmar E. M. Application of atomic fluorescence spectrometry to the determination of sulfide ion in sewage waters // Spectroscopy Letters. 1984. Vol. 17. No. 6-7. P. 377-388. <https://doi.org/10.1080/00387018408062696>
25. Tyson J. F., Palmer C. D. Simultaneous detection of selenium by atomic fluorescence and sulfur by molecular emission by flow-injection hydride generation with on-line reduction for the determination of selenate, sulfate and sulfite // Analytica Chimica Acta. 2009. Vol. 652. No. 1. P. 251-258. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2009.07.002>
26. Yu H., Zheng C., Jiang X., Wu X., Hou X. On-line chemical vapor generation for determination of total sulfur dioxide in wine samples using an atomic fluorescence spectrometer // Journal of Analytical Atomic Spectrometry. 2017. Vol. 33. No. 2. P. 161-167. <https://doi.org/10.1039/c7ja00336f>

27. Zhang D., Pu H., Huang L., Sun D.-W. Advances in flexible surface-enhanced Raman scattering (SERS) substrates for nondestructive food detection: fundamentals and recent applications // Trends in Food Science & Technology. 2021. Vol. 109. P. 690-701. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.01.058>
28. Yuan C., Zhao Y., Xi X., Chen Y. Non-destructive screening of sodium metabisulfite residue on shrimp by SERS with copy paper loaded with AgNP // Biosensors. 2023. Vol. 13. No. 6. P. 575. <https://doi.org/10.3390/bios13060575>
29. Wang S., Zhao Y., Zhang C., Cui S., Zhang L., Chen Y. In situ screening of sodium sulfite residue on edible mushroom using SERS active paper swab // Journal of Food Composition and Analysis. 2023. Vol. 125. P. 105809. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2023.105809>
30. Li D., Duan H., Ma Y., Deng W. Headspace-sampling paper-based analytical device for colorimetric/surface-enhanced Raman scattering dual sensing of sulfur dioxide in wine // Analytical Chemistry. 2018. Vol. 90. No. 9. P. 5719-5727. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.8b00016>
31. Fan B., Wang Y., Li Z., et al. Si@Ag@PEI substrate-based SERS sensor for rapid detection of illegally adulterated sulfur dioxide in traditional Chinese medicine // Talanta. 2021. Vol. 238. P. 122988. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2021.122988>
32. Wu Y., Wang M., Gu Y., Ge K. Miniaturized thermal purge-and-trap device combined with self-calibration colorimetric/SERS dual-model optical sensors for highly rapid and selective detection of sulfur dioxide in wine // Food Chemistry: X. 2024. Vol. 25. P. 102091. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.102091>
33. Huo N., Li D., Zheng S., Deng W. MOF-based hybrid film for multiphase detection of sulfur dioxide with colorimetric and surface-enhanced Raman scattering readout // Chemical Engineering Journal. 2021. Vol. 432. P. 134317. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.134317>
34. Saputra H. A. Electrochemical sensors: basic principles, engineering, and state of the art // Monatshefte für Chemie – Chemical Monthly. 2023. Vol. 154. No. 10. P. 1083-1100. <https://doi.org/10.1007/s00706-023-03113-z>
35. Zhang M., Yang Y., Guo W. Electrochemical sensor for sensitive nitrite and sulfite detection in milk based on acid-treated Fe₃O₄@SiO₂ nanoparticles // Food Chemistry. 2024. Vol. 430. P. 137004. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137004>
36. Wang X., Qi X., Liu R., et al. Rapid and reliable determination of sulfide and sulfite in food by a multianalyte electrochemical sensor based on nanoporous gold // Electroanalysis. 2024. Vol. 36. No. 12. P. e202400213. <https://doi.org/10.1002/elan.202400213>

37. Mohammadzadeh Jahani P., Beitollahi H., Tajik S., et al. CeO₂ nanoparticles modified screen-printed carbon electrode: electrochemical sensing platform for sulfite determination in water samples // *International Journal of Electrochemical Science*. 2024. Vol. 19. No. 7. P. 100621. <https://doi.org/10.1016/j.ijoes.2024.100621>
38. Winiarski J. P., de Barros M. R., Magosso H. A., Jost C. L. Electrochemical reduction of sulfite based on gold nanoparticles/silsesquioxane-modified electrode // *Electrochimica Acta*. 2017. Vol. 251. P. 522-531. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.08.171>
39. Tian X., Murfin L. C., Wu L., Lewis S. E., James T. D. Fluorescent small organic probes for biosensing // *Chemical Science*. 2021. Vol. 12. No. 10. P. 3406-3426. <https://doi.org/10.1039/d0sc06928k>
40. Niu H., Liu J., O'Connor H. M., Gunnlaugsson T., James T. D., Zhang H. Photoinduced electron transfer (PeT) based fluorescent probes for cellular imaging and disease therapy // *Chemical Society Reviews*. 2023. Vol. 52. No. 7. P. 2322-2357. <https://doi.org/10.1039/D1CS01097B>
41. Wu Y., Huang Y. A fluorescent probe for detecting and imaging sulfur dioxide derivatives in vitro and in vivo // *Analytical Methods*. 2025. Vol. 17. No. 36. P. 7233-7238. <https://doi.org/10.1039/D5AY00938C>
42. Chen W., Fang Q., Yang D., Zhang H., Song X., Foley J. Selective, highly sensitive fluorescent probe for the detection of sulfur dioxide derivatives in aqueous and biological environments // *Analytical Chemistry*. 2015. Vol. 87. No. 1. P. 609-616. <https://doi.org/10.1021/ac503281z>
43. Nandhini C., Saravana Kumar P., Shanmugapriya R., et al. A combination of experimental and TD-DFT investigations on the fluorescent detection of sulfite and bisulfite ions in aqueous solution via nucleophilic addition reaction // *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 2021. Vol. 425. P. 113668. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2021.113668>
44. Li Y., Sun X., Zhou L., et al. Novel colorimetric and NIR fluorescent probe for bisulfite/sulfite detection in food and water samples and living cells based on the PET mechanism // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2022. Vol. 70. No. 35. P. 10899-10906. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.2c04571>
45. Pramanik R. A review on fluorescent molecular probes for Hg²⁺ ion detection: mechanisms, strategies, and future directions // *ChemistrySelect*. 2025. Vol. 10. No. 7. P. e202404525. <https://doi.org/10.1002/slct.202404525>
46. Kodyawala A., Mondal A., Murugan D., Rangasamy L., Sahoo S. K., Dutta S. A water-soluble colorimetric and turn-on fluorescence sensor for fast and sensitive detection of

sulfite/bisulfite ions in real samples and live cells // Journal of Molecular Structure. 2024. Vol. 1321. P. 139723. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2024.139723>

47. Wang Z., Li N., Xiao Z., et al. Dual-mode colorimetric/fluorometric test paper for rapid on-site sulfur dioxide quantification in food and environmental samples // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2024. Vol. 13. No. 1. P. 115115. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.115115>

48. Kong X., Liu J., Cheng N., Li D., Qi X., Sun Z. Determination of free sulfite in food samples with a novel fluorescent probe as gas-diffusion microextraction acceptor phase // Microchemical Journal. 2024. Vol. 199. P. 110211. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2024.110211>

49. Huang X., Li J., Guo Y., et al. Ultrafast detection of bisulfite by a unique quinolinium-based fluorescent probe and its applications in smartphone-assisted food detection and bioimaging // Talanta. 2024. Vol. 282. P. 126977. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2024.126977>

50. Sedgwick A. C., Wu L., Han H.-H., et al. Excited-state intramolecular proton-transfer (ESIPT) based fluorescence sensors and imaging agents // Chemical Society Reviews. 2018. Vol. 47. No. 23. P. 8842-8880. <https://doi.org/10.1039/C8CS00185E>

51. Ren H., Huo F., Wu X., Liu X., Yin C. An ESIPT-induced NIR fluorescent probe to visualize mitochondrial sulfur dioxide during oxidative stress in vivo // Chemical Communications. 2021. Vol. 57. No. 5. P. 655-658. <https://doi.org/10.1039/D0CC07398A>

52. Wang S.-J., Li J., Gao Y., Guo Y. Highly selective and sensitive 2-(2'-hydroxyphenyl)benzothiazole-based turn-on fluorescent probes for detecting and imaging bisulfite in living cells // Asian Journal of Organic Chemistry. 2018. Vol. 7. No. 3. P. 563-569. <https://doi.org/10.1002/ajoc.201700626>

53. Xu L., Jiang X., Liang K., Gao M., Kong B. Frontier luminous strategy of functional silica nanohybrids in sensing and bioimaging: from ACQ to AIE // Aggregate. 2021. Vol. 3. No. 1. P. e121. <https://doi.org/10.1002/agt2.121>

54. Luo J., Xie Z., Lam J. W. Y., et al. Aggregation-induced emission of 1-methyl-1,2,3,4,5-pentaphenylsilole // Chemical Communications. 2001. No. 18. P. 1740-1741. <https://doi.org/10.1039/b105159h>

55. Sun S., Xue K., Zhao Y., Qi Z. A near-infrared AIE fluorescent probe for accurate detection of sulfur dioxide derivatives and visualization of fingerprints // Talanta. 2024. Vol. 270. P. 125568. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2023.125568>

56. Song X., Wang M., Liu W., et al. A pyrene-based platform for studying the relationship of steric effects on optical properties // *Dyes and Pigments*. 2023. Vol. 219. P. 111532. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2023.111532>
57. Sun N., Su K., Zhou Z., et al. High-performance emission/color dual-switchable polymer-bearing pendant tetraphenylethylene (TPE) and triphenylamine (TPA) moieties // *Macromolecules*. 2019. Vol. 52. No. 14. P. 5131-5139. <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.9b00079>
58. Tang N., Sun R., Xu K., et al. AIE-based dual-ratiometric chemosensor for detection of sulfur dioxide derivatives and viscosity and its application in food samples and biological imaging // *Analytica Chimica Acta*. 2025. Vol. 1353. P. 343949. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2025.343949>
59. Su X., Zeng R., Huang X., et al. A versatile aggregation-induced emission probe: accurate quantification, on-site detection, and bioimaging of sulfur dioxide derivatives using a colorimetric and near-infrared fluorescent probe // *Talanta*. 2025. Vol. 298. P. 128953. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2025.128953>
60. Verma A. K., Noumani A., Yadav A. K., Solanki P. R. FRET based biosensor: principle applications recent advances and challenges // *Diagnostics*. 2023. Vol. 13. No. 8. P. 1375. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13081375>
61. Wang J., Li R., Ou T., Fu Y., Gao C., Yan Y. A dual-response fluorescence sensor for SO₂ derivatives and polarity and its application in real water and food samples // *RSC Advances*. 2024. Vol. 14. No. 48. P. 35638-35643. <https://doi.org/10.1039/d4ra04805a>
62. Li F., Zhai S.-M., Xian-Yu J.-J., Zhao B.-X., Lin Z.-M. NBD-based colorimetric and ratiometric fluorescent probe in NIR for bisulfite // *Talanta*. 2024. Vol. 271. P. 125684. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2024.125684>
63. Li S., Xiao H., Hong J., et al. Novel dual-channel ratiometric fluorescence probe for SO₂ detection in food and bioimaging applications based on FRET mechanism // *Bioorganic Chemistry*. 2024. Vol. 154. P. 108034. <https://doi.org/10.1016/j.bioorg.2024.108034>
64. Elsyed A. F. N., Wong G.-L., Ameen M., Wu M.-W., Chang C.-C. Tunable fluorescence via self-assembled switching of AIE-active micelle-like nanoaggregates // *International Journal of Molecular Sciences*. 2023. Vol. 24. No. 12. P. 9941. <https://doi.org/10.3390/ijms24129941>
65. Klymchenko A. S., Demchenko A. P. Electrochromic modulation of excited-state intramolecular proton transfer: the new principle in design of fluorescence sensors // *Journal of the American Chemical Society*. 2002. Vol. 124. No. 41. P. 12372-12379. <https://doi.org/10.1021/ja027669l>

66. Chen X., Wang F., Hyun J. Y., et al. Recent progress in the development of fluorescent, luminescent and colorimetric probes for detection of reactive oxygen and nitrogen species // *Chemical Society Reviews*. 2016. Vol. 45. No. 10. P. 2976-3016. <https://doi.org/10.1039/c6cs00192k>
67. Zhang X., Oakes K. D., Luong D., Metcalfe C. D., Servos M. R. Solid-phase microextraction coupled to LC-ESI-MS/MS: evaluation and correction for matrix-induced ionization suppression/enhancement for pharmaceutical analysis in biological and environmental samples // *Analytical Chemistry*. 2011. Vol. 83. No. 17. P. 6532-6538. <https://doi.org/10.1021/ac200718d>
68. Suryawanshi S., Gaddam M., Sharma A. Dual-mode colorimetric and viscosity sensitive fluorescent probe for selective detection of bisulfite in food and water samples // *Microchemical Journal*. 2026. Vol. 225. P. 117931. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2026.117931>
69. Wu J., Liu W., Ge J., Zhang H., Wang P. New sensing mechanisms for design of fluorescent chemosensors emerging in recent years // *Chemical Society Reviews*. 2011. Vol. 40. No. 7. P. 3483. <https://doi.org/10.1039/c0cs00224k>
70. Yang S.-Y., Zhang L., Kong F.-C., et al. Scintillators with aggregation-induced emission // *Chem.* 2025. Vol. 11. No. 5. P. 102534. <https://doi.org/10.1016/j.chempr.2025.102534>
71. Xiong J., Ma C., Qu H., et al. Recent advances in fluorescent detection of pesticides in environmental and food matrices: from molecular probes to nanoparticle-based sensors // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2025. Vol. 73. No. 38. P. 23783-23808. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5c07935>
72. Yang J., Cheng F., Zhu Z., et al. An enhanced gas sensor based on SiO₂@mesoporous MCM-41 core-shell nanocomposites for SO₂ visual detection // *Analyst*. 2020. Vol. 145. No. 12. P. 4352-4357. <https://doi.org/10.1039/d0an00621a>
73. Wang Z., Hao C., Li N., et al. Visual colorimetric label for real-time monitoring of SO₂ concentration change in grape and mango during storage // *Food Chemistry*. 2025. Vol. 463. P. 141530. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.141530>
74. Che S., Xu A., Shou Q., et al. A fluorescent and colorimetric sensor based on ionic liquids for the on-site monitoring trace gaseous SO₂ // *Analytica Chimica Acta*. 2022. Vol. 1232. P. 340396. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2022.340396>
75. Yuan L., Gao M., Xiang H., Zhou Z., Yu D., Yan R. A biomass-based colorimetric sulfur dioxide gas sensor for smart packaging // *ACS Nano*. 2023. Vol. 17. No. 7. P. 6849-6856. <https://doi.org/10.1021/acsnano.3c00530>

76. Xue B., Yue C., Tan H., Du F., Jiang L., Zeng L. A portable smartphone sensing platform for simple, rapid, and visual detection of SO₂ in food // Food Control. 2025. Vol. 172. P. 111165. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2025.111165>
77. Du M., Yang X., Hou S., et al. A multifunctional fluorescent probe for simultaneous detection of SO₂/SO₃²⁻, FA, and ClO⁻ and its applications in encryption ink and bioimaging // New Journal of Chemistry. 2025. Vol. 49. No. 18. P. 7601-7616. <https://doi.org/10.1039/d5nj00383k>
78. Shahvar A., Saraji M., Gordan H., Shamsaei D. Combination of paper-based thin film microextraction with smartphone-based sensing for sulfite assay in food samples // Talanta. 2019. Vol. 197. P. 578-583. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2019.01.071>
79. Wang T., He J., Yan H., et al. Sulfur-fumigated ginger identification method based on meta-learning for different devices // Foods. 2024. Vol. 13. No. 23. P. 3870. <https://doi.org/10.3390/foods13233870>
80. Zhang P., Wang Y., Yan B., et al. Integration of hyperspectral imaging and deep learning for discrimination of fumigated lilies and prediction of quality indicator contents // Foods. 2025. Vol. 14. No. 5. P. 825. <https://doi.org/10.3390/foods14050825>
81. Бурак Л. Ч. Влияние современных способов обработки и стерилизации на качество плодовоовощного сырья и соковой продукции // Москва : Общество с ограниченной ответственностью «Научно-издательский центр ИНФРА-М», 2025. 236 с. SBN 978-5-16-020036-1. <https://doi.org/10.12737/0.12737/2154991>
82. Бурак Л.Ч., Ермошина Т.В., Родина Е.Е., Баландина С.В. Анализ состояния и тенденции развития концепции качества 4.0 для устойчивого производства продуктов питания // Международный журнал экспериментального образования. 2025. № 6. С. 77-90. <https://doi.org/10.17513/mjeo.12231>

ЭКОНОМИКА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

УДК 338.431

Комарова О.В. Современные тренды и перспективы развития крестьянских (фермерских) хозяйств в России

Current trends and prospects for the development of peasant (farming) farms in Russia

Комарова Оксана Викторовна,

кандидат экономических наук, доцент

доцент кафедры экономической теории и прикладной социологии,

Уральский государственный экономический университет,

Екатеринбург, РФ

Komarova Oxana Viktorovna,

Cand. Sc. (Econ.), Associate Professor,

Associate Professor of the Department of Economic Theory and Applied Sociology,

Ural State University of Economics, Yekaterinburg, Russian Federation

Аннотация. Актуальным направлением повышения эффективности агропромышленного комплекса и обеспечения продовольственной безопасности страны является анализ секторов сельского хозяйства и выявление особенностей их развития. Значимым сектором сельскохозяйственной системы являются крестьянские (фермерские) хозяйства, которые рассматриваются не только как субъекты малого предпринимательства в аграрной сфере, обеспечивающие конкуренцию товаропроизводителей, но и как субъекты сохранения традиционных ценностей в системе аграрного производства. Цель исследования – выявить основные тренды и направления развития сектора крестьянских (фермерских) хозяйств в России. Теоретическую основу работы составили российские исследования особенностей развития сектора крестьянских (фермерских) хозяйств в контексте предпринимательства, аграрных отношений и региональных особенностей. Исследование основано на данных Росстата о развитии сельского хозяйства за 1995–2025 гг., методах статистического, структурного и сравнительного анализа. Проведенный анализ позволил выявить ключевые тенденции развития сектора крестьянских (фермерских) хозяйств и систематизировать направления их развития на основе институционального и экосистемного подхода. Предложена авторская модель региональной фермерской экосистемы. Сформулированы направления развития сектора крестьянских (фермерских) хозяйств: адаптация государственной аграрной политики в соответствии с отраслевыми особенностями развития, формирование специализированных цифровых платформ и региональной инфраструктуры аграрного сектора.

Ключевые слова: крестьянские (фермерские) хозяйства, сельское хозяйство, агропромышленный комплекс, АПК, малые формы хозяйствования, малое предпринимательство, экономическое развитие, тенденции.

Abstract. An urgent area for improving the efficiency of the agro-industrial complex and ensuring the country's food security is the analysis of agricultural sectors and the identification of their development features. An important sector of the agricultural system are peasant (farming) farms, which are considered not only as subjects of small business in the agricultural sector, ensuring competition for commodity producers, but also as subjects of preserving traditional values in the agricultural production system. The purpose of the study is to identify the main trends and directions of development of the sector of peasant (farming) farms in Russia. The theoretical basis of the work is based on Russian studies of the peculiarities of the development of the peasant (farmer) sector in the context of entrepreneurship, agrarian relations and regional

peculiarities. The study is based on Rosstat data on agricultural development for 1995-2025, methods of statistical, structural and comparative analysis. The analysis made it possible to identify key trends in the development of the peasant (farming) sector and systematize the directions of their development based on an institutional and ecosystem approach. The author's model of the regional farming ecosystem is proposed. The directions of the development of the peasant (farmer) sector are formulated: the adaptation of state agrarian policy in accordance with the sectoral development features, the formation of specialized digital platforms and the regional infrastructure of the agricultural sector.

Keywords: peasant (farmer) farms, agriculture, agro-industrial complex, agro-industrial complex, small forms of management, small business, economic development, trends.

Рецензент: Бюллер Елена Александровна – кандидат экономических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «Адыгеский государственный университет»

Введение. Важную роль в развитии агропромышленного комплекса (АПК) и формировании продовольственной безопасности страны играют крестьянские (фермерские) хозяйства. Интерес к проблемам крестьянских фермерских хозяйств в постсоветской экономической науке постоянно возрастает и определяется высокой значимостью данного сектора в развитии АПК, малых форм хозяйствования и малого предпринимательства в сельском хозяйстве, а также развитием государственной поддержки сельских и отдаленных территорий, таких как программа «Гектар» и др.

В соответствии с законодательством «крестьянское (фермерское) хозяйство (КФХ) представляет собой объединение граждан, связанных родством и (или) свойством и совместно осуществляющих производственную и иную хозяйственную деятельность (производство, переработку, хранение, транспортировку и реализацию сельскохозяйственной продукции), основанную на их личном участии»¹. Общественная ценность КФХ в системе аграрных отношений определяется «способностью данных хозяйств сохранять специфический сельский уклад бытия, культурный и исторический облик, выступать носителями неявного знания и национальных ценностей» [8, с.21]. Также КФХ, являясь субъектами малого предпринимательства, являются основой развития предпринимательской деятельности в аграрной сфере, обладающей определенной системой неформальных институтов и специфической системой отношений собственности [2; 15]. Эти свойства КФХ определяют их значимость в системе аграрных экономических отношений.

Современные исследования данного сектора направлены преимущественно на анализ региональных особенностей развития КФХ [3; 11; 14], анализ в контексте организационной структуры и общей динамики аграрной сферы [6; 13], исторического

¹ О крестьянском (фермерском) хозяйстве: федеральный закон [принят Государственной Думой 23 мая 2003 г.] от 11.06.2003 N 74-ФЗ (ред. от 31.07.2025).

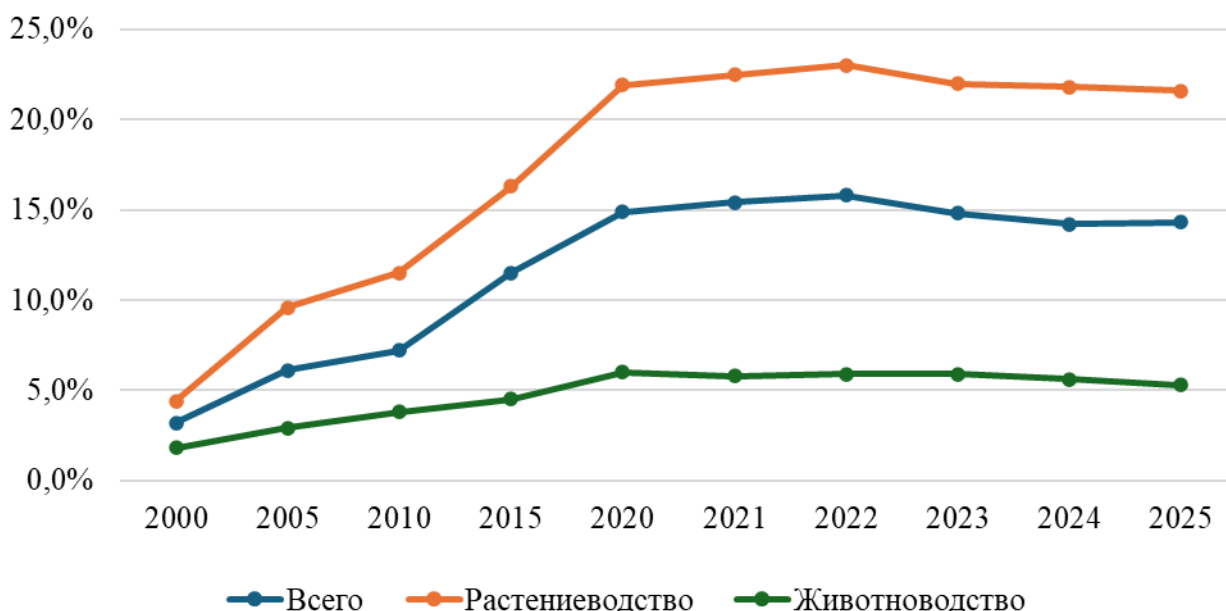
развития [9], государственной поддержки сектора КФХ [4; 12]. Таким образом, современные исследования недостаточно ориентированы на комплексный анализ развития сектора КФХ, что и обусловило цель исследования – выявить основные тренды и направления развития сектора крестьянских(фермерских) хозяйств в России.

Материалы и методы. Для проведения анализа тенденций развития КФХ использованы статистические данные Росстата (<https://rosstat.gov.ru>) по сельскому хозяйству за 1995–2025 гг., статистические методы анализа, обобщение, сравнение и др., анализ публикаций БД РИНЦ по проблемам развития КФХ.

Результаты. Анализ исследований трактовок КФХ как субъекта хозяйствования показал, что с позиций формирования устойчивого роста данного сектора наиболее интересным является институциональный и экосистемный подход. Институциональный подход позволяет рассматривать КФХ как систему устойчивых личных, экономических и социальных взаимосвязей между участниками КФХ, в основе которой лежит не только экономический интерес и права собственности, но и социальные взаимосвязи и обязательства. Данный подход направлен на выявление ядра КФХ и определение их долгосрочной устойчивости.

Экосистемный подход позволяет рассматривать внешний контур развития сектора КФХ не только как цепочку создания ценности, но и как органическое сочетание всех звеньев данной цепи, что формирует КФХ как ядро экосистемы и раскрывает направления и механизмы развития сектора КФХ в российской экономике. Рассмотрим основные тенденции развития КФХ с позиций двух данных подходов.

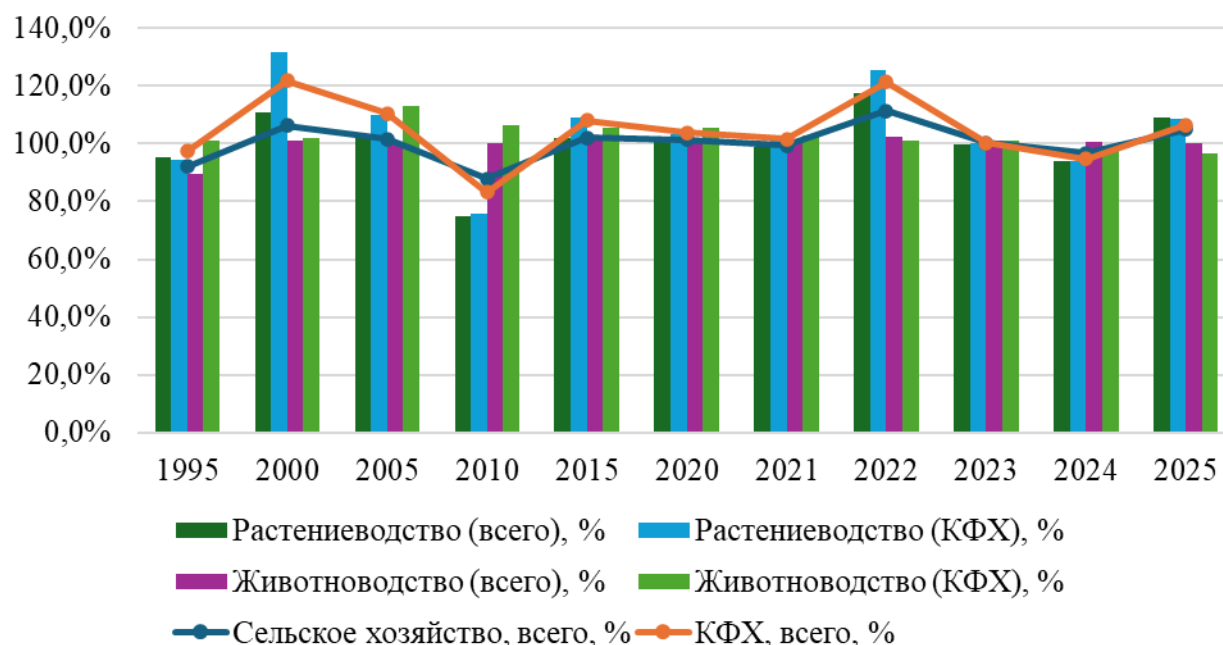
Одной из современных тенденций развития сельскохозяйственного производства является восстановительный рост числа КФХ и их укрупнение [10]. При этом крестьянские (фермерские) хозяйства являются динамично развивающимся субъектом аграрной сферы (рис.1): доля КФХ в совокупном объеме производства сельского хозяйства увеличилась с 2% в 1995 году до 14,3% в 2025 году. Но динамика долей по растениеводству и животноводству заметно отличается, показывая наибольший вклад данного хозяйственного уклада в растениеводство – доля КФХ в производстве продукции растениеводства выросла в 8,6 раза с 2,5% в 1995 году до 21,6% в 2025 году, а в животноводстве в 3,8 раза – с 1,4% в 1995 году до 5,3% в 2025 году, что показывает высокий потенциал КФХ в растениеводстве.



Составлен автором по: Сельское хозяйство, охота и лесное хозяйство // Росстат. [электронный ресурс]. Режим доступа: URL: https://rosstat.gov.ru/enterprise_economy (дата обращения 10.08.2026).

Рис.1. Динамика доли КФХ в продукции сельского хозяйства РФ за 1995–2025 гг., %

Рост структурной доли отражает общий вклад КФХ в производство сельскохозяйственной продукции, а устойчивость сектора можно выявить на основе анализа динамики индексов производства продукции сельского хозяйства. Сопоставление показателей динамики производства в целом по сельскому хозяйству, растениеводству и животноводству с аналогичными показателями КФХ представлено на рис.2 и демонстрирует высокую адаптивность сектора КФХ в условиях турбулентности и неопределенности.



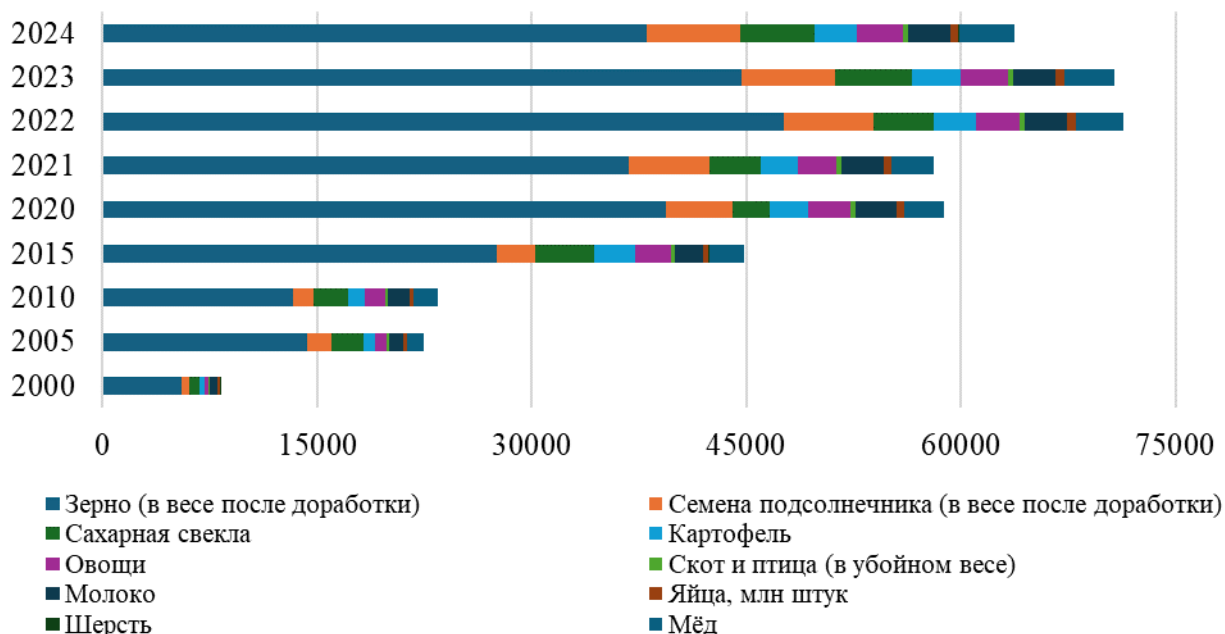
Составлен автором по: Сельское хозяйство, охота и лесное хозяйство // Росстат. [электронный ресурс]. Режим доступа: URL: https://rosstat.gov.ru/enterprise_economy (дата обращения 10.08.2026).

Рис.2. Индекс производства продукции в сельском хозяйстве и секторе КФХ РФ за 1995–2025 гг., %

Так, в периоды кризисов – 2010, 2021, 2024 гг. – общее падение производства в КФХ было ниже уровня снижения производства сельского хозяйства в целом, что отражает уязвимость КФХ в периоды кризисов, обусловленную малым размером и, как следствие, недостаточной возможностью противостоять рискам и обеспечить финансовую маневренность бизнеса. Но при этом структурная динамика показывает, что именно предпринимательская гибкость обеспечивает рост производства по направлениям растениеводство и животноводство выше общего уровня по сельскому хозяйству. Кроме того, наблюдается высокий посткризисный рост сектора КФХ, что показывает динамика индексов производства в 2000, 2015, 2022 гг.

Анализ структуры производства сельскохозяйственной продукции в КФХ (рис.3) показал, что рост производства в секторе КФХ за 2000-2024 гг. является постепенным, пик производства достигнут к 2022 г., что свидетельствует о достижении предела производства сельскохозяйственной продукции в рамках сектора КФХ в условиях сложившегося технологического уклада. Данная динамика указывает на необходимость расширения факторов, определяющих производство сельскохозяйственной продукции,

особое значение среди которых имеют уровень технологической оснащенности производства, агротехнологии, институциональные условия взаимодействия (кооперации) и цифровизации, что позволит выйти на новый уровень производства.



Составлен автором по: Сельское хозяйство, охота и лесное хозяйство // Росстат. [электронный ресурс]. Режим доступа: URL: https://rosstat.gov.ru/enterprise_economy (дата обращения 10.08.2026).

Рис.3. Структура производства продукции в секторе КФХ РФ за 2000–2024 гг.

Анализ структуры производства сельскохозяйственной продукции (рис. 3). подтверждает высокий вклад КФХ в растениеводство, при чем ведущую роль играет производство зерна, на которое приходится более 60% производства продукции в КФХ.

Возрастающую долю в производстве продукции КФХ за рассматриваемый период имеют производство семян подсолнечника, овощей и мёда. Несмотря на рост абсолютных показателей снизилась доля производства картофеля, молока, яиц. Остальные направления производства являются в относительном измерении стабильными. Таким образом, структурная динамика позволяет выделить направления специализации КФХ и потенциал экономического развития данного сектора сельского хозяйства, определить механизмы поддержки и развития сектора КФХ в российской экономике.

Для КФХ характерен высокий уровень региональной дифференциации (таблица 1): по показателю количества хозяйств лидируют Южный, Северо-Кавказский и Приволжский ФО, по объему производимой сельскохозяйственной продукции и среднему объему продукции на одно КФХ – Южный, Приволжский и Центральный ФО, что является отражением ресурсной базы региона, климатических и географических условий, а также результатом развития традиционных для регионов видов сельскохозяйственного производства.

Таблица 1

Региональная характеристика КФХ в РФ, 2023 г.

Субъект РФ	Число КФХ, тыс. единиц	Продукция растениеводства, млрд руб.	Продукция животноводства, млрд руб.	Средний объем продукции на одно КФХ, млн руб.
Российская Федерация	121,2	1033,4	223,3	10,4
Центральный ФО	17,6	191,1	20,8	12,0
Северо-Западный ФО	4,4	12,1	6,1	4,2
Южный ФО	29,0	337,6	39,6	13,0
Северо-Кавказский ФО	21,2	81,3	51,1	6,2
Приволжский ФО	22,7	224,9	56,0	12,4
Уральский ФО	4,4	40,4	9,4	11,3
Сибирский ФО	14,1	106,7	26,5	9,5
Дальневосточный ФО	7,8	39,9	13,8	6,9

Составлена автором по: Сельское хозяйство, охота и лесное хозяйство // Росстат. [электронный ресурс]. Режим доступа: URL: https://rosstat.gov.ru/enterprise_economy (дата обращения 10.08.2026).

Проведенный статистический анализ позволил выявить несколько тенденций в развитии сектора КФХ РФ. Во-первых, отмечается растущий вклад КФХ в растениеводство, что определяет необходимость структуризации государственной политики в данном секторе АПК с учетом особенностей отраслевого рынка [5] по каждому типу сельскохозяйственной продукции растениеводства, развития цифровых платформ и маркетплейсов аграрного рынка [7], региональной инфраструктуры аграрного сектора с учетом специфики продукции и особенностей производства.

Во-вторых, вклад КФХ в развитие животноводства в целом можно рассматривать как незначительный, однако, анализ по структуре животноводческого производства, показывает высокую значимость КФХ в разведении маралов, овец и коз в отдельных регионах РФ, что обуславливает необходимость институционализации данных видов деятельности не только как малого предпринимательства, но и традиционных сельскохозяйственных промыслов народов России. В этом случае развитие

крестьянских (фермерских) хозяйств становится общественно значимым локализованным производством и основой развития агротуризма.

В-третьих, наблюдается высокий уровень региональной дифференциации КФХ, что определяет необходимость обеспечения пространственной связанности инфраструктуры и разработки специфических региональных мер поддержки и развития КФХ, определяемых климатическими и географическими условиями, с одной стороны, и необходимостью обеспечения технологичности АПК, с другой.

Таким образом, стабильная динамика сектора КФХ позволяет рассматривать его как устойчивую институциональную единицу аграрной системы, основанную на системе формальных институтов, однако не имеющее общественного (неформального) закрепления статуса института в системе хозяйственных отношений. При этом высокий уровень региональной и отраслевой дифференциации показывает отсутствие экосистемной модели развития сектора КФХ, что снижает качество развития данного сектора АПК.

Рассматривая предпринимательскую экосистему как «объединение на общей платформе собственных и/или партнерских сервисов компании с целью организации совместной деятельности по расширению рыночного предложения и повышению его качества» [1, с.265], в состав региональной экосистемы развития фермерства должны быть включены КФХ, станции технического обслуживания и внедрения новых агротехнологий, аргомаркетплейсы и доступ к ресурсным источникам сельского хозяйства (семена, удобрения и др.), сбытовые хабы и совместные перерабатывающие производства, включая сеть сбыта и розничной торговли. Фермерская экосистема должна быть направлена на кастомизацию предложения сельскохозяйственной продукции на основе специализации КФХ, а также на обеспечение специализированного спроса КФХ на основе совместных технологических платформ. Создание региональных фермерских экосистем будет способствовать повышению устойчивости развития сектора КФХ в экономике.

Заключение. Анализ секторов АПК является значимым элементом разработки государственной политики поддержки сельскохозяйственных производителей и развития сельского хозяйства. Крестьянское (фермерское) хозяйство является одним элементов конкурентного развития АПК и обеспечения продовольственной безопасности регионов, формирования разветвленной сети производства сельскохозяйственной продукции с учетом специфики потребления. В этой связи в данном исследовании проанализированы основные аспекты развития КФХ в российской экономике и выявлены ключевые тренды его развития, к которым отнесены:

развитие специализации КФХ на производстве продукции растениеводства, узкопрофильной специализации в животноводстве и высоком уровне региональной дифференциации, что согласуется с результатами кластерного анализа КФХ [14].

Полученные результаты лежат в основе формирования новых подходов к развитию и управления сектором КФХ на региональном и национальном уровнях, подтверждая тезис о необходимости разработки специфических институциональных, платформенных и цифровых решений развития АПК, например, в рамках национальных проектов, обеспечивая получателям данной поддержки «пакетных» решений по подключению к региональной инфраструктуре и включению цепочки добавленной стоимости. В перспективе более глубокий регионально-продуктовый и экосистемный анализ может способствовать формированию устойчивой культуры фермерства в РФ и системы его государственной поддержки.

Библиографический список

1. Агафонова И.В., Корнильцева Е.Г. Тенденции и факторы трансформации современного российского ритейл-ландшафта // Глобальный научный потенциал. – 2023. – № 12–1 (153). – С. 263-266. – EDN: QQKMVO.
2. Барлыбаев А.А. Социально-экономическая природа и типы фермерских хозяйств в России // Проблемы прогнозирования. – 2003. – № 3. – С. 74-82. – EDN: HRTQNH.
3. Ерпелев А.В. Основное содержание деятельности в крестьянских (фермерских) хозяйствах // Экономика и управление: проблемы, решения. – 2024. – Т. 10, № 10 (151). – С. 137-144. – DOI: 10.36871/ek.up.p.r.2024.10.10.017.
4. Колесник Н.Ф., Акашева В.В., Шибилева О.В. Развитие крестьянских (фермерских) хозяйств как фактор стабилизации и улучшения качества жизни сельского населения // Регионология. – 2021. – Т. 29, № 2. – С. 380-400. – DOI: 10.15507/2413-1407.115.029.202102.380-400.
5. Комарова О.В., Ярошевич Н.Ю. Анализ структуры рынка сельскохозяйственного машиностроения в контексте политики поддержки АПК // Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий. – 2023. – № 6. – С. 8-20. – DOI: 10.31442/0235-2494-2023-0-6-8-20.
6. Кузнецова Э.Г. Проблемы развития крестьянско-фермерских хозяйств // Oeconomia et Jus. – 2021. – № 3. – С. 19-25. – DOI: 10.47026/2499-9636-2021-3-19-25.
7. Куликова Е.С., Сулимин В.В., Шведов В.В. Цифровая трансформация агрорынка: факторы экономической устойчивости и роль маркетплейсов в развитии

АПК // Международный сельскохозяйственный журнал. – 2025. – Т. 68, № 5 (407). – С. 572-576. – DOI: 10.55186/25876740_2025_68_5_572.

8. Максимова Т.П. Теоретические аспекты формирования агропромышленных кластеров в экономике Российской Федерации // Вестник МГОУ. Серия: Экономика. – 2015. – № 3. – С. 16-23. – DOI: 10.18384/2310-6646-2015-3-16-23.

9. Малышев Н.Н., Карпенко Ю.А. Траектория развития крестьянских хозяйств в российском аграрном секторе: от институционализации к цифровизации // Экономические науки. – 2026. – № 1 (254). – С. 171-179. – DOI: 10.14451/1.254.171.

10. Митин А.Н. Современное состояние и перспективы развития крестьянских (фермерских) хозяйств в агропромышленном комплексе // Вестник евразийской науки. – 2025. – Т. 17, № S5. – 89. – EDN: XMFFTH.

11. Мичеева Е.А. О сельскохозяйственной деятельности крестьянских (фермерских) хозяйств в Республике Марий Эл // Актуальные проблемы экономики современной России. – 2015. – № 2-2. – С. 307-313. – EDN: VBFYML.

12. Муравьева М.В., Воротников И.Л., Ситалиев А.Ш. Проблемы и перспективы развития крестьянских (фермерских) хозяйств и сельских индивидуальных предпринимателей // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2023. – Т. 16, № 1 (76). – С. 243-257. – DOI: 10.53914/issn2071-2243_2023_1_243-257.

13. Нефедова Т.Г. Современное крестьянское хозяйство в сельско-городской среде // Крестьяноведение. – 2018. – Т. 3, № 1. – С. 117-140. – EDN: XMPJBZ.

14. Уколова А.В., Ульянов А.Е. Статистический анализ уровня развития крестьянских (фермерских) хозяйств по регионам России // Бухучет в сельском хозяйстве. – 2025. – Т. 22, № 2 (258). – С. 122-133. – DOI: 10.33920/sel-11-2502-04.

15. Халяпин А.А. Теория формирования предпринимательских структур в аграрном секторе экономики // Новые технологии. – 2012. – № 3. – С. 212-216. – EDN: PNQDBV.

Электронное научное издание

АГРОПРОДОВОЛЬСТВЕННАЯ ЭКОНОМИКА

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ
ЭЛЕКТРОННЫЙ ЖУРНАЛ

№8/2026

По вопросам и замечаниям к изданию, а также предложениям к сотрудничеству обращаться по
электронной почте mail@scipro.ru

Подготовлено с авторских оригиналов

ISSN 2412-2521

Усл. печ. л. 5,6

Объем издания 5,6 МВ

Издание: Международный научно-практический электронный журнал Агропродовольственная экономика
(Agro production and economics journal)

Учредитель, главный редактор: Краснова Н.А.

Издательство Индивидуальный предприниматель Краснова Наталья Александровна

Адрес редакции: Россия, 603186, г. Нижний Новгород, ул. Ломоносова 9, офис 309, Тел.: +79625087402

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и
массовых коммуникаций (Роскомнадзор) за номером ЭЛ № ФС 77 — 67047