

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-2-2574>
<https://elibrary.ru/XXRHIN>

Обзорная статья
<https://fptt.ru>

Применение метода изотопной масс-спектрометрии для идентификации мясной продукции



А. Б. Лисицын¹, И. М. Чернуха¹, Л. А. Оганесянц²,
А. Л. Панасюк², Д. А. Свиридов^{2,*}, М. Ю. Ганин²

¹ Федеральный научный центр пищевых систем имени В. М. Горбатова, Москва, Россия

² Всероссийский научно-исследовательский институт пивоваренной, безалкогольной и винодельческой промышленности, Москва, Россия

Поступила в редакцию: 23.01.2025

Принята после рецензирования: 28.03.2025

Принята к публикации: 01.04.2025

*Д. А. Свиридов: labvin@yandex.ru,

<https://orcid.org/0000-0002-5595-0455>

А. Б. Лисицын: <https://orcid.org/0000-0002-4079-6950>

И. М. Чернуха: <https://orcid.org/0000-0003-4298-0927>

Л. А. Оганесянц: <https://orcid.org/0000-0001-8195-4292>

А. Л. Панасюк: <https://orcid.org/0000-0002-5502-7951>

М. Ю. Ганин: <https://orcid.org/0000-0003-0518-1181>

© А. Б. Лисицын, И. М. Чернуха, Л. А. Оганесянц, А. Л. Панасюк,
Д. А. Свиридов, М. Ю. Ганин, 2025



Аннотация.

Мясо и продукты его переработки пользуются высоким потребительским спросом и входят в продуктовую корзину большей части населения. Поэтому разработка способов идентификации мясной продукции вызывает интерес исследователей во многих странах. Изотопная масс-спектрометрия – один из надежных методов идентификации пищевой продукции. Цель исследования – поиск и анализ научной литературы, посвященной применению изотопной масс-спектрометрии для выявления состава мяса и идентификации региона его происхождения, способам пробоподготовки для проведения изотопного анализа.

Объектами исследования являлись российские и зарубежные научные публикации, поиск и анализ которых проводили с использованием методик Н. Snyder и R. G. Toracco. Поиск информации осуществляли по базам данных и системам цитирования РИНЦ, Google Scholar, ScienceDirect, MDPI, Springer Link, PubMed и Web of Science. Отобраны и проанализированы доступные обзорные и оригинальные статьи по исследуемой тематике на английском и русском языках преимущественно за период 2010–2023 гг. Включено несколько статей более раннего периода, ввиду их высокой научной значимости.

Анализ научной литературы позволил описать факторы, влияющие на соотношение стабильных изотопов в составе мяса и мясных продуктов, и привести основные методы идентификации. В ряде случаев традиционно используемых методов анализа может быть недостаточно для достоверного определения подлинности мясной продукции и прослеживаемости отдельных ингредиентов. Метод изотопной масс-спектрометрии эффективно классифицирует мясные образцы по рациону кормления животных, особенно при значительных различиях в изотопных характеристиках кормов. Это крайне актуально для специализированного питания, где происхождение животных имеет критическое значение. Метод позволяет идентифицировать органическую мясную продукцию, используя показатели $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{15}\text{N}$ для подтверждения ее подлинности. Кроме того, изотопные характеристики помогают определить географическое происхождение мяса, что способствует борьбе с недобросовестными производителями. Рассмотренный в работе способ пробоподготовки образцов мяса сокращает время подготовки на 30 ч по сравнению с традиционными методами и не требует специализированного оборудования.

Большинство исследователей отмечают метод изотопной масс-спектрометрии как надежный инструмент в рамках оценки подлинности мяса и продуктов его переработки. Значения изотопных соотношений водорода ($^2\text{H}/^1\text{H}$), углерода ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$), кислорода ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$), азота ($^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$) и серы ($^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$) структурных компонентов в составе мясной продукции в значительной степени зависят от рациона кормления животных, вида удобрений, используемых при производстве кормов, а также от географических условий региона. Значения указанных показателей формируют уникальную изотопную подпись, которая может дать важную информацию о природе происхождения продукции.

Ключевые слова. Мясо, идентификация, изотопная масс-спектрометрия, органическая продукция, прослеживаемость, географическое место происхождения

Финансирование. Работа выполнена за счет гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на проведение крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технологического развития (Соглашение № 075-15-2024-483 от 24.04.2024).

Для цитирования: Лисицын А. Б., Чернуха И. М., Оганесянц Л. А., Панасюк А. Л., Свиридов Д. А. и др. Применение метода изотопной масс-спектрометрии для идентификации мясной продукции. Техника и технология пищевых производств. 2025. Т. 55. № 2. С. 381–389. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-2-2574>

Isotope Mass Spectrometry in Meat Identification



Andrey B. Lisitsyn¹, Irina M. Chernukha¹,
Lev A. Oganesyants², Alexander L. Panasyuk²,
Dmitriy A. Sviridov^{2,*}, Mikhail Yu. Ganin²

¹ V.M. Gorbатов Federal Research Center for Food Systems, Moscow, Russia

² All-Russian Scientific Research Institute of Brewing, Soft Drinks, and Wine Industry^{ROR}, Moscow, Russia

Received: 23.01.2025
Revised: 28.03.2025
Accepted: 01.04.2025

*Dmitriy A. Sviridov: labvin@yandex.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-5595-0455>

Andrey B. Lisitsyn: <https://orcid.org/0000-0002-4079-6950>
Irina M. Chernukha: <https://orcid.org/0000-0003-4298-0927>
Lev A. Oganesyants: <https://orcid.org/0000-0001-8195-4292>
Alexander L. Panasyuk: <https://orcid.org/0000-0002-5502-7951>
Mikhail Yu. Ganin: <https://orcid.org/0000-0003-0518-1181>

© A.B. Lisitsyn, I.M. Chernukha, L.A. Oganesyants, A.L. Panasyuk,
D.A. Sviridov, M.Yu. Ganin, 2025



Abstract.

Meat and meat products are consumed by a large proportion of the population. As a result, food scientists keep inventing new methods for meat identification, e.g., isotope mass spectrometry. This reliable method also makes it possible to identify the composition of meat and its geographic origin. This article offers a comprehensive review of scientific literature on isotope mass spectrometry and sampling methods.

The review covered Russian and English-language scientific publications registered in RSCI, Google Scholar, ScienceDirect, MDPI, Springer Link, PubMed, and Web of Science in 2010–2023, with occasional older articles. The search and analysis relied on the methods developed by H. Snyder and R. G. Toracco.

The review revealed the factors that define the ratio of stable isotopes in the composition of meat and meat products, as well as the main methods of their identification. When standard approaches fail to trace the ingredients, the method of isotope mass spectrometry classifies meat samples by the animal diet because different feeds have different isotopic profiles. The meat origin information is especially crucial for consumers that have to maintain a specialized diet. The method identifies organic meat products by $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ and uses isotopic characteristics to determine the geographic origin of meat, thus preventing mislabeling. The review also revealed the most efficient and least time-consuming method of sample processing that saves up to 30 h.

Isotope mass spectrometry ensures the quality and safety of meat products by defining the authenticity and origin of meat even in complex meat foods. In meat products, the isotope ratios of hydrogen ($^2\text{H}/^1\text{H}$), carbon ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$), oxygen ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$), nitrogen ($^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$), and sulfur ($^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$) depend on the diet, fertilizers, and climate. These indicators form a unique isotopic signature that provides important information about the nature and origin of meat.

Keywords. Meat, identification, isotope mass spectrometry, organic products, traceability, geographical origin

Funding. The research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, grant for major scientific projects in priority areas of scientific and technological development (Agreement No. 075-15-2024-483, April 24, 2024).

For citation: Lisitsyn AB, Chernukha IM, Oganesyants LA, Panasyuk AL, Sviridov DA, et al. Isotope Mass Spectrometry in Meat Identification. Food Processing: Techniques and Technology. 2025;55(2):381–389. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-2-2574>

Введение

В прошлом продукты питания были тесно связаны с регионом их производства: они создавались из местного сырья по традиционным технологиям и рецептам, продавались на местном рынке. Сегодня, в условиях глобализации рынка, пищевая отрасль столкнулась с кризисом доверия. Потребители хотят

быть уверены в безопасности, качестве и экологичности приобретаемых товаров. Мясная промышленность занимает существенную долю на продовольственном рынке, при этом вопрос идентификации и прослеживаемости, включая регион происхождения мяса и продуктов его переработки, остро стоит во многих странах [1–3].

Основные способы идентификации мясной продукции основаны на применении хроматографического анализа (высокоэффективная жидкостная хроматография, газовая хроматография) или хромато-масс-спектрометрии. Также при идентификации мяса и продуктов его переработки часто используются визуальная и органолептическая оценка, анализ ДНК, гистологические, спектрофотометрические и другие исследования. Однако в ряде случаев для достоверного определения подлинности продукции указанных методов может быть недостаточно. Для получения информации о природе и месте происхождения сырья и производимых из него продуктов наиболее часто прибегают к изотопной масс-спектрометрии. Определение отношений стабильных изотопов биофильных элементов получило широкое распространение во всем мире. Данный метод применяется при идентификации сырья и готовой продукции в винодельческой, молочной, мясной промышленности, а также меда, растительных масел и других продуктов [4, 5].

Особенности распределения стабильных изотопов биофильных элементов в пищевой продукции связаны с процессами фракционирования, то есть с изменением соотношения легких и тяжелых изотопов в ходе биологических и геохимических процессов [6–9]. Благодаря ботаническим особенностям различных сельскохозяйственных культур, значения изотопных характеристик легких элементов (углерод, азот, сера, кислород, водород) составляют уникальную композицию, которую называют изотопной подписью или изотопной сигнатурой. Изотопная подпись содержит информацию о происхождении исследуемого продукта, в том числе географическом. Этот метод незаменим при невозможности проведения идентификации продукта с использованием физико-химических характеристик [10]. Кроме того, географическое место происхождения сырья может иметь критическую важность при производстве продуктов детского питания или продуктов, изготавливаемых из растительного и животного сырья конкретных регионов (например, хамон, вырабатываемый только из иберийских свиней, выращиваемых в определенных областях Испании).

Цель исследования – поиск и анализ научной литературы, посвященной использованию изотопной масс-спектрометрии для выявления состава и идентификации региона происхождения мяса, а также способам его пробоподготовки для проведения изотопного анализа.

Объекты и методы исследования

Обзор научных статей по рассматриваемой тематике и их отбор для включения в статью был выполнен согласно методикам Н. Snyder [11] и R. G. Торассо [12], описывающих последовательность отбора публикаций, их критического анализа и подведения итогов.

Объекты исследования – данные, опубликованные в различных научных статьях, касающиеся использования изотопной масс-спектрометрии и направленные

на идентификацию мяса и продуктов его переработки. Поиск источников проводили преимущественно за период 2010–2023 гг. по следующим ключевым словам: мясо, мясные продукты, методы анализа, идентификация, фальсификация, изотопная масс-спектрометрия, стабильные изотопы, изотопное фракционирование, meat, meat products, identification, authentication, IRMS, stable isotope, analysis. Также было включено несколько статей более раннего периода, ввиду их высокой научной значимости.

С целью расширения области поиска в отобранных статьях изучали библиографические списки. Анализировали оригинальные и обзорные статьи на русском и английском языках, опубликованные в научных журналах, входящих в системы цитирования РИНЦ, Google Scholar, ScienceDirect, MDPI, Springer Link, PubMed и Web of Science. Критериями включения являлись год публикации, система цитирования, количество цитирований и просмотров (не менее 20) и др. Критерии исключения: недостаточное количество информации и данных по исследуемому вопросу, общий низкий уровень проведения исследования.

Результаты и их обсуждение

Влияние кормовой базы на значение изотопных характеристик элементов в составе мяса. Значение изотопных отношений углерода ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) в мясных продуктах напрямую зависит от типа фотосинтеза растений, которые составляют рацион кормления животных. Различают С3- и С4-пути фиксации атмосферного диоксида углерода и САМ-метаболизм.

С3-путь фотосинтеза протекает по циклу Кальвина, который включает в себя такие процессы, как карбоксилирование, восстановление и регенерация акцептора CO_2 . С3-путь фиксации атмосферного диоксида углерода является основным для высших растений и составляет около 95 % растительной биомассы Земли. Такой тип фотосинтеза обуславливает диапазон значений изотопных характеристик углерода структурных компонентов растений (от –23 до –30 ‰). Типичными представителями С3-растений среди кормовых культур являются рожь, овес, пшеница, луговая растительность (разнотравье) [13].

С4-путь фотосинтеза протекает по циклу Хетча и Слэка, в котором первичными продуктами фиксации диоксида углерода и восстановления являются такие соединения, как яблочная и аспарагиновая кислоты. Диапазон значений изотопных характеристик углерода структурных компонентов растений с С4-типом фотосинтеза составляет от –8 до –16 ‰. К ярким представителям С4-растений относятся кукуруза, просо, сорго, сахарный тростник [14].

САМ-фотосинтез или метаболизм углерода по типу толстянковых – метаболический путь связывания углерода, позволяющий растению фиксировать и запасать углекислый газ в форме щавелевоуксусной кислоты в течение ночи, а затем использовать его для синтеза

трехуглеродного сахара в течение дня. Существует около 20000 биологических видов растений с таким типом фотосинтеза. Подавляющее большинство из них относится к покрытосемянным. Данные о наличии распространенных кормовых культур с таким типом фотосинтеза на сегодняшний день отсутствуют. Диапазон значений изотопных характеристик углерода структурных компонентов растений с САМ-типом фотосинтеза составляет от -10 до -20 ‰.

Значения изотопного состава углерода структурных компонентов тканей животного содержат информацию, позволяющую получить комплексную характеристику рациона кормления за период, предшествующий забое. На протяжении жизни животного рацион кормления может меняться. При анализе мышечной ткани кратковременные изменения в рационе могут остаться незамеченными. В этом случае эффективный подход заключается в использовании дополнительных образцов тканей, таких как шерсть и копыта, которые при формировании фиксируют изотопную подпись, связанную с рационом кормления животного в данный момент времени [15]. Эти ткани метаболически инертны и остаются неизменными, сохраняя соотношение изотопов. Соответственно, изменение в рационе повлечет смещение значений изотопных отношений в новой ткани шерсти и копыт [16].

Азотосодержащие и серосодержащие соединения животное получает также из корма. Соответственно, соотношение изотопов $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ и $^{34}\text{S}/^{33}\text{S}$ в структурных компонентах тканей животных тесно связано с рационом кормления. В процессе метаболизма высших растений различия показателя $\delta^{34}\text{S}$ могут варьироваться за счет фракционирования изотопов серы в пределах 3–6 ‰. Сульфаты поглощаются корнями растений из почвы и транспортируются в хлоропласты, где сера восстанавливается до сульфида с помощью серии ферментативных реакций. Усвоение серы у животных происходит в процессе питания: сера входит в состав таких аминокислот, как цистеин и метионин, которые используются для построения белков и других соединений. Значения $\delta^{34}\text{S}$ в мясе травоядных животных, в зависимости от рациона, имеют трофические сдвиги на величину около 1,5 ‰ [17, 18].

В исследовании [19] изучено изменение соотношения изотопов углерода и азота в тканях лабораторных мышечных при внесении в диету различных белковых продуктов. Значения $\delta^{13}\text{C}$ менялись в зависимости от типа тканей животного и изменения рациона. Различия значений $\delta^{15}\text{N}$ между разными типами тканей уменьшались по мере увеличения потребления белка с кормом. Renou *et al.* [20] удалось выявить образцы мяса бычков, при кормлении которых был использован кукурузный силос, с точностью 94 %. Pianezze *et al.* [21] провели анализ диапазонов изменения значений изотопных характеристик $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, $^{34}\text{S}/^{33}\text{S}$, $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, $^2\text{H}/^1\text{H}$ в зависимости от рациона кормления ягнят. Из них наиболее информативным

показателем являлись изотопные характеристики углерода. Также были изучены изотопные характеристики углерода, азота, кислорода и водорода отдельно у обезжиренных высушенных мышечных волокон и жировой фракции мяса ягнят, выращенных в семи регионах Италии с использованием различных рационов кормления (фураж, концентрат, молоко). В среднем значения изотопных характеристик углерода и водорода жира были ниже, чем в мышечных волокнах, однако эти различия были непостоянными и зависели от породы ягнят [22].

В результате показана возможность проведения классификации образцов мяса в зависимости от рациона кормления животных с использованием метода изотопной масс-спектрометрии. При этом точность классификации становилась выше, когда увеличивались различия в числовых значениях изотопных характеристик элементов в составе кормов. Возможность прослеживания сырья особенно важна при производстве специализированного питания, когда происхождение животного может иметь критическую значимость.

Идентификация продукции органического животноводства. Все больше производителей пищевых продуктов ориентируются на органическое производство, продукция которого должна быть качественной, безопасной, натуральной и аутентичной. Органическое животноводство имеет широкое распространение в развитых странах и считается способом производства продукции высокого качества, который удовлетворяет особым экологическим требованиям и является гуманным по отношению к животным и природе.

Согласно распоряжению правительства РФ от 4 июля 2023 г. № 1788-р в Российской Федерации была утверждена Стратегия развития производства органической продукции до 2030 г., которая предполагает пятикратный рост выпуска мясной продукции такого типа и почти 17-кратный – молока. В связи с этим встает вопрос о способах идентификации сырья и продуктов органического производства.

Растительные корма, полученные в условиях органического земледелия, состоят преимущественно из С3-типа растений. В промышленном или традиционном животноводстве также могут быть использованы корма, силосы и добавки с использованием С4-типа растений (как правило, кукуруза). Таким образом, изотопные характеристики $\delta^{13}\text{C}$ структурных компонентов органической мясной продукции будут смещены в сторону более легких значений, по сравнению с продукцией промышленного животноводства [23]. Помимо этого, важным элементом в рамках органического производства мяса является отказ от использования удобрений синтетического происхождения. Один из самых популярных и востребованных видов удобрений – азотистый. Наиболее распространенными азотосодержащими удобрениями в промышленном земледелии являются селитра (натриевая, калиевая, кальциевая, аммонийная, аммиачная), аммофос,

диаммофос, мочевины, карбонат, сульфат, сульфид аммония и хлористый аммоний. Использование азотосодержащих синтетических удобрений изменяет изотопный состав азота в почве. Синтетические удобрения характеризуются большим содержанием легкого изотопа ^{15}N , что отражается на значениях изотопных характеристик азота структурных компонентов растений. Соответственно, при использовании таких культур в качестве корма для животных показатель $\delta^{15}\text{N}$ будет выступать в качестве изотопной метки в компонентах мяса [24].

Zhao *et al.* [25] изучили соотношения изотопов углерода и азота в свинине органического и традиционного производства. Значения показателей $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{15}\text{N}$ структурных компонентов органических тканей, включая шерсть, кровь и обезжиренное мясо, значительно различались в зависимости от условий содержания животных. Дискриминантный анализ полученных данных позволил провести классификацию образцов с точностью 100 %. В другом исследовании для китайских ученых представляли интерес изотопные характеристики углерода и азота в составе мышечных волокон свинины промышленного и органического производства из четырех городов Китая (Чэндэ, Аньцин, Чифэн и Чанчунь). Диапазон значений $\delta^{13}\text{C}$ для образцов промышленной свинины составил от $-18,4$ до $-15,1$ ‰, для органической – от $-17,2$ до $-14,7$ ‰. При этом значения изотопных характеристики азота в структурных компонентах органической свинины оказались выше, чем в промышленной свинине из того же региона, что было объяснено различием в рационе кормления животных [26].

Рассмотрены сезонные изменения в значениях изотопных характеристик углерода, азота и серы структурных компонентов органической и традиционной ирландской говядины. 242 образца говядины (127 – органическая, 115 – традиционная) отбирались в течение года. Изменения уровня $\delta^{13}\text{C}$ в традиционной говядине были выражены сезонным положительным сдвигом более 2 ‰ в период с декабря по июнь, а в органической говядине были менее иррегулярными. Колебание значений $\delta^{15}\text{N}$ в большей степени наблюдалось в образцах органической говядины. Значения $\delta^{34}\text{S}$ в обеих выборках демонстрировали сложную нелинейную закономерность [27]. Исследователи из Бразилии изучили показатели отношений стабильных изотопов легких элементов $\delta^2\text{H}$, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^{34}\text{S}$ структурных компонентов тканей и экскрементов местных домашних животных, чтобы классифицировать органический и традиционный способы животноводства. Приведенные показатели в данном случае оказались ненадежным критерием при идентификации органического мяса [28].

Метод изотопной масс-спектрометрии может быть применен при оценке подлинности мясной органической продукции, что особенно важно ввиду ее более высокой стоимости по сравнению с промышленной.

Показатели $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{15}\text{N}$ являются наиболее информативными с точки зрения прослеживаемости рациона кормления животных.

Идентификация географического происхождения мясного сырья. К продуктам с контролируемым местом происхождения предъявляются более строгие требования, что обеспечивает их высокое качество и аутентичность. Тем не менее существует риск подмены таких продуктов или сырья на аналоги из других регионов. В современном мире проблема идентификации продуктов питания становится все более актуальной из-за необходимости обеспечения безопасности и качества продукции, борьбы с фальсификацией и контрафактом. Чтобы защитить производителей от недобросовестной конкуренции, проводится множество исследований, изучающих возможность подтверждения географического места происхождения продуктов питания.

При стабильном подходе к обеспечению кормовой базы животных показатели $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ могут выступать в качестве критериев для выявления продукции с конкретных хозяйств. Показатели изотопных характеристик кислорода ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) и водорода ($^2\text{H}/^1\text{H}$) зависят от процессов фракционирования при формировании их значений в метеорных и грунтовых водах. В пределах одной географической зоны вся растительность питается одинаковыми в изотопном отношении природными водами. Следовательно, изотопные характеристики структурных компонентов растений в значительной степени определяются уникальными геоклиматическими факторами отдельно взятого региона. Соотношения изотопов кислорода и водорода в структурных компонентах тканей животных могут зависеть от пропорций в рационе свежих и сухих кормов, а также изменяться в ходе метаболических процессов, например, потоотделения [29].

С целью установления географического места происхождения крупного рогатого скота и мясных продуктов в исследованиях чаще всего используется анализ значений отношений стабильных изотопов углерода, водорода и азота. Как указано ранее, элементы с характерным данному региону изотопным составом аккумулируются в тканях растений и, как следствие, животных, которые потребляют их в пищу [27, 30–34]. Однако установление подлинности места географического происхождения мясных продуктов методом изотопной масс-спектрометрии может осложниться рядом факторов. Например, в течение жизни сельскохозяйственные животные иногда содержатся на разных фермах и потребляют корма различного происхождения. Также в отдельных случаях изотопный состав биофильных элементов тканей животных имеет сезонные колебания [35].

Для изучения особенностей отношений стабильных изотопов углерода и азота в мясе в Южной Корее было проведено масштабное исследование 599 образцов свинины различного происхождения из 14 стран:

335 образцов из Южной Кореи, 264 – из Южной и Северной Америки (Канада, США, Мексика, Чили), 9 – из европейских стран (Австрия, Голландия, Дания, Франция, Бельгия, Финляндия, Польша, Венгрия, Испания). Изучили соотношение стабильных изотопов $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ и $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ в белках обезжиренного сухого остатка свинины. В результате авторам удалось достоверно классифицировать образцы мяса по месту их происхождения из трех регионов: Южной Кореи, Америки и Европы. В том числе исследователи выделили близкие по значению результаты $\delta^{13}\text{C}$ США и Мексики $-14,78$ и $-14,81$ ‰, Голландии и Дании – $25,57$ и $-25,24$ ‰ соответственно, что объясняется их географической близостью [36].

Nie *et al.* [37] провели исследование отношений стабильных изотопов $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{15}\text{N}$ и $\delta^{34}\text{S}$ мяса яка из разных районов Цинхай-Тибетского нагорья (Китай), чтобы выявить показатели, которые могли бы подтвердить географическое происхождение мясной продукции. Данные были проанализированы с использованием метода PLS-DA. Значения $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ существенно различались для образцов в зависимости от места их происхождения. В значениях $\delta^{15}\text{N}$ и $\delta^{34}\text{S}$ не было выявлено существенных изменений в разных регионах. В исследовании [38] изучили 167 образцов волос крупного рогатого скота из четырех регионов Китая, производящих говядину. С использованием анализа значений отношений изотопов $^2\text{H}/^1\text{H}$, $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$, $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ удалось точно идентифицировать 82,6 % образцов в зависимости от региона происхождения. На основании аналогичных показателей Erasmus *et al.* удалось точно идентифицировать 97,6 % образцов баранины Кару (Karoo Lamb) из региона Кару (юг Африки). Животные питались характерными региону душистыми растениями [39]. В исследовании [40], направленном на установление географического места происхождения мясной продукции, были проанализированы 120 образцов баранины, произведенной в различных регионах Великобритании, Испании, Франции, Греции, Исландии и Италии. Полученные значения отношений изотопов $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$, $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ обрабатывали с помощью дискриминантного анализа. Из рассмотренных образцов точно удалось идентифицировать 79,2 %.

Показана целесообразность изучения значений изотопных характеристик кислорода ($\delta^{18}\text{O}$) водной компоненты мяса в рамках определения его географической принадлежности [41, 42]. Однако исследование швейцарских ученых на примере образцов из Бразилии, Швейцарии, Германии, Франции и Венгрии показало, что различные методы обработки мяса существенно затрудняют его распознавание по этому показателю [43]. Horasek *et al.* выявили изменения значений $\delta^{18}\text{O}$ водной компоненты мяса в процессе его хранения. Максимальный сдвиг значений при хранении мяса в холодильных камерах составил 0,8 ‰. При этом заморозка и жарка мяса приводила к более сильным колебаниям изотопных характеристик

кислорода его водной компоненты [44]. Для классификации мясной продукции по месту его географического происхождения с высокой степенью достоверности результатов ряд исследователей рекомендует комплексный подход с использованием значений изотопных характеристик, элементного профиля и статистических методов анализа [41, 45]. Необходимо учитывать сезонные колебания значений исследуемых показателей [42].

Изучение изотопных характеристик элементов может помочь определить происхождение мяса, произведенного как за границей, так и в регионах России [34]. Для практического применения этого метода необходимо создать базу данных изотопных отношений элементов в составе различных видов сельскохозяйственного сырья и местной воды. Этот способ идентификации мясной продукции способствует борьбе с недобросовестными производителями и снизит риск попадания опасных веществ в цепочку поставок продуктов питания.

Особенности пробоподготовки мяса при проведении анализа отношений стабильных изотопов.

При исследовании мяса и продуктов его переработки особого внимания заслуживает подготовка проб. Эта процедура требует адаптации для определения изотопных отношений с учетом специфики сырья. Методы пробоподготовки образцов мяса в разных работах отличаются. Навеска образца в различных исследованиях варьируется от 5 до 50 г [46]. Другим важным показателем является время сушки образца, которое зависит от способа сушки и массы навески. Процесс сушки необходим при проведении анализа отношений кислорода и водорода в образце, т. к. значения указанных показателей водной компоненты будут влиять на полученные результаты. Исходя из данных [47–49], наиболее распространенными видами сушки являются сублимационная и сушка в термостате. Продолжительность сушки варьируется от 24 до 48 ч.

Zhao *et al.* [50] разработали инновационный метод подготовки образцов мяса для определения отношений стабильных изотопов с использованием метода изотопной масс-спектрометрии. Из образца мяса весом 100–200 г отбирали по 1 г пробы из верхнего, среднего и нижнего слоев каждой точки отбора (в четырех углах и середине образца). Общий вес образца составил 15 г. Образцы высушивали при температуре 50 °C примерно 25 ч до постоянной массы. Затем образцы мяса измельчали в шаровой мельнице. К образцу в центрифужной пробирке добавляли смесь хлороформа и метанола (2:1, по объему) в соотношении 1:5 (образец:раствор). Образцы перемешивали в вихревом смесителе 10 мин, центрифугировали при 5000 об/мин в течение 5 мин, удаляли надосадочную жидкость. Промывку растворителем повторяли дважды. Обезжиренное мясо помещали в сушильную камеру при температуре 50 °C на 12 ч. После повторного измельчения в шаровой мельнице отбирали навеску

для изотопного анализа. Zhao *et al.* утверждают, что указанный способ подготовки образцов занимает по времени на 30 ч меньше, чем ряд общепринятых методов. Кроме того, он не требует специализированного экстракционного оборудования, такого как аппарат Сокслета, которое часто используется в аналогичных способах пробоподготовки [51–53].

Выводы

Результаты многочисленных исследований в странах с развитым животноводством свидетельствуют о важности изучения изотопных отношений углерода, азота, кислорода, водорода, и серы структурных компонентов мяса и мясной продукции с использованием метода изотопной масс-спектрометрии. Значения показателя $\delta^{13}\text{C}$ в наибольшей степени зависят от типа фотосинтеза кормовых растений, $\delta^{15}\text{N}$ – от вида удобрений, используемых при выращивании кормов. Показатели $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ определяются геохимическими факторами региона, а $\delta^{34}\text{S}$ – почвенными условиями и физиологическими особенностями кормовых растений и непосредственно животных.

Важным этапом в определении отношений стабильных изотопов является процедура пробоподготовки, обуславливающая правильность получаемых результатов. Рассмотренные в работе исследования описывают тесную взаимосвязь между кормовой базой животного и значениями изотопных характеристик элементов в составе тканей разных типов. Подтверждена

возможность идентификации кормового рациона или региона происхождения убойного животного с высокой степенью сходимости (свыше 80 %) при помощи изотопной подписи. Метод изотопной масс-спектрометрии может стать надежным инструментом прослеживаемости мясного сырья на различных этапах производства продукции. Прослеживаемость маркерного кормового компонента (например, кукурузы) в трофической цепи, а также показателей, позволяющих получить информацию о способе выращивания кормовых растений и климатических условиях региона производства, играет важную роль, особенно при органическом животноводстве.

Критерии авторства

Авторы в равной степени принимали участие в исследовании, написании и оформлении рукописи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

The authors are equally responsible for the research and manuscript.

Conflict of interest

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

Список литературы / References

1. Лаврухина О. И. Современные методы выявления фальсификации мяса и мясной продукции (аналитический обзор). Труды федерального центра охраны здоровья животных. 2017. Т. 15. С. 153–170. [Lavrushina OI. Up-to-date methods for adulteration detection in meat and meat products (Analytical report). Proceedings of the Federal Center for Animal Health Protection. 2017;15:153–170. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/XRDRSP>
2. Юрчак З. А., Маслова Н. В., Старчикова Д. Обзор фальсификации мяса пищевыми добавками. Все о мясе. 2016. № 5. С. 14–17. [Yurchak ZA, Maslova NV, Starchikova D. The overview falsification meat with food additives. Vsyо o myase. 2016;(5):14–17. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/WWYILR>
3. Семенова А. А. Пищевые добавки в мясной промышленности. Реальность и вымыслы. Контроль качества продукции. 2015. № 7. С. 54–56. [Semenova AA. Food additives in the meat industry: Reality and fiction. Product Quality Control. 2015;(7):54–56. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/TXPVUB>
4. Truonghuynh HT, Li GB, Jaganathan GK. Isotope analysis as a means of tracing aquatic products authenticity, source and geographic origins. Italian Journal of Food Science. 2020;32(3):517–527. <https://doi.org/10.14674/IJFS-1778>
5. Chernukha I, Yurchak Z, Kuzmina E. Study on the meat isotopick composition for origin identification. Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences. 2018;12(1):262–266. <https://doi.org/10.5219/906>
6. Горбунова Н. А. Возможности использования стабильных изотопов для идентификации географического происхождения мяса и мясных продуктов. Обзор. Теория и практика переработки мяса. 2018. Т. 3. № 1. С. 46–58. [Gorbunova NA. Possibilities of using stable isotopes for identification of geographical origin of meat and meat products. A review. Theory and practice of meat processing. 2018;3(1):46–58. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21323/2414-438X-2018-3-1-46-58>
7. Huang J, Norgbey E, Nkrumah PN, Opoku PA, Apreku TO. Detection of corn oil in adulterated olive and soybean oil by carbon stable isotope analysis. Journal of Consumer Protection and Food Safety. 2017;12:201–208. <https://doi.org/10.1007/s00003-017-1097-x>
8. Paolini M, Bontempo L, Camin F. Compound-specific $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^2\text{H}$ analysis of olive oil fatty acids. Talanta. 2017; 174:38–43. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2017.05.080>
9. Ehtesham E, Camin F, Bontempo L, Frew RD. Stable isotope measurements and modeling to verify the authenticity of dairy products. In: Camin F, Bontempo L, editors. Food Forensics. FL: CRC Press; 2017, ch. 10. <https://doi.org/10.1201/9781315151649>

10. da Silva DAF, Biscola NP, dos Santos LD, Sartori MMP, et al. Detecting animal by-product intake using stable isotope ratio mass spectrometry (IRMS). *The Veterinary Journal*. 2016;217:119–125. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2016.10.002>
11. Snyder H. Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*. 2019;104:333–339. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039>
12. Torraco RJ. Writing integrative reviews of the literature: Methods and purposes. *International Journal of Adult Vocational Education and Technology*. 2016;7(3):62–70. <https://doi.org/10.4018/IJAVET.2016070106>
13. Neupane A, Lazicki P, Mayes MA, Lee J, Jagadamma S. The use of stable carbon isotopes to decipher global change effects on soil organic carbon: Present status, limitations, and future prospects. *Biogeochemistry* 2022;160:315–354. <https://doi.org/10.1007/s10533-022-00963-3>
14. Оганесянц Л. А., Панасюк А. Л., Кузьмина Е. И., Ганин М. Ю. Исследование отношений изотопов углерода, кислорода и водорода этанола фруктовых вин. Техника и технология пищевых производств. 2020. Т. 50. № 4. С. 717–725. [Oganesyants LA, Panasyuk AL, Kuzmina EI, Ganin MYu. Isotopes of carbon, oxygen, and hydrogen ethanol in fruit wines. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2020;50(4):717–725. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-4-717-725>
15. Vinci G, Preti R, Tieri A, Vieri S. Authenticity and quality of animal origin food investigated by stable-isotope ratio analysis. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2013;93(3):439–448. <https://doi.org/10.1002/jsfa.5970>
16. Соловьев А. И., Подколзин И. В., Амелин В. Г., Никешина Т. Б. Аутентификация пищевых продуктов животного происхождения. Труды Федерального центра охраны здоровья животных. 2015. Т. 13. С. 215–234. [Solovyev AI, Podkolzin IV, Amelin VG, Nikeshina TB. Authentication of food animal products. *Proceedings of the Federal Center for Animal Health Protection*. 2015;13:215–234. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/UNXADP>
17. Tanz N, Schmidt H-L. $\delta^{34}\text{S}$ -value measurements in food origin assignments and sulfur isotope fractionations in plants and animals. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2010;58(5):3139–3146. <https://doi.org/10.1021/jf903251k>
18. Krivachy N, Rossmann A, Schmidt H-L. Potentials and caveats with oxygen and sulfur stable isotope analyses in authenticity and origin checks of food and food commodities. *Food Control*. 2015;48:143–150. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2014.06.002>
19. Kurle CM, Koch PL, Tershy BR, Croll DA. The effects of sex, tissue type, and dietary components on stable isotope discrimination factors ($\Delta^{13}\text{C}$ and $\Delta^{15}\text{N}$) in mammalian omnivores. *Isotopes in Environmental and Health Studies*. 2014;50(3):307–321. <https://doi.org/10.1080/10256016.2014.908872>
20. Renou J-P, Bielicki G, Deponge C, Gachon P, Micol D, et al. Characterization of animal products according to geographic origin and feeding diet using nuclear magnetic resonance and isotope ratio mass spectrometry. Part II: Beef meat. *Food Chemistry*. 2004;86(2):251–256. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2003.08.021>
21. Pianezze S, Camin F, Perini M, Corazzin M, Piasentier E. Tracing lamb meat with stable isotope ratio analysis: A review. *Small Ruminant Research*. 2021;203:106482. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2021.106482>
22. Perini M, Camin F, Bontempo L, Rossmann A, Piasentier E. Multielement (H, C, N, O, S) stable isotope characteristics of lamb meat from different Italian regions. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*. 2009;23(16):2573–2585. <https://doi.org/10.1002/rcm.4140>
23. Bontempo L, Perini M, Pianezze S, Horacek M, Roßmann A, et al. Characterization of beef coming from different European countries through stable isotope (H, C, N, and S) Ratio Analysis. *Molecules*. 2023;28(6):2856. <https://doi.org/10.3390/molecules28062856>
24. McNicol G, Yu Z, Berry ZC, Emery N, Soper FM, et al. Tracing plant-environment interactions from organismal to planetary scales using stable isotopes: A mini review. *Emerging Topics in Life Sciences*. 2021;5(2):301–316. <https://doi.org/10.1042/ETLS20200277>
25. Zhao Y, Yang S, Wang D. Stable carbon and nitrogen isotopes as a potential tool to differentiate pork from organic and conventional systems. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2016;96(11):3950–3955. <https://doi.org/10.1002/jsfa.7567>
26. Zhao Y, Tu T, Tang X, Zhao S, Qie M, et al. Authentication of organic pork and identification of geographical origins of pork in four regions of China by combined analysis of stable isotopes and multi-elements. *Meat Science*. 2020;165:108129. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2020.108129>
27. Bahar B, Schmidt O, Moloney AP, Scrimgeour CM, Begley IS, et al. Seasonal variation in the C, N and S stable isotope composition of retail organic and conventional Irish beef. *Food Chemistry*. 2008;106(3):1299–1305. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.07.053>
28. Inácio CT, Chalk PM. Principles and limitations of stable isotopes in differentiating organic and conventional foodstuffs: 2. Animal products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2017;57(1):181–196. <https://doi.org/10.1080/10408398.2014.887056>
29. Cristea G, Voica C, Feher I, Puscas R, Magdas DA. Isotopic and elemental characterization of Romanian pork meat in corroboration with advanced chemometric methods: A first exploratory study. *Meat Science*. 2022;189:108825. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2022.108825>
30. Ayaz Y, Ayaz ND, Erol I. Detection of species in meat and meat products using enzyme-linked immunosorbent assay. *Journal of Muscle Foods*. 2006;17(2):214–220. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4573.2006.00046.x>

31. Ballin NZ, Lametsch R. Analytical methods for authentication of fresh vs. thawed meat – A review. *Meat Science*. 2008;80(2):151–158. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.12.024>
32. Ballin NZ, Madsen KG. Sex determination in beef by melting curve analysis of PCR amplicons from the amelogenin locus. *Meat Science*. 2007;77(3):384–388. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.04.029>
33. Ballin NZ, Vogensen FK, Karlsson AH. Species determination – Can we detect and quantify meat adulteration? *Meat Science*. 2009;83(2):165–174. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2009.06.003>
34. Chernukha I, Yurchak Z, Kuzmina E. Study on the meat isotopick composition for origin identification. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*. 2018;12(1):262–266. <https://doi.org/10.5219/906>
35. Горбунова Н. А. Возможности использования стабильных изотопов для идентификации географического происхождения мяса и мясных продуктов. *Обзор. Теория и практика переработки мяса*. 2018. Т. 3. № 1. С. 46–58. [Gorbunova NA. Possibilities of using stable isotopes for identification of geographical origin of meat and meat products. A review. *Theory and Practice of Meat Processing*. 2018;3(1):46–58. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21323/2414-438X-2018-3-1-46-58>
36. Kim KS, Kim JS, Hwang IM, Jeong IS, *et al.* Application of stable isotope ratio analysis for origin authentication of pork. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*. 2013;33(1):39–44. <https://doi.org/10.5851/kosfa.2013.33.1.39>
37. Nie J, Shao S, Xia W, Liu Z, Yu C, *et al.* Stable isotopes verify geographical origin of yak meat from Qinghai-Tibet plateau. *Meat Science*. 2020;165:108113. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2020.108113>
38. Piasentier E, Valusso R, Camin F, Versini G. Stable isotope ratio analysis for authentication of lamb meat. *Meat Science*. 2003;64(3):239–247. [https://doi.org/10.1016/S0309-1740\(02\)00183-3](https://doi.org/10.1016/S0309-1740(02)00183-3)
39. Erasmus SW, Muller M, van der Rijst M, Hoffman LC. Stable isotope ratio analysis: A potential analytical tool for the authentication of South African lamb meat. *Food Chemistry*. 2016;192:997–1005. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.07.121>
40. Liu X, Guo B, Wei Y, Shi J, Sun S. Stable isotope analysis of cattle tail hair: A potential tool for verifying the geographical origin of beef. *Food Chemistry*. 2013;140(1–2):135–140. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.02.020>
41. Ballin NZ. Authentication of meat and meat products. *Meat Science*. 2010;86(3):577–587. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2010.06.001>
42. Monahan FJ, Schmidt O, Moloney AP. Meat provenance: Authentication of geographical origin and dietary background of meat. *Meat Science*. 2018;144:2–14. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.05.008>
43. Franke BM, Koslitz S, Micaux F, Piantini U, Maury V, *et al.* Tracing the geographic origin of poultry meat and dried beef with oxygen and strontium isotope ratios. *European Food Research and Technology*. 2008;226:761–769. <https://doi.org/10.1007/s00217-007-0588-x>
44. Horacek M, Eisinger E, Papesch W. Reliability of stable isotope values from meat juice for the determination of the meat origin. *Food Chemistry*. 2010;118(4):910–914. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.03.090>
45. Camin F, Bontempo L, Perini M, Piasentier E. Stable isotope ratio analysis for assessing the authenticity of food of animal origin. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2016;15(5):868–877. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12219>
46. Moloney AP, O’Riordan EG, Schmidt O, Monahan FJ. The fatty acid profile and stable isotope ratios of C and N of muscle from cattle that grazed grass or grass/clover pastures before slaughter and their discriminatory potential. *Irish Journal of Agricultural and Food Research*. 2018;57:84–94. <https://doi.org/10.1515/ijafr-2018-0009>
47. 郭波莉, 魏益民, Kelly SD, 潘家荣, 魏 帅. 稳定性氢同位素分析在牛肉产地溯源中的应用. *分析化学*. 2009;37(9):1333–1336. [Guo BL, Wei YM, Kelly SD, Simon KD, Pan JR, *et al.* Application of stable hydrogen isotope analysis in beef geographical origin traceability. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*. 2009;37(9):1333–1336. (In Chinese)]
48. Yanagi Y, Hirooka H, Oishi K, Choumei Y, *et al.* Stable carbon and nitrogen isotope analysis as a tool for inferring beef cattle feeding systems in Japan. *Food Chemistry*. 2012;134(1):502–506. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.02.107>
49. 郭波莉, 魏益民, 潘家荣, 李 勇. 碳、氮同位素在牛肉产地溯源中的应用研究. *中国农业科学*. 2007;40(2):365–372. [Guo BL, Wei YM, Pan JR, Li Y. Application of carbon and nitrogen isotope in beef origin traceability. *Scientia Agricultura Sinica*. 2007;40(2):365–372. (In Chinese)] <https://doi.org/10.3864/j.issn.0578-1752.at-2006-7544>
50. Zhao S, Zhang H, Zhang B, Xu Z, Chen A, *et al.* A rapid sample preparation method for the analysis of stable isotope ratios of beef samples from different countries. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*. 2020;34(13):e8795. <https://doi.org/10.1002/rcm.8795>
51. Bong Y-S, Shin W-J, Lee A-R, Kim Y-S, Kim K, *et al.* Tracing the geographical origin of beefs being circulated in Korean markets based on stable isotopes. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*. 2010;24(1):155–159. <https://doi.org/10.1002/rcm.4366>
52. Nakashita R, Suzuki Y, Akamatsu F, Iizumi Y, Korenaga T, *et al.* Stable carbon, nitrogen, and oxygen isotope analysis as a potential tool for verifying geographical origin of beef. *Analitica Chimica Acta*. 2008;617(1–2):148–152. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2008.03.048>
53. 孙丰梅, 石光雨, 王慧文, 杨曙明. 牛不同组织中稳定性同位素氢氧硫组成探讨. *核农学报*. 2012;26(8):1148–1153. [Sun F-M, Shi G-Y, Wang H-W, Yang S-M. Stable hydrogen, oxygen and sulfur isotopes composition in different tissues of cattle. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*. 2012;26(8):1148–1153. (In Chinese)] <https://doi.org/10.11869/hnxb.2012.08.1148>