

УДК 543.84.849

**КОЛИЧЕСТВЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕДИ В ХЕЛАТНОМ КОМПЛЕКСЕ
С МЕТИОНИНОМ МЕТОДОМ РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНОГО АНАЛИЗА**

Д.Ю. Цветков, А.И. Петрова, Н.В. Лакина В.Ю. Долуда, А.И. Сидоров
Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Цветков Д.Ю., Петрова А.И., Лакина Н.В.,
Долуда В.Ю., Сидоров А.И., 2025

Аннотация. В статье отмечено, что главное преимущество метионата меди заключается в более высокой биодоступности по сравнению с неорганическими солями меди, такими как сульфат меди или оксид меди. Таким образом, организм может усвоить и использовать больше меди из метионата, что делает его более эффективным. Хелатная форма защищает медь от связывания с ингибиторами абсорбции в кишечнике, обеспечивая лучшее усвоение. Метионат меди добавляется в корма для различных сельскохозяйственных животных, включая свиней, птиц, крупный рогатый скот и даже рыбу, чтобы обеспечить адекватное поступление меди. Медь важна для множества физиологических процессов у животных. Хелатирование – это процесс соединения иона микроэлемента с органической молекулой (хелатором), что защищает молекулу-хелатор от разрушения в желудочно-кишечном тракте и способствует ее эффективной транспортировке через клеточные мембраны. Благодаря данной особенности хелатные минералы усваиваются организмом значительно лучше, и это позволяет достичь желаемого эффекта при использовании меньших доз. Более того, хелатные минералы лучше взаимодействуют с другими питательными веществами внутри клетки, обеспечивая синергетический эффект и повышая эффективность всего процесса обмена веществ. Анализ метионата меди имеет многостороннее значение в науке и практике. В настоящей работе был проведен анализ хелатного комплекса метионата меди методом рентгенофлуоресцентного анализа и выявлена его эффективность для анализа металла в хелатном комплексе.

Ключевые слова: метионат меди, хелатирование, рентгенофлуоресцентный анализ, хелатный комплекс.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-1-95-102

ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе развития российской промышленности и сельского хозяйства важной задачей является импортозамещение промышленной и пищевой продукции. Таким образом, актуально решение задач по повышению эффективности методов выращивания и содержания сельскохозяйственных животных. Одним из ключевых факторов, обеспечивающих крепкое здоровье и высокую продуктивность указанных животных, является полноценное минеральное питание. Особую роль в этом играют микроэлементы – незаменимые «кирпичики» для построения и поддержания всех систем организма, включая опорно-двигательный аппарат. В частности, микроэлементы критически важны для формирования и развития костной ткани, поскольку обеспечивают целостность скелета и предотвращают различные патологии [1–3].

Медь является незаменимым компонентом синтеза коллагена – структурного белка, отвечающего за прочность костей, связок, хрящей и других соединительных тканей. Дефицит этого микроэлемента приводит к замедлению роста, ослаблению костной ткани, повышению риска переломов и развитию различных заболеваний опорно-двигательного аппарата. Кроме того, медь участвует во множестве других важных метаболических процессов, влияющих на иммунитет, репродуктивную функцию и общий уровень продуктивности животных [4].

Традиционно в животноводстве широко применялись неорганические формы микроэлементов, привлекательные своей низкой стоимостью. Однако их биодоступность, т.е. способность усваиваться организмом, значительно ниже, чем у органических форм. Это приводит к необходимости использования существенно больших доз неорганических микроэлементов для достижения необходимого эффекта. Хотя низкая токсичность позволяет применять такие завышенные дозы без непосредственного вреда здоровью, это не гарантирует оптимального усвоения и, как следствие, не дает животным необходимый уровень минерального обеспечения. Кроме того, избыток некоторых неорганических микроэлементов может привести к накоплению их в тканях и негативно повлиять на другие физиологические процессы.

Современные исследования подтверждают, что использование хелатных минералов в кормлении сельскохозяйственных животных приводит к повышению показателей роста, продуктивности, укреплению иммунитета и улучшению состояния костной ткани. Это особенно актуально для животных в периоды интенсивного роста, беременности, лактации и стрессовых ситуаций, когда потребность в микроэлементах значительно возрастает [5].

Применяемый в данной методике метод – рентгенофлуоресцентный анализ (РФА) – основан на измерении интенсивности рентгеновского флуоресцентного (характеристического) излучения определяемых элементов. Флуоресцентное излучение возбуждается первичным излучением рентгеновской трубки (РТ). Под интенсивностью понимается поток квантов [квант/с] флуоресцентного излучения, проходящего через датчик системы его регистрации. Мерой интенсивности является аналитический сигнал, представляющий собой скорость счета [имп/с] электрических импульсов датчика, которая для каждой линии флуоресцентного излучения пропорциональна его интенсивности [6].

Содержания элементов определяют с помощью предварительно построенных градуировочных характеристик (ГХ). Они представляют собой для каждого элемента экспериментально определенную зависимость его содержания от аналитических сигналов. Для построения ГХ используют измерения аналитических сигналов на градуировочных образцах (ГО). Это образцы почв с известным химическим составом. Для измерений из всего множества линий флуоресценции используется часть, которая называется аналитическими линиями.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Методика проведения анализа метионата меди методом РФА

1. Измельчение пробы.

Перед проведением анализа проба должна быть измельчена. Для этой цели отбирается навеска массой не менее 25 г. Навеску набирают из 5–10 частей исходного материала, который предварительно рассыпают ровным слоем на разделочном столе. Измельчение проводят, используя оборудование, не загрязняющее пробу. Для этого

мельющие элементы оборудования (ступки или истиратели) не должны содержать анализируемых элементов.

Степень измельчения считают удовлетворительной, если выход класса составляет 71 мкм после измельчения не менее 95 %.

2. Квартование пробы.

Измельченная масса навески Q обычно избыточна для рентгеновского флуоресцентного анализа. Для уменьшения количества пробы и повышения ее однородности применяют квартование пробы. Этот прием заключается в следующем. Измельченную пробу рассыпают на ровной поверхности в виде квадрата толщиной слоя 2 мм. Квадрат делят диагоналями на четыре треугольника, причем содержимое одной пары противоположных треугольников объединяют и используют для измерений, а содержимое другой пары применяют в качестве дубликата.

3. Введение пробы в спектрометр.

Материал пробы засыпают в тарелочку, входящую в комплект поставляемой со спектрометром разборной кюветы, до образования горки и уплотняют с помощью цилиндрического пуансона, изготовленного из материала, не загрязняющего пробу. В качестве пуансона может быть использована, например, стеклянная пробка. Затем вновь добавляют материал до образования горки и раздавливают стеклом для формирования плоской поверхности, находящейся вровень с краями тарелочки.

Тарелочку накрывают куском полиэтиленотерфталатной пленки толщиной 6 мкм и размерами 30×30 мм. Ее закрепляют (натягивают) с помощью алюминиевого конического кольца, входящего в комплект разборной кюветы. Подготовленные образцы вставляют в кювету, кювету – в спектрометр, после чего приступают к подготовке следующего образца.

Измерение массовой доли элемента в пробе проводят в режиме «Анализ» в соответствии с программой количественного анализа. Значения массовой доли элементов рассчитываются автоматически, отражаются на мониторе компьютера. Их можно сохранить в памяти компьютера и при желании распечатать на принтере.

В ходе анализа проводят два последовательных определения, каждое из которых включает заполнение кюветы, экспонирование пробы и вычисление результата.

Чтобы оценить эффективность данного метода для количественного определения меди в хелатном комплексе с метионином, был выбран метод йодометрического титрования.

Методика йодометрического титрования метионата меди

Заполняют бюретку раствором тиосульфата натрия и закрывают трубкой с натральной известью. В колбу для титрования емкостью 100 мл вносят пипеткой 10 мл раствора меди, 2 мл раствора серной кислоты, 30 мл раствора иодида калия и титруют раствором тиосульфата до появления бледно-желтой окраски суспензии. Затем добавляют несколько капель раствора крахмала и продолжают медленно титровать при перемешивании, пока суспензия не станет белой. Отмечают объем израсходованного тиосульфата натрия. После этого рассчитывают массу меди, содержащуюся в образце, по формуле

$$m = \frac{V_{S_2O_3^{2-}}}{V_{Cu}} * C_{S_2O_3^{2-}} * \frac{V_{колб}}{1000} * M_{Cu},$$

где $V_{S_2O_3^{2-}}$ – объем раствора тиосульфата, пошедшего на титрование, мл; V_{Cu} – объем титруемого раствора меди, мл; $C_{S_2O_3^{2-}}$ – концентрация тиосульфата, моль/л; $V_{колб}$ – объем мерной колбы, содержащей анализируемый раствор, мл; $M_{Cu} = 63,54$ – молярная масса меди, г/моль.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 1 представлены результаты исследования метионата меди методом рентгенофлуоресцентного анализа. Присутствие меди в образцах было доказано по наличию характеристического пика интенсивности на РФС-спектрах. Количественно содержание меди определялось в режиме «Анализ» в соответствии с программой количественного анализа. Данные о количественном элементарном составе хелатного комплекса метионина с медью представлены в табл. 1.

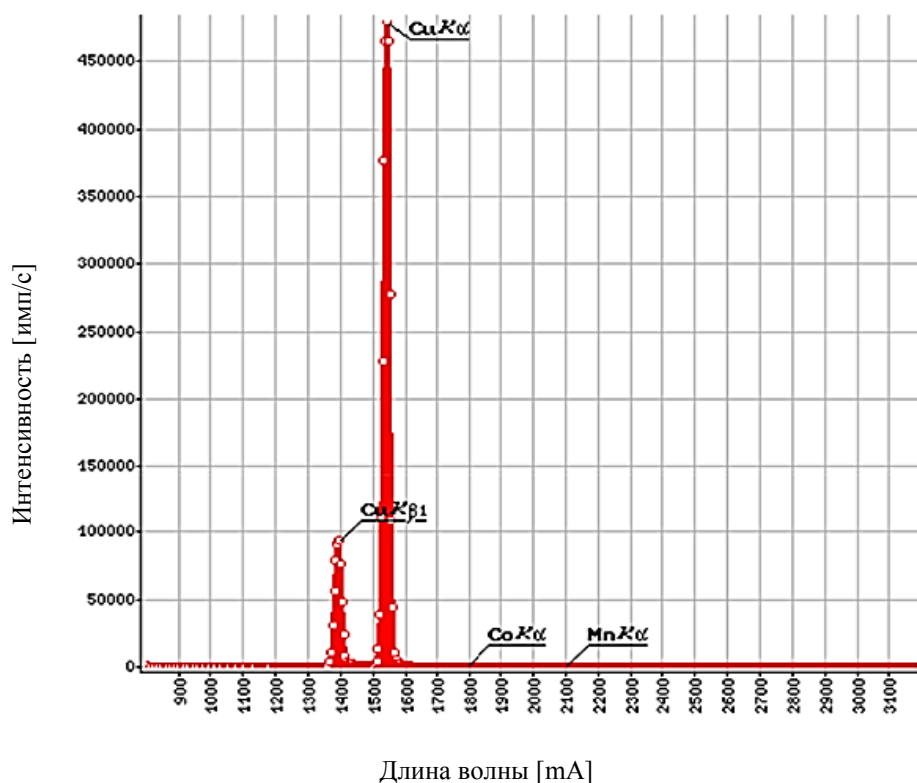


Рис. 1. Рентгенофлуоресцентный спектр хелатного комплекса метионата меди

Таблица 1

Элементарный состав метионата меди

Элемент	Содержание, %
Cu	16,55
Mn	0,016
Co	0,006

По результатам йодометрического титрования метионата меди было определено количественное содержание меди в комплексе. Среднее содержание меди в хелатном комплексе с метионином составляет 17,21 % ($n = 3$; RSD (относительное стандартное отклонение) = 1,14 %).

По теоретическим данным было рассчитано процентное содержание меди в полученном хелатном комплексе, учитывая отношение атома меди к молекуле метионина 1 : 2. Структурная формула хелатного комплекса метионата меди представлена на рис. 2.

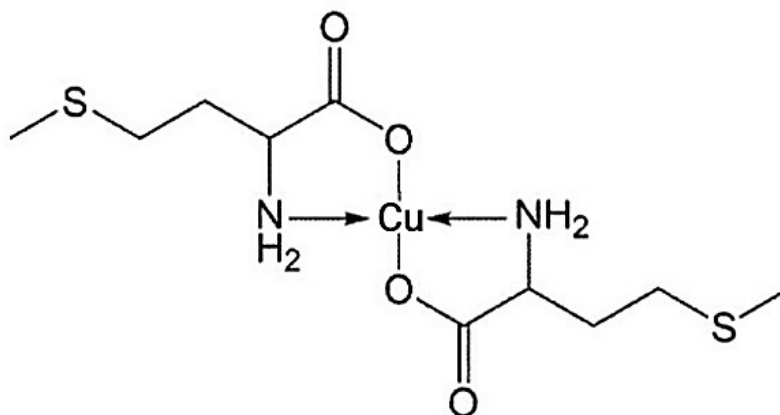


Рис. 2. Структурная формула метионата меди

Согласно расчетным данным, количество меди в комплексе составляет 17,78 %.

Результаты комплексонометрического титрования и рентгенофлуоресцентного анализа свидетельствуют о соответствии стехиометрического соотношения моль-эквивалентов меди и метионина в синтезированном комплексе 1 : 2. Полученные результаты коррелируют с литературными данными, где структура метионата меди представляется таким образом, что один атом меди связан с двумя молекулами метионина, при этом каждая молекула метионина связана с одним атомом меди.

Сравнительные результаты анализа количественного содержания меди в синтезированном хелатном комплексе представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты анализа содержания меди в синтезированном хелатном комплексе

Элемент	Метод		
	РФА, %	Титрование, %	Теоретическое содержание, %
Cu	16,55	17,21	17,78

По результатам, представленным в таблице, можно сделать вывод, что методы, используемые для количественного анализа меди в хелатном комплексе с метионином, показывают хорошую сходимость.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам проведенного исследования необходимо отметить, что метод рентгенофлуоресцентного анализа применим для анализа хелатных комплексов метионина с медью. Данный метод показывает хорошую сходимость, а кроме того, он прост в использовании. В сравнении с альтернативным методом количественного определения меди в комплексе (йодометрическим титрованием) данный метод отличается быстротой и достаточной точностью. За счет применения калибровочной модели было установлено содержание меди в синтезированном хелатном комплексе – 16,6 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ревенко А.Г. Рентгеноспектральный флуоресцентный анализ природных материалов. Новосибирск: Наука, 1994. 264 с.
2. Бахтиаров А.В., Савельев С.К. Рентгенофлуоресцентный анализ минерального сырья. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2014. 148 с.
3. Кадырова Р.Г., Кабиров Г.Ф., Муллахметов Р.Р. Синтез медных и цинковых солей метионина и глицина // *Ученые записки Казанской государственной академии ветеринарной медицины им. Н.Э. Баумана*. 2013. № 1 (213). С. 109–115.
4. Кадырова Р.Г., Кабиров Г.Ф., Муллахметов Р.Р. Синтез и свойства комплексных солей биогенных кислот макро- и микроэлементов. Казань: КГЭУ, 2016. 115 с.
5. Rudolph H., Schreiber W. X-ray Fluorescence Analysis: Principles and Applications // *Journal of Analytical Chemistry*. 2010. No. 65 (1). P. 1–8.
6. García-González M., de la Torre C. X-ray Fluorescence Spectroscopy: a Powerful Tool for the Characterization of Metal Ions in Biological Systems // *Biological Trace Element Research*. 2019. No. 188 (2). P. 293–304.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЦВЕТКОВ Дмитрий Юрьевич – студент, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: dm.cwetkow@mail.ru

ПЕТРОВА Арина Игоревна – студентка, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: arinapetrova989@gmail.com

ЛАКИНА Наталия Валерьевна – кандидат химических наук, доцент кафедры биотехнологии, химии и стандартизации, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: lakina@yandex.ru

ДОЛУДА Валентин Юрьевич – доктор химических наук, заведующий кафедрой химии и технологии полимеров, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: doludav@yandex.ru

СИДОРОВ Александр Иванович – кандидат химических наук, профессор кафедры биотехнологии, химии и стандартизации, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: sidorov_science@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Цветков Д.Ю., Петрова А.И., Лакина Н.В., Долуда В.Ю., Сидоров А.И. Количественное определение меди в хелатном комплексе с метионином методом рентгенофлуоресцентного анализа // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2025. № 1 (25). С. 95–102.

**QUANTITATIVE DETERMINATION OF COPPER
IN A CHELATED COMPLEX WITH METHIONINE
BY X-RAY FLUORESCENCE ANALYSIS**

D.Yu. Tsvetkov, A.I. Petrova, N.V. Lakina, V.Yu. Doluda, A.I. Sidorov
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The main advantage of copper methionate is its higher bioavailability compared to inorganic copper salts such as copper sulfate or copper oxide. This means that the body can absorb and use more copper from methionate, making it more effective. The chelated form protects copper from binding to absorption inhibitors in the intestine, providing better absorption. It is added to feed for various farm animals, including pigs, birds, cattle and even fish, to ensure an adequate supply of copper. Copper is important for a variety of physiological processes in animals. Chelation is the process of combining a trace element ion with an organic molecule (chelator), which protects it from destruction in the gastrointestinal tract and promotes its efficient transport through cell membranes. Due to this feature, chelated minerals are absorbed by the body much better, which allows you to achieve the desired effect when using smaller doses. Moreover, they interact better with other nutrients inside the cell, providing a synergistic effect and increasing the efficiency of the entire metabolic process. The analysis of copper methionate

has a multifaceted significance in science and practice. It helps to understand the biological functions of copper, develop new treatment methods, and optimize agricultural practices. In this work, the copper methionate chelate complex was analyzed by X-ray fluorescence analysis and its effectiveness for metal analysis in the chelate complex was revealed.

Keywords: copper methionate, chelation, X-ray fluorescence analysis, chelate complex.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

TSVETKOV Dmitry Yuryevichu – Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: dm.cwetkow@mail.ru

PETROVA Arina Igorevna – Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: arinapetrova989@gmail.com

LAKINA Natalia Valeryevna – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of Biotechnology, Chemistry and Standardization, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: lakina@yandex.ru

DOLUDA Valentin Yuryevich – Doctor of Chemistry, Head of the Department of Polymer Chemistry and Technology, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: doludav@yandex.ru

SIDOROV Alexander Ivanovich – Candidate of Chemical Sciences, Professor of the Department of Biotechnology, Chemistry and Standardization, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: sidorov_science@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Tsvetkov D.Yu., Petrova A.I., Lakina N.V., Doluda V.Yu., Sidorov A.I. Quantitative determination of copper in a chelated complex with methionine by x-ray fluorescence analysis // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 1 (25), pp. 95–102.