

АТОМНО-АБСОРБЦІЙНЕ ВИЗНАЧЕННЯ МІДІ В МІКРОВОДОРСТІ *DUNALIELLA VIRIDIS* ТА ПОДАЛЬШЕ ЇЇ ВИКОРИСТАННЯ ЯК ЛІКУВАЛЬНОГО ЗАСОБУ

О.І. Юрченко, Т.В. Черножук, І.Р. Шевченко, О.М. Бакланов

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Україна, yurchenko@karazin.ua

Анотація

Атомно-абсорбційним методом було визначено вміст міді в біомасі водорості *Dunaliella viridis* та печінці самців шурів. Використовуючи ультразвукову обробку зразків досягалась повнота вилучення міді та гомогенність зразків. Перевірку правильності результатів аналізу проведено методами «введено-знайдено» та шляхом варіювання маси аналізованих зразків. Показано, що систематична похибка не значна. Професором Божковим А.І. та співробітниками досліджено вплив міді на біологічні зразки. Отримані результати свідчать про те, що додавання іонів міді до біомаси мікроводоростей супроводжується утворенням різних структурно-функціональних комплексів, які можуть мати різну антибактеріальну активність. Біомаса водорості може бути використана для виготовлення харчових добавок, що компенсують дефіцит міді та β-каротину в організмі.

Ключові слова: мікроводорості, атомно-абсорбційна спектрометрія, мідь, пробопідготовка, ультразвукова обробка, біологічні зразки, метрологічні характеристики

1. Вступ

Мідь є важливим мікроелементом, який відіграє ключову роль у життєдіяльності людини, а її антибактеріальні властивості створюють потенціал для застосування в медицині, зокрема для боротьби з інфекціями. Завдяки антибактеріальній активності, мідь розглядається як перспективна альтернатива антибіотикам у лікуванні інфекційних захворювань, спричинених резистентними до антибіотиків бактеріями, такими як *Staphylococcus aureus* та *Pseudomonas aeruginosa* [1,2]. Мідь також розглядається як об'єкт для створення новітніх медичних зондів та методів лікування ряду патологій, включаючи онкологічні захворювання, нейродегенерацію та ангіогенну дисфункцію [3-5].

Її антимікробна дія базується на генерації активних форм кисню (АФК), що пошкоджують клітинні мембрани, білки і ДНК патогенів. Окрім того, бактерії рідше розвивають резистентність до міді, оскільки вона вражає декілька ключових внутрішньоклітинних мішеней одночасно [6, 7].

Мідь активно застосовується у медицині для зменшення поширення нозокоміальних інфекцій, зокрема через використання мідних поверхонь та покриттів у лікарнях. Такі покриття здатні пригнічувати ріст *Staphylococcus aureus* до 85%, а також впливати на *Pseudomonas aeruginosa*. Ефективність мідної поверхні перевершує традиційні антибіотики, особливо у випадках з антибіотикорезистентними штамми [8].

При цьому вони значно дешевші та доступніші за іони срібла, які володіють подібною дією; мідь є есенціальним мікроелементом і, як правило, досить швидко елімінується з організму [8-13].

Одним із напрямків досліджень антибактеріальної дії міді є дослідження її впливу на

мікроводорості *Dunaliella viridis*, оскільки біомаса, насичена міддю, ефективно пригнічує ріст бактерій, таких як *Staphylococcus aureus* 124 та *Pseudomonas aeruginosa* 18. Припускається, що мідь у хелатній формі підсилює антибактеріальну дію клітин *Dunaliella viridis*.

Професором Божковим А.І. та співробітниками було отримано штам мікроводорості *D. viridis*, здатний виживати в середовищі з високою концентрацією сірчаної кислоти міді - 75мг/л, тобто стійкий до високої концентрації міді - D.v.CuR, на відміну від вихідного штаму, чутливого до іонів міді - D. v.CuS. Понад 90% міді в клітинах зв'язано з білками і більша її частина знаходиться в цитозолі клітин. Для отримання іонів міді, зв'язаних з компонентами клітин, культуру *Dunaliella viridis* осаджували центрифугуванням при 3000g протягом 15хв за кімнатної температури, а клітинний осад руйнували осмотичним шоком з наступною гомогенізацією. Не зруйновані клітини та фрагменти клітин видаляли після центрифугування при 6000g протягом 15 хвилин при кімнатній температурі. Отриману водну фазу, яка містила іони міді в комплексі з білками, використовували як білками, використовували як хелатні форми міді. Як контроль використовували культуру клітин *D. viridis*, яку культивували на стандартному середовищі без міді (D.v. CuS) [9].

Для визначення залежності антибактеріальної активності іонної форми міді та хелатної форми міді сульфат міді до гомогенатів клітин *Dunaliella* додавали сульфат міді до кінцевих концентрацій 1, 7 та 15г/л. Культуру перемішували та інкубували протягом 30хв. Потім клітинну суспензію гомогенізували і зразки центрифугували при 6000g протягом 15хв за кімнатної температури [14-15].

В осаді фрагментів клітин та отриманій водній фазі, після осадження фрагментів клітин, визначали вміст міді на атомно-адсорбційному спектрометрі іСЕ3500, як описано в роботі [1], і в аліквотах визначали антибактеріальну активність щодо *S. aureus* 124 та *P. Aeruginosa* 18. Спектри поглинання водорозчинних компонентів визначали на спектрофотометрі Shimadzu UV-2600 (Японія) при довжинах хвиль 200-400 нм з метою визначення зміни ступеня екстрагованості компонентів мікроводоростей після додавання мідного купоросу.

При оцінці антибактеріальної дії іонів міді використовували водний розчин мідного купоросу в концентраціях 0,25; 0,5; 1,0; 7,0; 15,0; 20,0; і 25,0 г/л, який тестували на антибактеріальну активність щодо двох видів бактерій, як уже описано [16-19].

Електропровідність досліджуваних зразків вимірювали на векторному мережевому аналізаторі Rohde & Schwarz ZNB40 (Німеччина). Всі експерименти повторювали щонайменше тричі, з кількома аналітичними повтореннями. Отримані результати піддавали статистичній обробці результатів за допомогою програмного пакету Statistica 5.0 з використанням непараметричного U-критерію Манна-Уїтні. У таблицях і графіках наведено середні значення зі стандартними похибками. Відмінності між даними контрольного та експериментального варіантів вважали достовірними при $p < 0,05$.

Водночас надмірна кількість міді може мати токсичний вплив на організм, що потребує точного контролю за її вмістом, особливо в медичних препаратах. Тому актуальним є розробка методів визначення концентрації міді, зокрема в лікувальних засобах на основі мікроводоростей, таких як *Dunaliella viridis*. Дослідження впливу різних форм міді на біологічні системи та механізму їх антибактеріальної дії сприятиме розширенню її використання в медицині як антибактеріального засобу, а також у виробництві безпечних продуктів харчування та ліків [20-21].

Мета роботи розробка методики визначення міді атомно-абсорбційним методом з покращеними метрологічними характеристиками в багатокомпонентних зразках та вивчити антибактеріальні властивості ефекту міді.

2. Експериментальна частина

Застосовували атомно-абсорбційний спектрометр С-115-М1, обладнаний пальником для повітряно-ацетиленового полум'я, коректором фонового поглинання та джерелом резонансного випромінювання міді. Параметри для міді для вимірювань на атомно-абсорбційному спектрометрі С-115-М1: $\lambda=324,7$ нм, струм $I=7,5$ мА, ФЕУ 1,4 кВ, ширина щілини монохроматора: 0,1 нм, ультразвукова ванна (Jeken(Codyson)PS-20). Лабораторні електронні ваги OHAUS PA 64 (65/0.0001). Мірні колби об'ємом 5, 10, 25, 50, 100 мл

згідно з ДСТУ 1770. Піпетки об'ємом 1, 5, 10 мл згідно з ДСТУ 29169. Мірні циліндри об'ємом 25 мл згідно з ДСТУ 1770. Дистильована вода згідно з ДСТУ 6709. Стандартні водні розчини міді виготовлені в Фізико-хімічному інституті імені Богатського (м. Одеса). Концентрована нітратна кислота та розчин нітратної кислоти ($\omega = 1,5\%$).

При приготуванні градувальних розчинів ми використовували стандартні зразки складу міді з початковою концентрацією 1 г/л, виготовлені у Фізико-хімічному інституті імені Богатського (м. Одеса).

Піпеткою об'ємом 10 мілілітрів відбираємо 10 мл вихідного розчину і переносимо в колбу на 100 мл, доводимо до мітки водою. Так готується проміжний розчин з концентрацією 100 мг/л.

Піпеткою об'ємом 10 мілілітрів відбираємо 10 мл. отриманого розчину і переносимо в колбу на 100 мл, доводимо до мітки водою. Так готується проміжний розчин з концентрацією 10 мг/л.

Потім піпетками місткістю 1, 5 та 10 мл відбираємо 1, 3, 5, 7 та 10 мл проміжного розчину концентрацією 10 мг/л в колби на 25 мл. Після цього доводимо їх до мітки дистильованою водою. Отримуємо розчини міді з концентрацією $1 \cdot 10^{-4}$, $3 \cdot 10^{-4}$, $5 \cdot 10^{-4}$, $7 \cdot 10^{-4}$, $10 \cdot 10^{-4}$ г/л.

Для пробопідготовки відбирали 1 г сухої речовини, висушеної при 50°C протягом 24 год., зваженої з точністю до 0,0001 г на аналітичних вагах. Пробу подрібнюємо до однорідного стану. Додаємо до наважки 10 мл конц. нітратної кислоти (HNO_3) і випаровуємо при нагріванні до вологого залишку. Після охолодження доливаємо 10 мл розчину HNO_3 ($\omega = 1,5\%$). Розчин з такою концентрацією в атомній абсорбції дає максимальний аналітичний сигнал. Обробляємо ультразвуком протягом 20 хвилин. Після цього розчин фільтруємо. Отриманий розчин кількісно переносимо в мірну колбу об'ємом 25 мл та доводимо до мітки і ретельно перемішуємо.

Підготовка атомно-абсорбційного спектрометра до роботи:

а) підігрів джерела резонансного випромінювання до початку вимірювань до отримання стабільної інтенсивності випромінювання, але не більше 30 хв;

б) юстування джерел резонансного та нерезонансного випромінювання;

в) підігрів увімкненого пальника перед початком вимірювань з одночасним промиванням його дистильованою водою протягом 5-10 хвилин;

г) точна настройка монохроматора на резонансну лінію за максимумом випромінювання при мінімальній щільності, але проведення вимірювань при максимальній ширині монохроматора;

д) юстування висоти пальника та відношення повітря/ацетилену перед кожною серією вимірювань за максимальною абсорбцією одного зі стандартних розчинів порівняння.

3. Результати та їх обговорення

Біологічні зразки (рис.1):

- зразок 1 – контрольний зразок біомаси клітин мікроводоростей *Dunaliella viridis*;
- зразок 2 – біомаса клітин мікроводоростей, які адаптовані до росту на середовищі, що містить високі концентрації іонів міді в середовищі. 75мг/л – це токсична концентрація для природного, контрольного штаму цих водоростей.



Рис. 1. Зразки біомаси водорості *Dunaliella viridis*

З градувального графіку (рис. 2) знайшли вміст міді (мг/л). Концентрацію міді в мг/кг розраховували за формулою:

$$C \left(\frac{\text{мг}}{\text{кг}} \right) = \frac{C \left(\frac{\text{мг}}{\text{л}} \right) * V(\text{л})}{m(\text{кг})} \quad (1)$$

де: V – об'єм колби, $V = 0,025\text{л}$; m – маса наважки зразку. Також враховували розбавлення вихідного розчину.

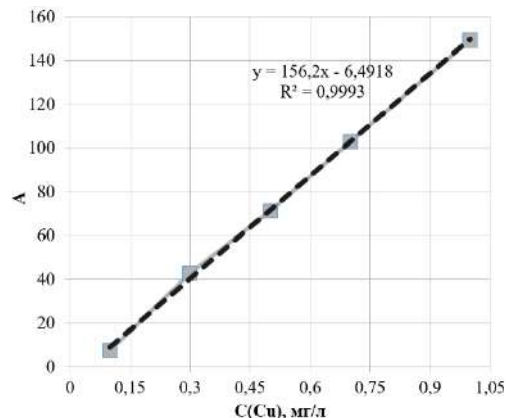


Рис. 2. Залежність аналітичного сигналу при атомно-абсорбційному визначенні міді з використанням водних розчинів стандартного зразку складу

Таблиця 1 – Результати визначення вмісту (мг/кг) міді у зразках 1,2 ($n = 5$, $P = 0,95$)

Номер зразку	Вміст Cu, мг/кг	m (наважки), кг
1	11115±95	0,0001771
1'	8454±90	0,0002748
2	12735±101	0,0002704
2'	13145±110	0,0003079

З підготовленої проби водорості *Dunaliella viridis* були зроблені добавки в продукти харчування для щурів. Після тижневого годування щурів, робили аналіз печінки щурів на вміст міді.

Таблиця 2 – Результати атомно-абсорбційного визначення міді в печінці щурів ($n = 5$, $P = 0,95$)

Зразок №	Вміст Cu, мг/кг	Зразок №	Вміст Cu, мг/кг
1	7,99±0,02	21	9,18±0,03
2	6,59±0,02	22	8,63±0,02
3	9,41±0,02	23	9,71±0,03
4	7,59±0,02	24	10,2±0,03
5	7,66±0,02	25	15,0±0,04
6	8,59±0,02	26	6,70±0,02
7	8,03±0,02	27	19,9±0,04
8	6,74±0,02	28	67,3±0,05
9	8,30±0,02	29	15,3±0,04
10	7,47±0,02	30	15,6±0,04
11	13,3±0,07	31	10,2±0,03
12	11,0±0,05	32	15,5±0,04
13	9,42±0,04	33	42,6±0,07
14	8,91±0,03	34	8,01±0,03
15	138±2	35	10,3±0,03
16	55,6±0,1	36	56,3±0,07
17	11,3±0,08	37	25,8±0,04
18	12,3±0,08	38	15,9±0,03
19	19,3±0,08	39	19,5±0,04
20	22,8±0,09		

Перевірку правильності результатів аналізу проводили методами «введено-знайдено» та шляхом варіювання маси зразків. Показано, що систематична похибка не є суттєвою.

Визначаючи антибактеріальну активність харчових добавок, використовували антибіотик меропенем (рис.3), який є протимікробним засобом системної дії, як контроль. Професор Божков А.І. з співробітниками показали, що меропенем пригнічує синтез компонентів клітинної стінки грампозитивних і грамнегативних бактерій шляхом зв'язування з білками РВР (тими самими білками, які зв'язують пеніцилін). Відомо, що різні штами *Enterobacteriaceae*, *Pseudomonas aeruginosa* та *Acinetobacter* можуть проявляти резистентність до меропенему, тому рекомендується перевіряти його дію на місцевих штаммах.

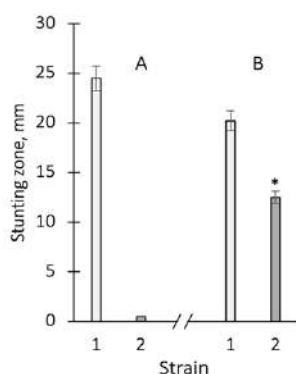


Рис. 3. – Зони затримки росту *S. aureus* 124 (1) та *P. aeruginosa* 18 (2) при використанні дискового дифузійного тесту з антибіотиком меропенемом (А), а також тканини з нанесеним шаром міді товщиною 3мкм

Було виявлено, що меропенем затримує ріст *S. aureus* 124: зона затримки росту становила $24,9 \pm 0,5$ мм за допомогою дискового дифузійного тесту (рис. 2А). Водночас цей антибіотик не пригнічував ріст *P. aeruginosa* 18, що проявлялося у відсутності пригнічення росту цієї культури бактерій (рис. 2А).

Наведено середні значення від 3 до 5 експериментів та їхні стандартні похибки. * – відмінності між антибіотиком і тканиною для варіантів достовірні при $P < 0,05$.

4.Висновок

Атомно-абсорбційним методом було визначено вміст міді в біомасі водорості *Dunaliella viridis* та печінці самців щурів. Використовуючи ультразвукову обробку зразків досягалась повнота вилучення міді та гомогенність зразків. Перевірку правильності результатів аналізу проведено методами «введено-знайдено» та шляхом варіювання маси аналізованих зразків. Показано, що систематична похибка не значна. Професором Божковим А.І. та співробітниками досліджено вплив міді на біологічні зразки. Отримані результати свідчать про те, що додавання іонів міді до біомаси мікрободоростей супроводжується утворенням різних структурно-функціональних комплексів, які можуть мати різну антибактеріальну активність. Біомаса водорості може бути використана для виготовлення харчових добавок, що компенсують дефіцит міді та β-каротину в організмі.

Список літератури

1. Yurchenko O. I., Chernozhuk T.V., Nikolenko M.V., Baklanov O.M., Kravchenko, O. A.. Atomic absorption determination of copper and zinc in pharmaceutical preparations. *Voprosy Khimii I Khimicheskoi Tekhnologii*. 2024, 1, 115–121. URL: <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2024-152-1-115-121>
2. Bozhkov A. I., Sidorov V. I., Alboqai O. K., Akzhyhitov R. A., Kurguzova N. I., Malyshev A. B., Albegai M. A. Y., Gromovoi T. Yu. The role of metallothioneins in the formation of hierarchical mechanisms of resistance to toxic compounds in young and old animals on the example of copper sulfate. *Translational Medicine of Aging*. 2021, 5, 62–74. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tma.2021.11.001>
3. Urso E., Maffia M. Behind the Link between Copper and Angiogenesis: Established Mechanisms and an Overview on the Role of Vascular Copper Transport Systems. *Journal of Vascular Research*. 2015, 52(3), 172–196. URL: <https://doi.org/10.1159/000438485>
4. Garber K. Targeting copper to treat breast cancer. *Science*. 2015, 349(6244), 128–129. URL: <https://doi.org/10.1126/science.349.6244.128>
5. White A. R., Kanninen K. M., Crouch P. J. Editorial: Metals and neurodegeneration: restoring the balance. *Frontiers in Aging Neuroscience*. 2015, 7. URL: <https://doi.org/10.3389/fnagi.2015.00127>
6. Orta-Rivera A. M., Meléndez-Contés Y., Medina-Berrios N., Gómez-Cardona A. M., Ramos-Rodríguez A., Tinoco A. D. Copper-Based Antibiotic Strategies: Exploring Applications in the Hospital Setting and the Targeting of Cu Regulatory Pathways and Current Drug Design Trends. *Inorganics*. 2023, 11(6), 252. URL: <https://doi.org/10.3390/inorganics11060252>
7. Michels H. T., Noyce J. O., Keevil C. W. Effects of temperature and humidity on the efficacy of methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* challenged antimicrobial materials containing silver and copper. *Letters in Applied Microbiology*. 2009, 49(2), 191–195. URL: <https://doi.org/10.1111/j.1472-765x.2009.02637.x>
8. Bozhkov A.I., Bobkov V.V., Osolodchenko T.P., Yurchenko O.I., Ganin V.Y., Ponomarenko S.V. The antibacterial activity of the copper for *Staphylococcus aureus* 124 and *Pseudomonas aeruginosa* 18 depends on its state: metalized, chelated and ionic. 2024, 10(20), 2405–8440. URL: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39098>
9. Kovaleva M. K., Menzyanova N. G., Jain A., Yadav A., Flora S., Bozhkov A. I. Effect of Hormesis in *Dunaliella viridis* Teodor. (Chlorophyta) Under the Influence of Copper Sulfate. *International Journal on Algae*. 2012, 14(1), 44–61. URL: <https://doi.org/10.1615/interjalgae.v14.i1.40>

10. Wohlleben W., Mast Y., Stegmann E., Ziemert, N. Antibiotic drug discovery. *Microbial Biotechnology*. 2016, 9(5), 541–548. URL: <https://doi.org/10.1111/1751-7915.12388>
11. Godoy-Gallardo M., Eckhard U., Delgado L. M., de Roo Puente Y. J. D., Hoyos-Nogués M., Gil F. J., Perez R. A. Antibacterial approaches in tissue engineering using metal ions and nanoparticles: From mechanisms to applications. *Bioactive Materials*. 2021, 6(12), 4470–4490. URL: <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2021.04.033>
12. Lavrynenko O., Zahornyi M., Vember V. Photocatalytic destruction of organic dyes by titanium dioxide particles doped with gold. Proceedings of the NTUU “Igor Sikorsky KPI”. Series: *Chemical Engineering, Ecology and Resource Saving*. 2023, 4, 69–79. URL: <https://doi.org/10.20535/2617-9741.4.2023.294330>
13. Karasek F.W., Clement R.E. Basic Gas Chromatography-Mass Spectrometry: Principles and Techniques. 1988
14. Haiovyi S., Bozhkov A. Hormetic effect on the toxic action of copper ions depends on the tissue distribution of copper ions. *Grail of Science*. 2023, (31), 157–162. URL: <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.15.09.2023.26>
15. Bozhkov A. I., Bozhkov A. A., Ponomarenko I. E., Kurguzova N. I., Akzhyhitov R. A., Goltvyanskii A. V., Klimova E. M., Shapovalov S. O. Elimination of the toxic effect of copper sulfate is accompanied by the normalization of liver function in fibrosis. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*. 2021, 12(4), 655–663. URL: <https://doi.org/10.15421/022190>
16. Bryantseva Yu.V. Diversity and distribution of dinoflagellates in water bodies of Ukraine (critical and systematic revision). *Algologia*. 2023, 33(2), 98–126. URL: <https://doi.org/10.15407/alg33.02.098>
17. Cavalletti, E., Romano, G., Palma Esposito, F., Barra, L., Chiaiese, P., Balzano, S., & Sardo, A. Copper Effect on Microalgae: Toxicity and Bioremediation Strategies. *Toxics*. 2022, 10(9), 527. URL: <https://doi.org/10.3390/toxics10090527>
18. Salah I., Parkin I. P., Allan E. Copper as an antimicrobial agent: recent advances. *RSC Advances*. 2021, 11(30), 18179–18186. URL: <https://doi.org/10.1039/d1ra02149d>
19. Arendsen L. P., Thakar R., Sultan, A. H. The Use of Copper as an Antimicrobial Agent in Health Care, Including Obstetrics and Gynecology. *Clinical Microbiology Reviews*. 2019, 32(4). URL: <https://doi.org/10.1128/cmr.00125-18>
20. Noyce J. O., Michels H., Keevil C. W. Potential use of copper surfaces to reduce survival of epidemic meticillin-resistant *Staphylococcus aureus* in the healthcare environment. *The Journal of Hospital Infection*. 2006, 63(3), 289–297. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jhin.2005.12.008>
21. Giachino A., Waldron K. J. Copper tolerance in bacteria requires the activation of multiple accessory pathways. *Molecular Microbiology*. 2020, 114(3), 377–390. URL: <https://doi.org/10.1111/mmi.14522>

Надійшла (Received) 25.04.2025

Прийнята до друку (accepted for publication) 03.05.2025

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ/ABOUT THE AUTHORS

Юрченко Олег Іванович – зав. кафедри хімічної метрології ХНУ імені В.Н. Каразіна, д.х.н., професор, e-mail: yurchenko@karazin.ua, ORCID: 0000-0002-7117-4556

Yurchenko Oleh Ivanovych – head of Department of Chemical Metrology of KhNU named after V.N. Karazina, DSc (chemistry), professor, e-mail: yurchenko@karazin.ua, ORCID: 0000-0002-7117-4556

Черножук Тетяна Василівна – доц. кафедри неорганічної хімії ХНУ імені В.Н. Каразіна, к.х.н., доцент, e-mail: t.chernohyuk@karazin.ua, ORCID: 0000-0001-5580-7838

Chernozhuk Tetyana Vasylivna – associate professor Department of Inorganic Chemistry of KhNU named after V.N. Karazina, PhD, associate professor, e-mail: t.chernohyuk@karazin.ua, ORCID: 0000-0001-5580-7838

Шевченко Іван Романович – аспірант кафедри хімічної метрології ХНУ імені В.Н. Каразіна, e-mail: i.shevchenko@karazin.ua, ORCID: 0009-0002-6944-4016

Shevchenko Ivan Romanovych – postgraduate student of Department of Chemical Metrology of the KhNU named after V.N. Karazin, e-mail: i.shevchenko@karazin.ua, ORCID: 0009-0002-6944-4016

Бакланов Олександр Миколайович – проф. кафедри хімічної метрології ХНУ імені В.Н. Каразіна, д.х.н., професор, e-mail: o.baklanov@karazin.ua, ORCID: 0000-0001-9396-5204

Baklanov Oleksandr Mykolayovych – prof. Department of Chemical Metrology of KhNU named after V.N. Karazina, PhD, professor, e-mail: o.baklanov@karazin.ua, ORCID: 0000-0001-9396-5204

Atomic absorption determination of copper in the microalgae *Dunaliella Viridis* and its further use as a therapeutic agent

Abstract

The copper content in the biomass of the alga *Dunaliella viridis* and in the liver of male rats was determined using atomic absorption spectroscopy. Ultrasonic treatment of the samples ensured complete copper extraction and sample homogenization. The accuracy of the analytical results was verified using the spiking method (“added-found”) and by varying the mass of the analyzed samples. It was shown that the systematic error was insignificant. Professor A.I. Bozhkov and his colleagues studied the effect of copper on biological samples. The results indicate that the addition of copper ions to the microalgal biomass is accompanied by the formation of various structural and functional complexes, which may exhibit different antibacterial activities. The algal biomass can be used for the production of dietary supplements to compensate for copper and β -carotene deficiency in the body.

Keywords: microalgae, atomic absorption spectrometry, copper, sample preparation, ultrasonic treatment, biological samples, metrological characteristics.