

## ХІМІКО-ТОКСИКОЛОГІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА ОТРУТ ГРИБА АМАНТА MUSCARIA ТА ПЕРСПЕКТИВИ МЕДИЧНОГО ВИКОРИСТАННЯ: ОГЛЯД СУЧАСНИХ ДАНИХ

Валентина Бевзо, Микола Тураш

Буковинський державний медичний університет МОЗ України, м. Чернівці, Україна

**Резюме.** Мухомор червоний (*Amanita muscaria*) є одним із найвідоміших токсичних грибів, що містить комплекс ізоксазольних алкалоїдів, зокрема іботенову кислоту, мусцимол, мусказон, а також інші біологічно активні сполуки. Упродовж останніх десятиліть інтерес до мухомора червоного різко зріс у зв'язку з відкриттям нових фармакологічних властивостей його компонентів.

**Мета дослідження.** Узагальнити сучасні знання про хімічний склад, токсикологічні ефекти та можливе фармакологічне застосування компонентів *Amanita muscaria* на основі аналізу і систематизації міжнародних публікацій.

**Матеріали та методи.** Систематичний огляд було проведено з використанням чотирьох основних електронних баз даних: Web of Science, Google Scholar, PubMed та ScienceDirect. Методологія охоплювала порівняння експериментальних даних, аналіз фармакокінетичних параметрів, оцінку клінічних спостережень і критичний огляд потенційних напрямів терапевтичного застосування біоактивних сполук *Amanita muscaria*.

**Науково-дослідна робота.** Дослідження проведено в межах науково-дослідної роботи кафедри біоорганічної і біологічної хімії та клінічної біохімії БДМУ «Морфофункціональні перебудови структур нервової та ендокринної систем у різні періоди постнатального онтогенезу та біохімічні механізми метаболізму сигнальних молекул, стан оксидантної та антиоксидантної систем за умов експериментальних патологій і впливу глутатіону та мелатоніну», № державної реєстрації 0124U002513 (2024-2028 рр.).

**Біоетика.** Матеріали дослідження схвалені комісією з питань біоетики БДМУ (протокол №6 від 19.03.2026).

**Результати.** Стаття містить огляд сучасних даних щодо хімічного складу *Amanita muscaria*, токсикодинаміки його компонентів та потенційних напрямів фармакологічного застосування мусцимолу, іботенової кислоти й пов'язаних метаболітів. Проаналізовано результати експериментальних досліджень, зокрема цитотоксичність екстрактів, вплив на нейрональні мережі, протизапальні, анксиолітичні та нейропротекторні властивості. Особливу увагу приділено ризикам використання, фармакокінетичним характеристикам та перспективам створення стандартизованих фармацевтичних препаратів. Порівняльний аналіз сучасних даних щодо можливостей застосування компонентів *Amanita muscaria* у неврології, психіатрії, геронтології та онкофармакології підкреслює їхні унікальні переваги в сучасній медицині.

**Висновки.** Компоненти *Amanita muscaria* поєднують токсичність і потенційну фармакологічну цінність. Мусцимол та інші ізоксазольні алкалоїди розглядають як основу нейрофармакологічних засобів. Клінічне застосування потребує стандартизації, безпечніших аналогів і токсикологічного контролю.

**Ключові слова:** мухомор червоний; мусцимол; іботенева кислота; токсикологія; фармакологія.

## CHEMICAL AND TOXICOLOGICAL CHARACTERISTICS OF AMANITA MUSCARIA MUSHROOM POISONS AND PROSPECTS FOR MEDICAL USE: A REVIEW OF CURRENT DATA

Valentyna Bevzo, Mykola Turash

Bukovinian State Medical University of the Ministry of Health of Ukraine, Chernivtsi, Ukraine

**Abstract.** *Amanita muscaria* is one of the most famous toxic mushrooms, containing a complex of isoxazole alkaloids, in particular ibotenic acid, muscimol, muskazone, as well as other biologically active compounds. Over the past decades, interest in the red fly agaric has increased dramatically due to the

discovery of new pharmacological properties of its components.

**The aim of the study.** To summarize current knowledge about the chemical composition, toxicological effects and possible pharmacological applications of *Amanita muscaria* components based on the analysis and systematization of international publications.

**Material and methods.** A systematic review was conducted using four major electronic databases: Web of Science, Google Scholar, PubMed and ScienceDirect. The methodology includes comparison of experimental data, analysis of pharmacokinetic parameters, evaluation of clinical observations and a critical review of potential areas of therapeutic application of *Amanita muscaria* bioactive compounds.

**Scientific research.** The study was conducted within the framework of the research work of the Department of Bioorganic and Biological Chemistry and Clinical Biochemistry of the BSMU "Morphofunctional reorganizations of the structures of the nervous and endocrine systems in different periods of postnatal ontogenesis and biochemical mechanisms of metabolism of signaling molecules, the state of oxidant and antioxidant systems under conditions of experimental pathologies and the influence of glutathione and melatonin", state registration number 0124U002513 (2024-2028).

**Bioethics.** The research materials were approved by the Bioethics Commission of BSMU (protocol №6, dated 19.03.2026).

**Results.** The article provides a review of current data on the chemical composition of *Amanita muscaria*, toxicodynamics of its components and potential directions of pharmacological application of muscimol, ibotenic acid and related metabolites. The results of experimental studies are analyzed, in particular, the cytotoxicity of extracts, the effect on neuronal networks, anti-inflammatory, anxiolytic and neuroprotective properties. Special attention is paid to the risks of use, pharmacokinetic characteristics and prospects for the creation of standardized pharmaceutical preparations. A comparative analysis of current data on the possibilities of using *Amanita muscaria* components in neurology, psychiatry, gerontology and oncopharmacology emphasizes their unique advantages in modern medicine.

**Conclusions.** *Amanita muscaria* components combine toxicity and potential pharmacological value. Muscimol and other isoxazole alkaloids are considered as the basis of neuropharmacological agents. Clinical application requires standardization, safer analogues and toxicological control.

**Key words:** *amanita muscaria*; muscimol; ibotenic acid; toxicology; pharmacology.

**Вступ.** Гриб *Amanita muscaria* (*A. muscaria*) або мухомор червоний є одним із найвідоміших представників роду *Amanita*. Капелюшок цього виду грибів може досягати в діаметрі від 4 до 21 см, характеризується насиченим яскраво-червоним кольором із білими цятками [1]. *A. muscaria* – це один із найтоксичніших видів грибів, який поширений у хвойних та листяних лісах Північної півкулі.

Цей гриб належить до одних із найвідоміших та водночас найсуперечливіших видів макроміцетів у токсикології та етнофармакології. Характеризуючись яскраво вираженим психотропним і токсичним ефектами, цей гриб упродовж століть посідав чільне місце в культурних традиціях народів Північної Євразії, де його використовували в ритуальних практиках, лікувальних обрядах і народній медицині, наприклад, для лікування ревматизму та дизентерії [2-4].

Однак, науковий інтерес до *A. muscaria* значною мірою активізувався лише останніми десятиліттями, коли розвиток аналітичних методів дав змогу встановити складний хімічний профіль цього гриба та з'ясувати фармакологічну дію його основних токсичних компонентів [3,5].

Значну частку сучасних досліджень присвячено ізоксазольним алкалоїдам – іботеновій кислоті та мусцимолу, що визначають як токсичні, так і потенційно терапевтичні властивості цього гриба. Саме завдяки цьому поєднанню небезпеки та перспективності мухомор червоний став об'єктом підвищеної уваги біомедичної науки, фармакології, нейротоксикології та психофармакології [5,6,7].

Інноваційні фармакологічні підходи, спрямовані на використання селективних модуляторів ГАМК-рецепторів, а також пошук нових нейропротекторів для лікування нейродегенеративних захворювань, таких як, депресія, тривожні розлади, розлади сну, розлади аутистичного спектра та навіть для лікування раку [7] сформували підґрунтя для відродження інтересу до мухомора, як потенційного джерела перспективних терапевтичних молекул [6-8].

Сучасні огляди й експериментальні роботи переконливо демонструють необхідність комплексного аналізу токсинів *A. muscaria*, їх механізмів дії й клінічного потенціалу, особливо з огляду на зростання популярності напівофіційних препаратів та харчових добавок на основі цього гриба, що створює нові ризики для здоров'я населення [9]. Водночас, у 2022-2025 рр. [9,10] зафіксовано різке збільшення випадків отруєння продуктами на основі *A. muscaria*, що зумовлено появою на комерційному ринку капсул, настоянок та екстрактів без стандартизації дозування.

У такому контексті систематизація даних щодо хімічного складу, токсикологічних ефектів,

механізмів дії й потенційних ризиків [3] та можливого фармакологічного застосування компонентів *A. muscaria* набуває особливої актуальності.

**Мета дослідження.** Узагальнити сучасні літературні дані про хімічні компоненти *A. muscaria*, їхні токсикологічні характеристики, механізми фармакологічної дії та можливість застосування окремих сполук у медичній практиці.

**Матеріали та методи.** Дизайн огляду побудовано шляхом аналізу й систематизації міжнародних публікацій за період 2003-2025 років, включаючи рецензовані статті з баз Web of Science, Google Scholar, PubMed та ScienceDirect, а також огляди й експериментальні роботи з токсикології, нейрофармакології та мікології. Для узагальнення включено як фундаментальні огляди (Michelot, Melendez-Howell, 2003; Patočka, Kocandrová, 2017), так і новітні дослідження з хімічного аналізу й токсикодинаміки (Dushkov et al., 2023; Dai et al., 2025, Wijesekara et al., 2025).

Пошук літератури, що завершений 1 жовтня 2025 року, використовував ключові слова, включаючи «Мікотоксини», «Токсини *Amanita muscaria*», «Мусцимол», «Іботенова кислота», «Бета-глюкани» та «Терапевтичне застосування».

Методологія дослідження охоплювала порівняння експериментальних даних, аналіз фармакокінетичних параметрів, оцінку клінічних спостережень і критичний огляд потенційних напрямів терапевтичного застосування ізоксазолних сполук *A. muscaria*.

**Науково-дослідна робота.** Дослідження проведене в межах науково-дослідної роботи кафедри біоорганічної і біологічної хімії та клінічної біохімії БДМУ «Морфофункціональні перебудови структур нервової та ендокринної систем у різні періоди постнатального онтогенезу та біохімічні механізми метаболізму сигнальних молекул, стан оксидантної та антиоксидантної систем за умов експериментальних патологій і впливу глутатіону та мелатоніну», № державної реєстрації 0124U002513 (2024-2028 рр.).

**Біоетика.** Матеріали дослідження схвалені комісією з питань біоетики БДМУ (Протокол № 6 від 19.03.2026 р.).

### Результати дослідження та їх обговорення.

#### 1. Хімічний склад гриба *Amanita muscaria*.

Дослідження хімічних компонентів *мухомора червоного* пройшли кілька важливих етапів. Найбільш ранні дослідження: 1900-1950 рр. – перші виділення екстрактів та помилкове припущення про роль мускарину. В період з 1960 по 1980 рр. відбулося встановлення структури іботенової кислоти та мусцимолу (репрезентативні роботи Eugster, Takemoto). Сучасний етап в дослідженні хімічного складу *A. Muscaria* – це 2000-2025 рр. – здійснено точний кількісний аналіз, була започаткована молекулярна біологія біосинтезу, токсикогеноміка [6,11-13].

Однією з перших систематизованих праць, що описує хімічний склад та механізми токсичності *A. muscaria*, є фундаментальні дослідження Michelot & Meléndez-Howell [3], які детально окреслили будову та властивості головних ізоксазолних сполук гриба, зокрема мусцимолу та іботенової кислоти. Автори підкреслили, що основний психотропний ефект забезпечується саме цими двома метаболітами, а інші компоненти (ізоксазолні алкалоїди, метаболіти амінокислот, стероли, пігменти та полісахариди) можуть модифікувати їхню активність. Також вони зазначають, що гриб містить інші компоненти: пігменти (терфенілхінони, беталаїни), антиоксиданти, полісахариди, білки та інші метаболіти [6]. Сучасні дослідження демонструють, що гриб володіє розгалуженим вторинним метаболізмом, здатним значно змінюватися залежно від стадії росту, ґрунтового складу, географічної широти та мікоризного партнера [3,5] (табл. 1).

Основними токсикологічно релевантними сполуками *A. muscaria* є іботенова кислота та мусцимол. *Іботенова кислота* (2-аміно-2-(3-гідроксіізоксазол-5-іл)оцтова кислота) є структурним аналогом глутамату, що визначає її високу афінність до NMDA-, AMPA- та метаботропних глутаматних рецепторів. Процес дегідратації та декарбоксілювання під час сушіння або низькотемпературної термічної обробки призводить до утворення *мусцимолу* – 3-гідроксі-5-амінометилізоксазолу, що є специфічним агоністом ГАМК(A)-рецепторів [14].

Таблиця 1

**Основні компоненти *Amanita muscaria* та їхній кількісний вміст**

№ з/п	Компонент	Вміст (свіжі плодові тіла), % або мг/г	Джерело
1.	Іботенова кислота (ИВО)	0,03-0,1% маси (≈ 300-1000 мг/кг)	Michelot & Melendez-Howell, 2003
2.	Мусцимол (MUS)	0,002-0,03% маси (20-300 мг/кг)	Patočka & Kocandrová, 2017

3.	Мусказон (MSZ)	слідові кількості (до 3-5 мг/кг)	Michelot & Melendez-Howell, 2003
4.	Ергостерол	~0,2-0,3% сухої маси	Wijesekara & Xu, 2025
5.	Амінокислоти (аланін, глутамат, аспарат)	0,5-1,2% сухої маси	Voynova et al., 2020
6.	Полісахариди	2-4% сухої маси	Grochowska et al., 2025
7.	Мінерали (K <sup>+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , Fe <sup>2+</sup> )	K <sup>+</sup> – до 350 мг/100 г; інші – у слідових кількостях	Grochowska et al., 2025

**Примітка:** У літературі значення можуть варіювати залежно від місця збору, стадії розвитку гриба та умов сушіння.

Сучасні молекулярні дослідження зробили значний прорив у розумінні біосинтезу іботенової кислоти. Зокрема, Obermaier та співавтори [11] виявили ген *глутамат-гідроксилази*, який ініціює ключовий початковий етап біосинтезу іботенової кислоти шляхом гідроксилювання глутамату.

У роботі було показано, що цей ген оточений іншими генами, які, ймовірно, утворюють генний кластер, що забезпечує синтез ізоксазольних метаболітів – іботенової кислоти й, можливо, мусцимолу. Це відкриває перспективи для можливого біотехнологічного отримання токсинів у контрольованих умовах.

Значний внесок у дослідження кількісного вмісту токсичних компонентів зробили праці Dushkov et al. [12]. Ними було застосовано високоефективну рідинну хроматографію для проведення аналізу гідроалкогольного екстракту *A. muscaria* та визначено вміст токсинів у різних тканинах гриба. Автори визначили концентрацію іботенової кислоти, мусцимолу та ергостеролу, а також дослідили залежність їхньої цитотоксичної активності від дозування на лініях клітин легень. Встановлено, що вміст мусцимолу може коливатися залежно від стадії росту гриба, умов довкілля та способу екстракції.

Сучасні спектрометричні аналізи, наведені у роботах [12,15,16], демонструють значні варіації у вмісті ізоксазольних сполук. Наприклад, концентрації іботенової кислоти можуть варіювати від 30 до понад 1000 мг/кг сухої маси, а мусцимолу – від 10 до понад 500 мг/кг. Такі коливання пов'язують не лише з екологічними умовами, а й з особливостями ферментативної системи гриба, що визначає інтенсивність перетворення іботенової кислоти в мусцимол.

За даними авторів [1], одна шапка середніх розмірів *A. muscaria* (50-70 г, свіжа маса) може містити близько 6 мг мусцимолу та до 70 мг іботенової кислоти, що демонструє високу варіабельність природного вмісту токсинів (табл. 2).

Таблиця 2

### Середній вміст біоактивних сполук у свіжих плодових тілах *Amanita muscaria*

(узагальнено за Michelot 2003; Dushkov 2023; Wijesekara 2025)

№ з/П	Сполука	Середня концентрація	Коментар
1.	Іботенова кислота	30-70 мг/г сухої маси	Найвищий вміст у шапці
2.	Мусцимол	5-10 мг/г сухої маси	Зростає після сушіння
3.	Ергостерол	0.5-1.5 мг/г	Антиоксидант
4.	Сліди мускарину	< 0.0003%	Токсикологічного значення не має

Також у оглядах літератури науковці підкреслюють [1,13], що мусцимол та іботенова кислота легко перетинають гематоенцефалічний бар'єр, що важливо для їхньої нейрофармакології.

Крім основних алкалоїдів, у складі гриба виявлено *мусказон*, який утворюється при фотохімічних перетвореннях іботенової кислоти, а також низку вторинних ізоксазол-дериватів, структура та функції яких ще недостатньо вивчені [3,6,17]. *Мускарин*, попри свою репутацію як «типової сполуки мухомора», насправді міститься у *A. muscaria* в мізерних кількостях і не відіграє провідної токсикологічної ролі [18].

У деяких експериментальних роботах також згадується [19], що *A. muscaria* містить величезну кількість біологічно активних сполук із доведеною антиоксидантною активністю: білки та пептиди (глутатіон та ерготіонеїн), фенольні сполуки (флавоноїди, лігнани, окислені поліфеноли, фенольні

кислоти, стильбени та таніни), вітаміни та похідні (аскорбінова кислота, ергостерол, токоферолі, каротиноїди) та мінерали (цинк та селен). Їхні антиоксидантні властивості та здатність поглинати вільні радикали були додатково продемонстровані в дослідженнях із використанням експериментальних моделей на тваринах з ураженням печінки [20].

Так, дослідження Dushkov et al. [12] підтверджує, що зокрема *ергостерол*, який у грибів відіграє структурну роль, також демонструє антиоксидантні властивості та може бути маркером загальної біологічної активності екстракту, а відтак становити цінність для фармацевтичної стандартизації.

Деякі дослідження *in vitro* вказують на можливу антиоксидантну та цитопротекторну активність низьких концентрацій екстракту *A. muscaria* [21], хоча ці дані не мають прямого клінічного застосування.

В *A. muscaria* забарвлення формується складною сумішшю пігментів. Жовтий колір забезпечують терфенілхіноніди сполуки – мускаруфін і мускалафін. Типовий червоно-оранжевий колір шапки гриба зумовлений беталаїнами, зокрема різними конденсатами беталамінової кислоти (мускапурпурин, мускааурини), що взаємодіють з амінокислотами, іботеновою або стизолобіновою кислотою [3]. Хроматографічно суміш пігментів поділено щонайменше на десять компонентів: помаранчеві мускааурини, жовтий мускалафін, червоно-фіолетовий мускапурпурин і червоний мускарубрин [22].

Окрему увагу привертають полісахариди, насамперед  $\beta$ -глюкани, які характерні для клітинної стінки грибів та притаманні більшості макроміцетів [23]. Із плодових тіл *A. muscaria* було виділено фукоманогалактан і  $\beta$ -D-глюкан із (1 $\rightarrow$ 3),(1 $\rightarrow$ 6)-зв'язками. Сучасні дослідження [24,25] доводять їхні потенційні біологічні властивості – знеболювальні, протизапальні та протипухлинні і потребують подальшого вивчення.

У сукупності це свідчить, що хімічний профіль *A. muscaria* значно ширший, ніж традиційно було відомо. Йдеться не просто про психоактивний гриб, а про складну хімічну систему, в якій ізоксазольні алкалоїди становлять лише один з ключових, але не єдиний елемент біологічної активності.

## 2. Токсикологічна характеристика компонентів *Amanita muscaria*

Токсикологічний профіль *A. muscaria* є складним і багатовекторним через поєднання протилежно спрямованих механізмів дії його компонентів на центральну нервову систему. Сучасні публікації свідчать, що ізоксазольні сполуки *A. muscaria* демонструють широкий спектр нейроактивних властивостей – від глутаматергічної стимуляції до потужного ГАМК-ергічного гальмування [6].

Головним чинником токсичності залишається іботенова кислота, яка є структурним аналогом глутамату, проявляє ексайтотоксичність, активуючи глутаматні NMDA-, AMPA-рецептори та кайнатні рецептори [3].

Механізм її дії подібний до глутамат-індукованого надмірного входження кальцію у нейрони, що запускає каскад процесів, пов'язаних з ушкодженням клітин, активацією  $\text{Ca}^{2+}$ -залежних протеаз, дисфункцією мітохондрій та генерацією активних форм кисню, ушкодженням мембран і розвитком оксидативного стресу та некротичних процесів [3,5].

Клінічно це може проявлятися через неврологічні розлади: гіперсомнію, пригніченість або, навпаки, психомоторне збудження. У тяжких випадках описані симптоми, що нагадують делірій із порушеннями орієнтації, сенсорними спотвореннями та міоклонічними судорогами [7,9].

У дослідях на тваринах показано [26-28], що введення іботенової кислоти викликає не лише загибель холінергічних нейронів, а й значну частину ГАМК-ергічних нейронів, тобто має селективний але широкий нейрональний токсичний ефект. Тому іботенова кислота широко застосовується як інструмент моделювання когнітивних порушень, характерних для хвороби Альцгеймера або деменцій.

*Мусцимол* є головним психоактивним компонентом гриба та діє як потужний селективний агоніст ГАМК(A)-рецепторів. Механізм дії включає: відкриття  $\text{Cl}^-$ -каналів, гіперполяризацію нейронів, зниження збудливості ЦНС [5].

Таким чином, мусцимол формує седативні, снодійні галюциногенні та дисоціативні нейропсихологічні ефекти. При передозуванні можливі пригнічення дихального центру, гіпорексія, гіпотермія, сонливість до ступору.

Нейрофармакологічно мусцимол демонструє профіль, подібний до бензодіазепінів, але з набагато вужчим терапевтичним діапазоном [17].

*Мусказон* утворюється при окисненні іботенової кислоти, є слабким ізоксазольним

модулятором та має значно нижчу токсичність. Його фармакологічна дія комбінує легкий глутаматергічний та гальмівний вплив, але він рідко чинить клінічно значимі ефекти [3].

Вивчення токсикологічних властивостей *A. muscaria* вказує на складність клінічної картини отруєння, що формується внаслідок протилежних механізмів дії його основних токсинів, а саме іботенової кислоти і мусцимолу. Поєднання цих двох протилежних нейромедіаторних впливів створює характерну для мухомора змінну та часто непередбачувану клінічну симптоматику (табл. 3).

Таблиця 3

**Порівняльна характеристика токсичності біоактивних сполук *Amanita muscaria***

Параметр	Іботенова кислота	Мусцимол	Мусказон
Основний механізм дії	Потужний ексайтотоксикант	Селективний ГАМК(А)-агоніст	Слабкий ізоксазольний модулюючий агент
Вплив на ЦНС	Надмірне збудження, ризик судом, делірій	Гальмування, психоактивність, седативний ефект	Помірна нейромодуляція
Рівень токсичності	Високий (структурні ушкодження нейронів)	Середній/низький (функціональна токсичність)	Низький
Механізм ризику	Ca <sup>2+</sup> -перевантаження, мітохондріальна дисфункція	Пригнічення дихання при високих дозах	Потенційне потенціювання ефектів MUS
Тип ураження	Структурне	Функціональне	Мінімальне
Клінічні ефекти та значущість	Судоми, делірій. Визначає тяжкі отруєння	Седация, галюцинації Зумовлює психотропний ефект	Легкі сенсорні зміни. Додатковий, але не ключовий внесок

*Імунологічні та цитотоксичні ефекти.* Нові дослідження звертають увагу на імунологічні наслідки впливу екстрактів *A. muscaria*. Наприклад, Wagner et al. [29] показали, що екстракт мухомора може підсилювати продукцію прозапальних цитокінів (наприклад, IL-8) у мікрогліальних клітинах, активованих dsRNA, що вказує на можливий прозапальний потенціал за певних умов.

Експерименти *in vitro*, спрямовані на оцінку цитотоксичності екстрактів мухомора, зокрема дослідження 2020 року [30,31], підтверджують, що суміш ізоксазольних алкалоїдів може викликати зниження мембранного потенціалу мітохондрій, підвищення рівня внутрішньоклітинного кальцію та активацію каспазного каскаду. У деяких випадках спостерігали некротичні зміни в залежності від концентрації сполук.

Виражені цитотоксичні властивості щодо пухлинних клітин продемонстровано в роботі [12,32], де екстракт гриба *A. muscaria* виявив дозозалежні ефекти проти ліній карциноми легень (NCI-H292), що відкриває нові напрями досліджень у онкології.

Істотним токсикологічним компонентом екстрактів може бути і ергостерол, який за певних умов метаболізу може формувати реактивні продукти окиснення. Хоча сам ергостерол не є токсином, його окиснені форми можуть впливати на клітинні мембрани та викликати порушення їхньої цілісності [6].

Описані останніми роками випадки отруєнь демонструють зростання частоти побічних ефектів, зумовлених вживанням неперевіраних екстрактів та капсульованих продуктів з *A. muscaria* [9,10]. У більшості випадків пацієнти відзначали розвиток нудоти, тремору, дисфорії, дезорієнтації та епізодів короткотривалих психозів.

Ця тенденція набуває особливої актуальності, зважаючи на те, що юридичний статус ізоксазольних речовин у більшості європейських країн є досить ліберальним, а контроль за продуктами на їх основі практично відсутній [6]. Зафіксовано також збільшення появи рекреаційних споживачів, які сприймають мухомор як «природну альтернативу» психоактивним препаратам, при тому що його токсичний профіль і поведінкова фармакологія залишаються недостатньо вивченими.

Таким чином, токсикологічна характеристика *A. muscaria* свідчить про складну взаємодію кількох активних компонентів, що поєднують як ексайтотоксичні, так і седативні властивості, що визначає непередбачуваність клінічних проявів отруєння.

### 3. Потенційні напрями медичного застосування отруту *Amanita muscaria*

Попри токсичність, ізоксазольні алкалоїди *A. muscaria* мають значний фармакологічний

потенціал та привертають увагу дослідників у низці перспективних напрямів. Мусцимол, завдяки високій спорідненості до рецепторів ГАМК(A), є одним із найбільш селективних природних агоністів цієї системи. Його унікальний механізм дії дає підстави використовувати його як модельну сполуку у нейрофармакології, але також відкриває потенціал для створення нових лікарських засобів, зокрема седативних, проти тривожних і снодійних препаратів [6,7,13].

У дослідженнях на тваринах продемонстровано його здатність зменшувати нейрональну гіперактивність, індукувати стійкий седативний ефект та виявляти нейропротекторні властивості [6,17,33]. Деякі автори припускають [34], що мусцимол може бути корисним у лікуванні епілепсії, тривожних розладів і порушень сну, хоча клінічні дослідження на людях поки що обмежені.

Перспективними є також дані [35], що свідчать про можливу участь ізоксазольних сполук у модулюванні нейрозапальних процесів. Окремі компоненти *A. muscaria*, зокрема ергостерол і деякі фракції полісахаридів, можуть чинити протизапальний та імуномодулюючий ефекти, що підтверджено результатами експериментів *in vitro* [12,29,36]. Крім того, виявлено певний цитотоксичний вплив екстрактів гриба на окремі ракові клітинні лінії [12], що відкриває можливість їх використання в онкофармакології, хоча ці дані поки попередні й потребують підтвердження в моделях *in vivo*.

Полісахариди *A. muscaria*, зокрема  $\beta$ -глюкани, також становлять інтерес у фармацевтичному контексті. Відомо [37,38], що  $\beta$ -глюкани грибів мають імуномодулюючі властивості, а отже можуть стати компонентами імунопротекторних засобів або ад'ювантів у складі вакцин.

Окреме місце займає питання нейропротекції та можливого застосування компонентів *A. muscaria* у лікуванні нейродегенеративних захворювань. У роботах Dai et al. показано [33], що мусцимол може модулювати активність нейрональних мереж і сприяти зменшенню гіперактивації, характерної для когнітивних порушень. У поєднанні з дослідженнями Patočka & Kocandrlová [5] ці дані дають підстави припускати можливе використання мусцимолу у терапії хвороби Паркінсона, хвороби Альцгеймера, епілептичних розладів та нейрозапалення.

Іншим напрямом є використання мусцимолу у психіатрії. Його здатність знижувати тривожність та інгібувати надмірну активність таламо-кортикальних шляхів може бути корисною при генералізованому тривожному розладі, обсессивно-компульсивних станах та хронічному безсонні [39,40]. Однак клінічне застосування стримується токсичністю вихідної сполуки, тому сучасні дослідження зосереджені на розробці її похідних зі зниженою токсичністю.

У геронтології мусцимол та ергостерол розглядаються як потенційні нейрозахисні та антиоксидантні засоби, здатні зменшувати вікові зміни когнітивних функцій [41]. В експериментальних моделях гриби роду *Amanita* продемонстрували здатність зменшувати системний оксидативний стрес [42], що становить перспективу для створення засобів уповільнення старіння нервової тканини.

Розвиток фармакологічних підходів до застосування компонентів мухомора значною мірою залежить від удосконалення методів стандартизації та очищення. Дослідження останніх років [12] демонструють значний прогрес у кількісному визначенні іботенової кислоти, мусцимолу та ергостеролу в екстрактах, що є ключовою передумовою створення контрольованих лікарських форм. Саме відсутність стандартизації є однією з основних проблем, які сьогодні перешкоджають безпечному фармакологічному застосуванню цих речовин.

Разом з тим, перспективи відкривають і синтетичні підходи до створення структурних аналогів мусцимолу з модифікованими фармакокінетичними властивостями, що могли б забезпечити нижчу токсичність і більш передбачуваний профіль дії. У цьому контексті потребують подальшого розвитку молекулярні дослідження взаємодії мусцимолу з різними субтипами рецепторів ГАМК, які можуть слугувати основою для таргетного створення нових фармакологічних засобів.

Узагальнюючи сучасні дані, можна стверджувати, що *A. muscaria* представляє собою унікальне джерело біоактивних сполук, здатних впливати на широкий спектр нейрофізіологічних процесів. Хоча його токсичність і непередбачуваність дії істотно обмежують безпосереднє використання грибних препаратів. Тоді як окремі ізольовані або модифіковані компоненти, а саме мусцимол, ергостерол та інші метаболіти, мають перспективи застосування в нейрофармакології, психіатрії, лікуванні запальних і онкологічних процесів. Водночас, клінічні дослідження поки що знаходяться на ранніх етапах, а тому говорити про практичні фармацевтичні застосування можна лише в майбутньому за умови проведення ретельних токсикологічних, фармакокінетичних та клінічних випробувань.

#### **Висновки.**

Компоненти гриба *Amanita muscaria* становлять значний науковий інтерес, оскільки

поєднують токсичні властивості з потенційною фармакологічною цінністю. Наявні дані переконують, що мусцимол і пов'язані з ним ізоксазолні алкалоїди можуть слугувати основою майбутніх нейрофармакологічних засобів. Проте, клінічне використання потребує стандартизації екстрактів, синтезу безпечніших аналогів та ретельного токсикологічного контролю. Подальші дослідження мають бути спрямовані на розробку стабільних формул, вивчення довготривалої безпеки та пошук молекулярних мішеней для таргетної терапії.

**Авторська декларація.** Автори декларують відсутність плагіату, конфлікту інтересів та джерел зовнішнього фінансування відносно цієї статті.

#### **Внески авторів.**

Бевзо В.В. – пошук джерел літератури, проведення порівняльного аналізу та збір даних, підготовка матеріалів до друку, написання робочого варіанту тексту.

Тураш М.М. – консультація з приводу дизайну дослідження та інтерпретації даних, редагування остаточного варіанту тексту.

#### **Література**

- Carboué Q, Lopez M. Amanita muscaria: ecology, chemistry, myths. Encyclopedia. 2021;1(3):905-14. doi:10.3390/encyclopedia1030069
- Pięta-Chrystofiak M, Brohs D. Red fly agaric (amanita muscaria) consumption among members of Internet discussion groups. Studia Paedagogica Ignatiana. 2023;6(2):95-221. doi:10.12775/SPI.2023.2.009
- Michelot D, Melendez-Howell L. Amanita muscaria: chemistry, biology, toxicology, and ethnomycology. Mycological Research. 2003;107(2):131-46. doi:10.1017/S0953756203007305
- Winkelman M. Amanita muscaria: Fly Agaric history, mythology and pharmacology. J. Psychedelic Stud. 2022;6(1):1-4. doi:10.1556/2054.2022.00216
- Patočka J, Kocandrová B. Pharmacologically and toxicologically relevant components of Amanita muscaria. Mil. Med. Sci. Lett. 2017;86(3):122-34. doi:10.31482/mmsl.2017.020
- Voynova M, Shkondrov A, Kondeva-Burdina M, Krasteva I. Toxicological and pharmacological profile of Amanita muscaria (L.) Lam. – a new rising opportunity for biomedicine. Pharmacia. 2020;67(4):317-23. doi:10.3897/pharmacia.67.e56112
- Grochowska J, Weiner M. Harmfulness and potential health benefits of the fly agaric (Amanita muscaria): a literature review. Health Prob Civil. 2025;19(1):95-106. doi:10.5114/hpc.2025.146651
- Milojevic S, Milena G Milutinović, D, Kosanić M, Kragujevac J. Exploring Amanita muscaria (L.) Lam.: Cytotoxic, proapoptotic and antiapoptotic effect of acetone extract on JAR choriocarcinoma cell line Kragujevac Journal of Science. 2024;46:121-35. doi:10.5937/KgJSci2401121M
- Savickaitė E, Laubner-Sakalauskienė G. Emerging risks of Amanita muscaria: case reports on increasing consumption and health risks. Acta Med Litu. 2025;32(1):182-9. doi:10.15388/Amed.2025.32.1.23
- Ordak M, Galazka A, Nasierowski T, Muszynska E, Magdalena Bujalska-Zadrozny, et al. Reasons, form of ingestion and side effects associated with consumption of Amanita muscaria. Toxics. 2023;11(4):383. doi:10.3390/toxics11040383
- Obermaier S, Müller M. Ibotenic Acid Biosynthesis in the Fly Agaric Is Initiated by Glutamate Hydroxylation. Angew. Chem. Int. Ed. 2020;59(30):12432-5. doi:10.1002/anie.202001870
- Dushkov A, Vosáhlová Z, Tzintzarov A, Kalíková K, Křížek T, Ugrinova I, et al. Analysis of the ibotenic acid, muscimol, and ergosterol content of an amanita muscaria hydroalcoholic extract with an evaluation of its cytotoxic effect against a panel of lung cell lines in vitro. Molecules. 2023;28(19):6824. doi:10.3390/molecules28196824
- Wijesekara T, Xu B. Insights into therapeutic potential and practical applications of natural toxins from poisonous mushrooms. Human and Experimental Toxicology. 2025;44(1):1-17. doi:10.1177/09603271251323134
- Cruces W, Okhovat A, Docampo-Palacios M, Ray KP, Ramirez GA, et al. Psychoactive Isoxazoles, Muscimol and Isoxazole derivatives from the Amanita (Agaricomycetes) Species. New Trends in Synthesis, Dosage, and Biological Properties: A Review. Int J of Med Mushrooms. 2023;25(9):1-10. doi:10.1615/IntJMedMushrooms.2023049458
- Barbosa I, Domingues C, Ramos F, Barbosa RM. Analytical methods for amatoxins: A comprehensive review. J Pharm Biomed Anal. 2023;232(5):115421. doi:10.1016/j.jpba.2023.115421
- Liyang H, Xiaoqin T, Jian Z, Yang Q, Li L. Determination of five amanita peptide toxins in poisonous mushrooms by ultra performance liquid chromatography quadrupole electrostatic field orbitrap high resolution mass spectrometry. Chin J Chromatogr. 2023;41(1):94-103. doi:10.3724/SP.J.1123.2022.03010
- Okhovat A, Cruces W, Docampo-Palacios M, Ray K, Ramirez GA. Psychoactive isoxazoles, muscimol, and isoxazole derivatives from the Amanita (Agaricomycetes) species: review of new trends in synthesis, dosage, and biological properties. Int. J. Med. Mushrooms. 2023; 25(1): 1-10. doi:10.1615/IntJMedMushrooms.2023049458
- Dörner S, Trottmann F, Jordan PM, Rogge K, Bartels B, Werz O. The fatal mushroom neurotoxin muscarine is released from a harmless phosphorylated precursor upon cellular injury. Angew. Chem. Int. Ed. Engl. 2024;63(52):1-7 doi:10.1002/anie.202417220
- Tapan E, Süfer Ö, Taşkin H, Assyov B. Antioxidant activities of some edible and poisonous Amanita species from Türkiye. Biol Bull Russ Acad Sci. 2024;51:1662-70. doi:10.1134/S1062359023603105

20. Wang S, Xiang Y, Zhu J, Li J, Liu C, Yi F. Protective roles of hepatic GABA signaling in acute liver injury of rats. *Am. J. Physiol. Gastrointest. Liver Physiol.* 2017;312(3):208-18. doi:10.1152/ajpgi.00344.2016
21. Voynova M, Shkondrov A, Krasteva I, Magdalena Kondeva-Burdina. In vitro effects of synthetic muscimol and an extract from *Amanita muscaria* on human recombinant MAOB enzyme. *Pharmacia.* 2021; 68(1): 147-50. doi:10.3897/pharmacia.68.e60705
22. Stintzing F, Schliemann W. Pigments of fly agaric (*Amanita muscaria*). *Zeitschrift Für Naturforschung.* 2007;62(11-12): 779-85. doi:10.1515/znc-2007-11-1201
23. Ruthes AC, Smiderle FR, Iacomini M. D-glucans from edible mushrooms: a review on the extraction, purification and chemical characterization approaches. *Carbohydr Polym.* 2015;117(1):753-61. doi:10.1016/j.carbpol.2014.10.051
24. Chan G, Chan W, Sze D. The effects of betaglucan on human immune and cancer cells. *J Hematol Oncol.* 2009;2:25. doi:10.1186/1756-8722-2-25
25. Ruthes A, Carbonero E, Córdova M, Baggio CH, Sasaki GL, Gorin PA. Fucomannogalactan and glucan from mushroom *Amanita muscaria*: structure and inflammatory pain inhibition. *Carbohydr Polym.* 2013;98(1):761-9. doi:10.1016/j.carbpol.2013.06.061
26. Wenk GL. A primate model of Alzheimer's disease. *Behav Brain Res.* 1993;57(2):117-22. doi:10.1016/0166-4328(93)90127-C
27. Kolobov VV, Storozheva ZI. Modern pharmacological models of Alzheimer's disease. *Ann Clin Exp Neurol.* 2014;8(3):38-44. doi:10.17816/psaic173
28. Karthick C, Periyasamy S, Jayachandran KS, Anusuyadevi M. Intrahippocampal administration of ibotenic acid induced cholinergic dysfunction via NR2A/NR2B expression: implications of resveratrol against Alzheimer disease pathophysiology. *Front Mol Neurosci.* 2016;9:28-40. doi:10.3389/fnmol.2016.00028
29. Wagner A, Pehar M, Yan Z, Kulka M. *Amanita muscaria* extract potentiates production of proinflammatory cytokines by dsRNA-activated human microglia. *Frontiers in Pharmacology.* 2023;14:1102465. doi:10.3389/fphar.2023.1102465
30. Kondeva-Burdina M, Voynova M, Shkondrov A, Aluani D, Tzankova V, Krasteva I. Effects of *Amanita muscaria* extract on different in vitro neurotoxicity models at sub-cellular and cellular levels. *Food Chem. Toxicol.* 2019;132. doi:10.1016/j.fct.2019.110687
31. Ito Y, Ito M, Takagi N, Saito H, Ishige K. Neurotoxicity induced by amyloid beta-peptide and ibotenic acid in organotypic hippocampal cultures: protection by S-allyl-L-cysteine, a garlic compound. *Comparative Study Brain Res.* 2003;985(1):98-107. doi:10.1016/s0006-8993(03)03173-1
32. Wang WJ, Wu YS, Chen S, Liu CF, Chen SN. Mushroom  $\beta$ -glucan may immunomodulate the tumor associated macrophages in the Lewis Lung Carcinoma. *Bio Med Res Int.* 2015;(604385):15. doi:10.1155/2015/604385
33. Dai R, Duan Z, Han B, Chen G, Wang F, Shi Z. Preliminary study on the time-correlation changes in brain neurotransmitters of mice exposed to mushroom toxin ibotenic acid. *Front. Neurosci.* 2025;19:1561291. doi:10.3389/fnins.2025.1561291
34. Jamieson CS, Misa J, Tang Y, Billingsley JM. Biosynthesis and synthetic biology of psychoactive natural products. *Chem Soc Rev.* 2021;50(12):6950-7008. doi:10.1039/d1cs00065a
35. Zimecki M, Bąchor U, Mączyński M. Isoxazole derivatives as regulators of immune functions. *Molecules.* 2018;23(10):2724. doi:10.3390/molecules23102724
36. Rowaiye A, Wilfred OI, Onuh OA, Olobayotan I. Modulatory effects of mushrooms on the inflammatory signaling pathways and pro-inflammatory mediators. *Clin. Complement. Med. Pharmacol.* 2022;2(4): doi:10.1016/j.ccmp.2022.100037
37. Jin Y, Li P, Wang F.  $\beta$ -glucans as potential immunoadjuvants: a review on the adjuvanticity, structure-activity relationship and receptor recognition properties. *Vaccine.* 2018;36(35):5235-44. doi:10.1016/j.vaccine.2018.07.038
38. Zhong X, Wang G, Li F, Fang S, Zhou S, Ishiwata A. Immunomodulatory Effect and Biological Significance of  $\beta$ -Glucans. *Pharmaceutics.* 2023;15(6):1615. doi:10.3390/pharmaceutics15061615
39. Johnston GA. Muscimol as an ionotropic GABA receptor agonist. *Neurochem Res.* 2014; 39(10): 1942-7. doi:10.1007/s11064-014-1245-y
40. Akk G, Germann A, Sugasawa Y, Pierce SR, Evers AS, Steinbach J. Enhancement of muscimol binding and gating by allosteric modulators of the GABAA receptor: relating occupancy to state functions. *Mol Pharmacol.* 2020;98(4):303-13. doi:10.1124/mol.120.000066
41. Rangsinth P, Sharika R, Pattarachotanant N, Sillapachaiyaporn C, Duangjan C, Wongwan C. Potential beneficial effects and pharmacological properties of ergosterol, a common bioactive compound in edible mushrooms. *Foods.* 2023;12(13):2529. doi:10.3390/foods12132529
42. Liuzzi GM, Petraglia T, Latronico T, Crescenzi A, Rossano R. Antioxidant compounds from edible mushrooms as potential candidates for treating age-related neurodegenerative diseases. *Nutrients.* 2023;15(8):1913. doi:10.3390/nu15081913

#### References

1. Carboué Q, Lopez M. *Amanita muscaria*: ecology, chemistry, myths. *Encyclopedia.* 2021;1(3):905-14. doi:10.3390/encyclopedia1030069

2. Pięta-Chrystofiak M, Brohs D. Red fly agaric (*Amanita muscaria*) consumption among members of Internet discussion groups. *Studia Paedagogica Ignatiana*. 2023;6(2):95-221. doi:10.12775/SPI.2023.2.009
3. Michelot D, Melendez-Howell L. *Amanita muscaria*: chemistry, biology, toxicology, and ethnomycology. *Mycological Research*. 2003;107(2):131-46. doi:10.1017/S0953756203007305
4. Winkelman M. *Amanita muscaria*: Fly Agaric history, mythology and pharmacology. *J. Psychedelic Stud*. 2022;6(1):1-4. doi:10.1556/2054.2022.00216
5. Patočka J, Kocandrlová B. Pharmacologically and toxicologically relevant components of *Amanita muscaria*. *Mil. Med. Sci. Lett*. 2017;86(3):122-34. doi:10.31482/mmsl.2017.020
6. Voynova M, Shkondrov A, Kondeva-Burdina M, Krasteva I. Toxicological and pharmacological profile of *Amanita muscaria* (L.) Lam. – a new rising opportunity for biomedicine. *Pharmacia*. 2020;67(4):317-23. doi:10.3897/pharmacia.67.e56112
7. Grochowska J, Weiner M. Harmfulness and potential health benefits of the fly agaric (*Amanita muscaria*): a literature review. *Health Prob Civil*. 2025;19(1):95-106. doi:10.5114/hpc.2025.146651
8. Milojevic S, Milena G Milutinović, D, Kosanić M, Nikodijević D. Exploring *Amanita muscaria* (L.) Lam.: Cytotoxic, proapoptotic and antiferroptotic effect of acetone extract on JAR choriocarcinoma cell line Kragujevac *Journal of Science*. 2024;46:121-35. doi:10.5937/KgJSci2401121M
9. Savickaitė E, Laubner-Sakalauskienė G. Emerging risks of *Amanita muscaria*: case reports on increasing consumption and health risks. *Acta Med Litu*. 2025;32(1):182-9. doi:10.15388/Amed.2025.32.1.23
10. Ordak M, Galazka A, Nasierowski T, Muszynska E, Magdalena Bujalska-Zadrozny, et al. Reasons, form of ingestion and side effects associated with consumption of *Amanita muscaria*. *Toxics*. 2023;11(4):383. doi:10.3390/toxics11040383
11. Obermaier S, Müller M. Ibotenic Acid Biosynthesis in the Fly Agaric Is Initiated by Glutamate Hydroxylation. *Angew. Chem. Int. Ed*. 2020;59(30):12432-5. doi:10.1002/anie.202001870
12. Dushkov A, Vosáhlková Z, Tzintzarov A, Kalíková K, Křížek T, Ugrinova, I et al. Analysis of the ibotenic acid, muscimol, and ergosterol content of an *Amanita muscaria* hydroalcoholic extract with an evaluation of its cytotoxic effect against a panel of lung cell lines in vitro. *Molecules*. 2023;28(19):6824. doi:10.3390/molecules28196824
13. Wijesekara T, Xu B. Insights into therapeutic potential and practical applications of natural toxins from poisonous mushrooms. *Human and Experimental Toxicology*. 2025;44(1):1-17. doi:10.1177/09603271251323134
14. Cruces W, Okhovat A, Docampo-Palacios M, et al. Psychoactive Isoxazoles, Muscimol and Isoxazole derivatives from the *Amanita* (Agaricomycetes) Species. *New Trends in Synthesis, Dosage, and Biological Properties: A Review*. *Int J of Med Mushrooms*. 2023;25(9):1-10. doi:10.1615/IntJMedMushrooms.2023049458
15. Barbosa I, Domingues C, Ramos F, Barbosa RM. Analytical methods for amatoxins: A comprehensive review. *J Pharm Biomed Anal*. 2023;232(5):115421. doi:10.1016/j.jpba.2023.115421
16. Liying H, Xiaoqin T, Jian Z, Yang Q, Li L. Determination of five *Amanita* peptide toxins in poisonous mushrooms by ultra performance liquid chromatography quadrupole electrostatic field orbitrap high resolution mass spectrometry. *Chin J Chromatogr*. 2023;41(1):94-103. doi:10.3724/SP.J.1123.2022.03010
17. Okhovat A, Cruces W, Docampo-Palacios M, Ray K, Ramirez GA. Psychoactive isoxazoles, muscimol, and isoxazole derivatives from the *Amanita* (Agaricomycetes) species: review of new trends in synthesis, dosage, and biological properties. *Int. J. Med. Mushrooms*. 2023; 25(1): 1-10. doi:10.1615/IntJMedMushrooms.2023049458
18. Dörner S, Trottmann F, Jordan PM, Rogge K, Bartels B, Werz O. The fatal mushroom neurotoxin muscarine is released from a harmless phosphorylated precursor upon cellular injury. *Angew. Chem. Int. Ed. Engl*. 2024;63(52):1-7 doi:10.1002/anie.202417220
19. Tapan E, Süfer Ö, Taşkin H, Assyov B. Antioxidant activities of some edible and poisonous *Amanita* species from Türkiye. *Biol Bull Russ Acad Sci*. 2024;51:1662-70. doi:10.1134/S1062359023603105
20. Wang S, Xiang Y, Zhu J, Li J, Liu C, Yi F. Protective roles of hepatic GABA signaling in acute liver injury of rats. *Am. J. Physiol. Gastrointest. Liver Physiol*. 2017;312(3):208-18. doi:10.1152/ajpgi.00344.2016
21. Voynova M, Shkondrov A, Krasteva I, Magdalena Kondeva-Burdina. In vitro effects of synthetic muscimol and an extract from *Amanita muscaria* on human recombinant MAOB enzyme. *Pharmacia*. 2021; 68(1): 147-50. doi:10.3897/pharmacia.68.e60705
22. Stintzing F, Schliemann W. Pigments of fly agaric (*Amanita muscaria*). *Zeitschrift Für Naturforschung*. 2007;62(11-12): 779-85. doi:10.1515/znc-2007-11-1201
23. Ruthes AC, Smiderle FR, Iacomini M. D-glucans from edible mushrooms: a review on the extraction, purification and chemical characterization approaches. *Carbohydr Polym*. 2015;117(1):753-61. doi:10.1016/j.carbpol.2014.10.051
24. Chan G, Chan W, Sze D. The effects of betaglucan on human immune and cancer cells. *J Hematol Oncol*. 2009;2:25. doi:10.1186/1756-8722-2-25
25. Ruthes A, Carbonero E, Córdova M, Baggio CH, Sasaki GL, Gorin PA. Fucomannogalactan and glucan from mushroom *Amanita muscaria*: structure and inflammatory pain inhibition. *Carbohydr Polym*. 2013;98(1):761-9. doi:10.1016/j.carbpol.2013.06.061
26. Wenk G. A primate model of Alzheimer's disease. *Behav Brain Res*. 1993;57(2):117-22. doi:10.1016/0166-4328(93)90127-C
27. Kolobov VV, Storozheva ZI. Modern pharmacological models of Alzheimer's disease. *Ann Clin Exp Neurol*. 2014;8(3):38-44. doi:10.17816/psaic173

28. Karthick C, Periyasamy S, Jayachandran KS, Anusuyadevi M. Intrahippocampal administration of ibotenic acid induced cholinergic dysfunction via NR2A/NR2B expression: implications of resveratrol against Alzheimer disease pathophysiology. *Front Mol Neurosci.* 2016;9:28-40. doi:10.3389/fnmol.2016.00028
29. Wagner A, Pehar M, Yan Z, Kulka M. Amanita muscaria extract potentiates production of proinflammatory cytokines by dsRNA-activated human microglia. *Frontiers in Pharmacology.* 2023;14:1102465. doi:10.3389/fphar.2023.1102465
30. Kondeva-Burdina M, Voynova M, Shkondrov A, Aluani D, Tzankova V, Krasteva I. Effects of Amanita muscaria extract on different in vitro neurotoxicity models at sub-cellular and cellular levels. *Food Chem. Toxicol.* 2019;132. doi:10.1016/j.fct.2019.110687
31. Ito Y, Ito M, Takagi N, Saito H, Ishige K. Neurotoxicity induced by amyloid beta-peptide and ibotenic acid in organotypic hippocampal cultures: protection by S-allyl-L-cysteine, a garlic compound. *Comparative Study Brain Res.* 2003;985(1):98-107. doi:10.1016/s0006-8993(03)03173-1
32. Wang WJ, Wu YS, Chen S, Liu CF, Chen SN. Mushroom  $\beta$ -glucan may immunomodulate the tumor associated macrophages in the Lewis Lung Carcinoma. *Bio Med Res Int.* 2015;(604385):15. doi:10.1155/2015/604385
33. Dai R, Duan Z, Han B, Chen G, Wang F, Shi Z. Preliminary study on the time-correlation changes in brain neurotransmitters of mice exposed to mushroom toxin ibotenic acid. *Front. Neurosci.* 2025;19:1561291. doi:10.3389/fnins.2025.1561291
34. Jamieson CS, Misa J, Tang Y, Billingsley JM. Biosynthesis and synthetic biology of psychoactive natural products. *Chem Soc Rev.* 2021;50(12):6950-7008. doi:10.1039/d1cs00065a
35. Zimecki M, Baçhor U, Mączyński M. Isoxazole derivatives as regulators of immune functions. *Molecules.* 2018;23(10):2724. doi:10.3390/molecules23102724
36. Rowaiye A, Wilfred OI, Onuh OA, Olobayotan I. Modulatory effects of mushrooms on the inflammatory signaling pathways and pro-inflammatory mediators. *Clin. Complement. Med. Pharmacol.* 2022;2(4): doi:10.1016/j.ccmp.2022.100037
37. Jin Y, Li P, Wang F.  $\beta$ -glucans as potential immunoadjuvants: a review on the adjuvanticity, structure-activity relationship and receptor recognition properties. *Vaccine.* 2018;36(35):5235-44. doi:10.1016/j.vaccine.2018.07.038
38. Zhong X, Wang G, Li F, Fang S, Zhou S, Ishiwata A. Immunomodulatory Effect and Biological Significance of  $\beta$ -Glucans. *Pharmaceutics.* 2023;15(6):1615. doi:10.3390/pharmaceutics15061615
39. Johnston GA. Muscimol as an ionotropic GABA receptor agonist. *Neurochem Res.* 2014; 39(10): 1942-7. doi:10.1007/s11064-014-1245-y
40. Akk G, Germann A, Sugawara Y, Pierce SR, Evers AS, Steinbach J. Enhancement of muscimol binding and gating by allosteric modulators of the GABAA receptor: relating occupancy to state functions. *Mol Pharmacol.* 2020;98(4):303-13. doi:10.1124/mol.120.000066
41. Rangsinth P, Sharika R, Pattarachotanan N, Sillapachaiyaporn C, Duangjan C, Wongwan C. Potential beneficial effects and pharmacological properties of ergosterol, a common bioactive compound in edible mushrooms. *Foods.* 2023;12(13):2529. doi:10.3390/foods12132529
42. Liuzzi GM, Petraglia T, Latronico T, Crescenzi A, Rossano R. Antioxidant compounds from edible mushrooms as potential candidates for treating age-related neurodegenerative diseases. *Nutrients.* 2023;15(8):1913. doi:10.3390/nu15081913

**Відомості про авторів:**

**Бевзо Валентина Вікторівна** – кандидат біологічних наук, доцент; доцент закладу вищої освіти кафедри біоорганічної і біологічної хімії та клінічної біохімії Буковинського державного медичного університету; вул. П. Целана 1 кв 9, м.Чернівці, 58001, номер телефону: 0953393471, e-mail: bevo.valentya@bsmu.edu.ua

ORCID <http://orcid.org/0000-0001-5742-008X>; ResearcherID GWV-4259-2022; Scopus Author ID: 6505881133

**Тураш Микола Миколайович** – кандидат хімічних наук, доцент; доцент закладу вищої освіти кафедри біоорганічної і біологічної хімії та клінічної біохімії Буковинського державного медичного університету; вул. Головна, 104/5, м.Чернівці, 58005, номер телефону: 0503741249, e-mail: turash.m@bsmu.edu.ua; ORCID <https://orcid.org/0000-0001-6430-9160>; Scopus Author ID: 6505581088

**Information about authors:**

**Valentya Bevo** – Candidate of Biological Sciences, Associate Professor; Associate Professor of the Department of Bioorganic and Biological Chemistry and Clinical Biochemistry of the Bukovinian State Medical University; tel.: 0953393471, e-mail: bevo.valentya@bsmu.edu.ua, ORCID <http://orcid.org/0000-0001-5742-008X>, ResearcherID GWV-4259-2022, Scopus Author ID: 6505881133.

**Mykola Turash** – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Department of Bioorganic and Biological Chemistry and Clinical Biochemistry, Bukovinian State Medical University", Address: Golovna street, 104/5, Chernivtsi, 58005 Tel.: 0503741249; e-mail: turash.m@bsmu.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6430-9160> Scopus Author ID: 6505581088

Надійшло до редакції 06.02.2026 р.  
Прорецензовано 27.02.2026 р.  
Прийнято до друку 20.04.2026 р.