

Науковий вісник Львівського національного університету
ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького.
Серія: Ветеринарні науки

Scientific Messenger of Lviv National University
of Veterinary Medicine and Biotechnologies.
Series: Veterinary sciences

ISSN 2518–7554 print
ISSN 2518–1327 online

doi: 10.32718/nvlvet11926
<https://nvlvet.com.ua/index.php/journal>

UDC 636.09:612.015.3:546.47

Physiological role of magnesium in the animal body: biochemical mechanisms and clinical significance

V. O. Danchuk¹, V. I. Karpovskiy¹✉, O. V. Danchuk², V. V. Danchuk^{2,3}, M. G. Chesak², B. V. Gutyj⁴,
P. V. Karpovskiy¹, V. V. Karpovskiy⁵, V. B. Todoriuk⁶

¹National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²Institute of Climate-Smart Agriculture of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, village Khlivodarske, Odesa district, Odesa region, Ukraine

³Higher Educational Institution “Podillia State University”, Kamianets-Podilskiy, Ukraine

⁴Stepan Gzhytskyi National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies, Lviv, Ukraine

⁵Odesa State Agrarian University, Odesa, Ukraine

⁶Institute of Animal Biology of NAAS, Lviv, Ukraine

Article info

Received 02.07.2025

Received in revised form

05.08.2025

Accepted 06.08.2025

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Heroiv Oborony Str. 15 building 3, Kyiv, 03041, Ukraine.
Tel.: +38-098-423-96-07
E-mail: karpovskiy@meta.ua

Institute of Climate-Smart Agriculture of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, Mayatska Road Str., 24, village Khlivodarske, Odesa district, Odesa region, 67667, Ukraine.

Higher Educational Institution “Podillia State University”, Shevchenko Str., 12, Kamianets-Podilskiy, Khmelnytskyi region, Ukraine, 32316.

Stepan Gzhytskyi National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies Lviv, Pekarska Str., 50, Lviv, 79010, Ukraine.

Odesa State Agrarian University, Panteleimonovskaya Str., 1, Odesa, 65012, Ukraine.

Institute of Animal Biology of NAAS, V. Stus Str., 38, Lviv, 79034, Ukraine.

Danchuk, V. O., Karpovskiy, V. I., Danchuk, O. V., Danchuk, V. V., Chesak, M. G., Gutyj, B. V., Karpovskiy, P. V., Karpovskiy, V. V., & Todoriuk, V. B. (2025). Physiological role of magnesium in the animal body: biochemical mechanisms and clinical significance. Scientific Messenger of Lviv National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Veterinary sciences, 27(119), 185–194. doi: 10.32718/nvlvet11926

Magnesium is one of the most important biologically active elements involved in numerous physiological and metabolic processes in the animal body. The article is devoted to a detailed analysis of the physiological role of magnesium, the mechanisms of its participation in enzymatic reactions, energy metabolism, maintenance of structural stability of cell membranes, and ensuring the integrity and repair of DNA. Particular attention is given to its functions in regulating the activity of the nervous and cardiovascular systems, as well as to the role of magnesium as a physiological antagonist of calcium, which significantly influences the excitability of nerve cells and contraction of muscle fibers. The symptoms and consequences of magnesium deficiency in animals are considered, among which the most critical are disturbances in neuromuscular transmission, muscle fasciculations, convulsions, cardiovascular pathologies such as arrhythmias and hypertension, as well as endocrine disorders. A special focus is given to the analysis of the causes of grass tetany development. The importance of maintaining magnesium balance for the prevention of hypomagnesemia and its negative consequences has been established. In addition, the less common but clinically significant problem of hypermagnesemia is discussed. The factors contributing to its occurrence are highlighted, the most frequent being kidney diseases and uncontrolled use of magnesium-containing drugs and supplements. A separate emphasis is placed on the analysis of modern approaches to ensuring the optimal level of magnesium in feeds for various species of farm animals – pigs, poultry, and ruminants. Different sources of magnesium (magnesium oxide, carbonate, and sulfate) are evaluated, and their effectiveness and practical feasibility in improving animal productivity and product quality are established. The importance of regular monitoring of magnesium levels in feed and the need for specialized magnesium supplements to maintain optimal physiological status in animals are emphasized. Promising directions for further research are proposed, including the use of innovative technologies such as nanotechnology to create effective forms of magnesium preparations aimed at enhancing stress resistance, animal productivity, and improving the functional state of the autonomic nervous system.

Key words: magnesium, microelements, metabolism, nervous system, cardiovascular system, feed additives, animal productivity.

Фізіологічна роль магнію в організмі тварин: біохімічні механізми та клінічне значення

В. О. Данчук¹, В. І. Карповський^{1✉}, О. В. Данчук², В. В. Данчук^{2,3}, М. Г. Чесак², Б. В. Гутий⁴, П. В. Карповський¹, В. В. Карповський⁵, В. Б. Тодорюк⁶

¹Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

²Інститут кліматично орієнтованого сільськогосподарства НААН, м. Одеса, Україна

³Заклад вищої освіти "Подільський державний університет", м. Кам'янець-Подільський, Україна

⁴Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького, м. Львів, Україна

⁵Одеський державний аграрний університет, м. Одеса, Україна

⁶Інститут біології тварин НААН, м. Львів, Україна

Магній є одним із найважливіших біологічно активних елементів, що бере участь у численних фізіологічних і метаболічних процесах організму тварин. Стаття присвячена детальному аналізу фізіологічної ролі магнію, механізмам його участі у ферментативних реакціях, енергетичному обміні, підтримці структурної стабільності клітинних мембран, а також у забезпеченні цілісності та репарації ДНК. Особливу увагу приділено його функціям у регуляції діяльності нервової та серцево-судинної систем, а також ролі магнію як фізіологічного антагоніста кальцію, що суттєво впливає на процеси збудливості нервових клітин і скорочення м'язових волокон. Розглянуто симптоми та наслідки дефіциту магнію у тварин, серед яких найбільш критичними є порушення нервово-м'язової передачі, м'язові фасцикуляції, судоми, серцево-судинні патології, такі як аритмії та гіпертонія, а також ендокринні порушення. Особливе місце відведено аналізу причин розвитку трав'яної тетанії. Встановлено важливість контролю магнієвого балансу для профілактики гіпомagneмії та її негативних наслідків. Крім того, розглянуто менш поширену, але клінічно значущу проблему гіпермагнемії. Висвітлено фактори її виникнення, серед яких найчастішими є захворювання нирок і неконтрольоване застосування магнієвісних препаратів та добавок. Окремий акцент зроблено на аналізі сучасних підходів до забезпечення оптимального рівня магнію в кормах для різних видів сільськогосподарських тварин: свиней, птиці та жуйних. Оцінено різні джерела магнію (оксид, карбонат і сульфат магнію), встановлено їх ефективність і доцільність застосування у практичних умовах господарств з метою покращення продуктивних якостей тварин та якості продукції. Наголошено на важливості регулярного контролю рівня магнію в кормах та необхідності використання спеціалізованих магнієвих добавок для забезпечення оптимального фізіологічного статусу тварин. Запропоновано перспективні напрями подальших досліджень, включаючи застосування інноваційних технологій, таких як нанотехнології, для створення ефективних форм магнієвих препаратів, спрямованих на підвищення стресостійкості, продуктивності тварин та поліпшення функціонального стану автономної нервової системи.

Ключові слова: магній, мікроелементи, обмін речовин, нервова система, серцево-судинна система, кормові добавки, продуктивність тварин.

Вступ

Магній (Mg, метал, номер у періодичній системі 12) є четвертим за поширеністю елементом в організмі ($\text{Ca}^{2+} > \text{K}^{+} > \text{Na}^{+} > \text{Mg}^{2+}$) (Fiorentini et al., 2021). Mg є переважно внутрішньоклітинним іоном (98%), у сироватці крові людини, його вміст коливається в межах від 0,7 до 1,0 ммоль/л. Рівень Mg в плазмі крові у корів зазвичай становить від 0,9 до 1,2 ммоль/л (Martens et al., 2018). Його роль у біології продуктивних тварин є різносторонньою та надзвичайно важливою, включаючи участь у ферментативних реакціях, регуляції енергетичного обміну, підтримці стабільності клітинних структур та забезпеченні нервово-м'язової передачі. Незважаючи на значну кількість досліджень, присвячених Mg, багато аспектів його впливу на здоров'я і продуктивність тварин потребують подальшого вивчення. Збалансоване забезпечення Mg є критично важливим для підтримки здоров'я, продуктивності та добробуту сільськогосподарських тварин. В умовах сучасного інтенсивного тваринництва виникає необхідність детального вивчення ролі Mg та оптимізації його вмісту в раціонах. Тому, актуальним є всебічне вивчення фізіологічного значення Mg, причин та наслідків його дефіциту або надлишку, а також розробка ефективних методів контролю і корекції його рівня в організмі тварин.

До ХХ століття магній сульфат активно застосовувався у ветеринарній та медичній практиці, переважно з метою позбавлення організму від паразитів. Вважалося, що механізм дії Mg полягав у подразненні паразитарних організмів, що викликало їх загибель або вихід із тіла господаря. Попри те, що цей метод мав критиків, на той час більшість медичних препаратів базувалися на рослинних екстрактах або сполуках металів, і подібні практики були досить поширеними (Lees et al., 2022). Важливим етапом в історії медичного використання Mg стало відкриття цілющих властивостей води з природних джерел міста Епсом (Англія). За свідченням історичних джерел, місцевий фермер помітив, що худоба відмовлялася пити воду з криниці через її надзвичайно гіркий смак. Однак при зовнішньому використанні ця вода сприяла швидкому загоєнню ран, лікувала висипи та інші дерматологічні проблеми у великої рогатої худоби (Rudolf, 1917). У 1695 році вчений Натаніель Грю виділив із цієї гіркуватої природної води значну кількість солей Mg, які отримали назву "Епсомська сіль". Цей препарат швидко набув широкої популярності серед населення Європи, особливо серед представників знаті, таких як Марія Медичі, яка використовувала його для очищення організму та крові ("Magnesium | Description, Properties, & Compounds | Britannica," n.d.). Наступний крок у медичному вивченні Mg зробив професор хімії та анатомії Джозеф Блек. У своїй праці "On the Acid

Humour Arising from Food and Magnesia Alba” він вперше науково обґрунтував цінність магнезії як ефективного антацидного засобу, що суттєво розширило спектр її медичного застосування (“Experiments upon Magnesia Alba, Quicklime, and Some Other Alkaline Substances | Project Gutenberg,” n.d.). Проте, найважливішим відкриттям стало виділення чистого металевого Mg, яке здійснив Гемфрі Деві у 1808 році шляхом електролізу суміші оксиду Mg (магнезії) та ртуті. Саме це відкриття остаточно затвердило Mg, як окремих хімічний елемент і дало потужний поштовх до поглибленого вивчення його біологічних функцій та застосування у медицині та ветеринарії.

Біологічне значення магнію. Mg належить до життєво важливих хімічних елементів і присутній у клітинах усіх живих організмів, переважно у формі іонів Mg^{2+} . Загалом відомо понад 600 ферментативних реакцій у яких в тій чи іншій мірі задіяний Mg (Bomar et al., 2025), у тому числі і реакції синтезу, стабілізації молекул нуклеїнових кислот, обміну білків, вуглеводів та АТФ (Dominguez et al., 2024), включаючи й ті, що пов’язані з утворенням і використанням аденозинтрифосфату (АТФ), який має бути зв’язаний з Mg для перетворення АТФ на циклічний аденозинмонофосфат ферментом аденілатциклазою (Auwerx et al., 2021; Fiorentini et al., 2021; Dunn & Grider, 2023).

Mg^{2+} у сироватці крові присутній у трьох формах: 5–15 % зв’язано з аніонами (фосфати; цитрати; бікар-

бонати), 20–30 % зв’язано з білками та біля 55–70 % Mg^{2+} у вигляді іонізованого Mg^{2+} (Ansu Baidoo et al., 2023). Крім того, експерименти *in vitro* показали, що зниження рівня Mg^{2+} у плазмі можна пояснити прямим зв’язуванням Mg^{2+} з вільними жирними кислотами (NEFA) (Kurstjens et al., 2019). Вагається, що саме форма Mg^{2+} бере участь у ферментативних реакціях та фізіологічних процесах (Kröse & de Baaij, 2024).

Mg є критично важливим для функціонування ферментних систем, що беруть участь у синтезі, репарації та стабілізації ДНК. Ще у 1976 році було доведено, що саме іони Mg забезпечують високу точність реплікації ДНК. Попри можливість часткової заміни іонів Mg^{2+} іншими катіонами (Co^{2+} , Mn^{2+} , Ni^{2+}) у деяких ДНК-полімеразах, така заміна істотно знижувала точність і вірогідність процесу реплікації (Rao et al., 2023). Зокрема, він необхідний для ефективного проведення процесів репарації ДНК шляхом ексцизії нуклеотидів, репарації невідповідностей та видалення пошкоджених основ, викликаних дією мутагенів, ендегенними чинниками або помилками реплікації (Dhillon et al., 2024). Магній сприяє стабілізації хроматину протягом усього клітинного циклу (Ohyama, 2019), бере участь у вторинній і третинній структурі ДНК і стабілізує конформацію ДНК за допомогою водневих зв’язків або електростатичної сили (Price & Tullius, 1992).

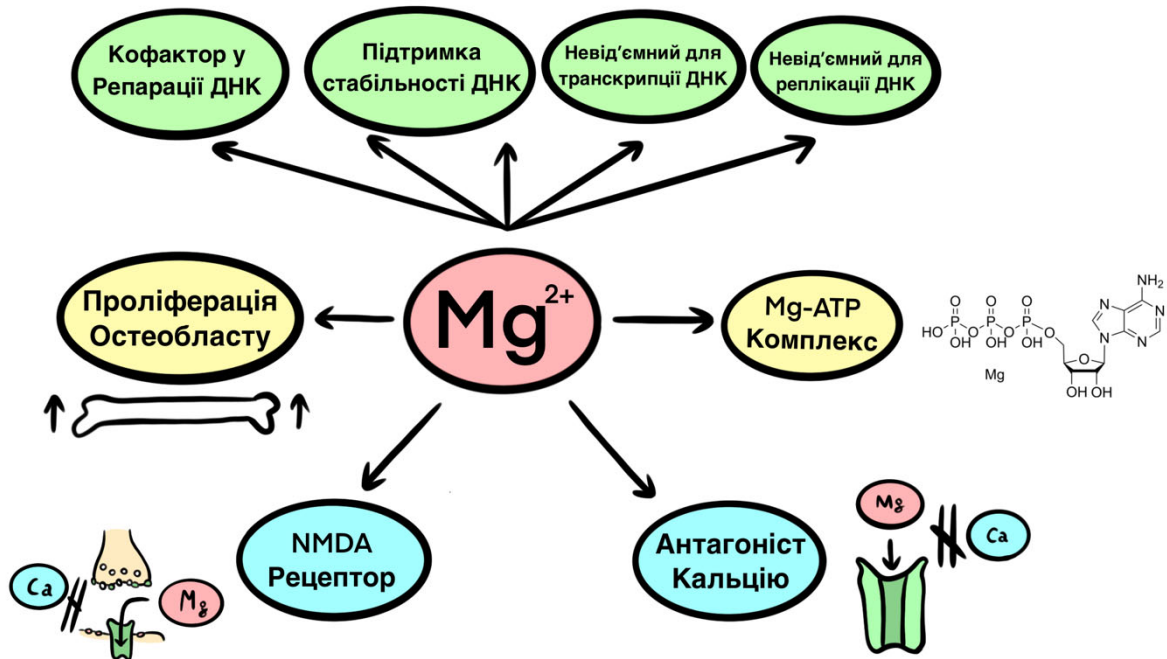


Рис. 1. Участь магнію в окремих клітинних процесах.

Іони Mg через свій порівняно великий розмір не можуть вільно проникати через біологічні мембрани, тому для цього використовуються спеціалізовані білкові канали. Опинившись у клітині, іони Mg^{2+} стабілізують структуру плазматичних мембран і забезпечують захист клітин від окисного пошкодження, спричиненого гідроксильними радикалами (Li et al., 2025; Marín et al., 2025). Через ряд своїх біологічних особ-

ливостей дії Mg розглядається, як один з засобів боротьби з старінням організму (Dominguez et al., 2024).

Більше половини загальної кількості Mg в організмі міститься у кістковій тканині (Rondanelli et al., 2021), де він відіграє критичну роль у підтриманні її здоров'я. Mg впливає на формування кристалів гідроксиапатиту, запобігаючи утворенню надмірно великих або крихких структур (Liu et al., 2024). Крім того,

Mg є незамінним активатором вітаміну D, а його дефіцит може призводити до розвитку остеопорозу та інших захворювань кісткової системи.

Mg знаходиться як внутрішньоклітинно, так і позаклітинно, але його внутрішньоклітинне розташування в ядрах, мітохондріях та ендоплазматичному ретикулумі має особливе значення для функціонування центральної нервової системи, зокрема для регуляції синаптичної передачі (Maier et al., 2022). У нервовій системі Mg забезпечує оптимальну нервову передачу, м'язову координацію та виконує нейропротекторну функцію, захищаючи нейрони від надмірного збудження і загибелі (Liguori et al., 2024). Важливим механізмом його дії є стримування надлишкового надходження Ca до нейронів, що дозволяє запобігти активації запальних процесів та пошкодженню нервових клітин. Натомість дефіцит Mg асоціюється з розвитком хронічного запалення (Maier et al., 2021; Xu et al., 2024).

Крім того, Mg відіграє важливу роль у модуляції імунної відповіді через взаємодію з фактором транскрипції NF-κB. Інгібуючи активацію NF-κB, він суттєво зменшує прозапальну експресію генів, що знижує загальний рівень запальної реакції в мозку (Veronese et al., 2022). Mg має тісний зв'язок як з вродженою, так і з набутою імунною відповіддю, відіграючи ключову роль у сигнальних шляхах, які регулюють розвиток, гомеостаз і активацію імунних клітин (Tam et al., 2003). Mg є важливим кофактором у адгезії Т-хелперних клітин, синтезі імуноглобуліну, зв'язуванні лімфоцитів IgM, антитілозалежному цитолізі та відповідях макрофагів на лімфокіни (Dominguez et al., 2021; Pethő et al., 2024). Відсутність Mg в організмі може спровокувати активацію фактора некрозу пухлин (TNF), інтерлейкіну-1 (IL-1) та IL-6, що може додатково підвищити ймовірність поширення ракових клітин (Mazur et al., 2007; Pethő et al., 2024).

Його протизапальна активність також проявляється у зменшенні концентрації плазматичного фібриногену та інших маркерів запалення (Bessa-Gonçalves et al., 2023). Дослідження також підтвердили здатність Mg нейтралізувати активні форми кисню (АФК), що сприяє сповільненню прогресування нейродегенеративних захворювань (Veronese et al., 2022). Встановлено зв'язок нестачі Mg з розвитком ряду неврологічних розладів, зокрема церебрального вазоспазму, хвороби Альцгеймера, хвороби Паркінсона, інсульту та мігрені, що підтверджено як на тваринних моделях, так і клінічними дослідженнями за участі людей (Ścibior et al., 2024).

Mg²⁺ відіграє вирішальну роль у роботі мозку, оскільки він необхідний для оптимальної нервової передачі та бере участь у формуванні мембранних фосфоліпідів. З цієї причини він відіграє фундаментальну роль у правильному функціонуванні центральної нервової системи (Botturi et al., 2020), в тому числі і за рахунок регуляції проникності гемато-енцефалічного бар'єру (Romeo et al., 2019).

У складному механізмі на клітинному рівні Mg регулює Ca вольтаж-залежні канали, одночасно пригнічуючи внутрішньоклітинне вивільнення Ca з цитозольних запасів. Крім того, Mg²⁺ регулює роботу рецеп-

тора гамма-аміномасляної кислоти типу А (GABA_A-R) (Pickering et al., 2020). Mg²⁺ приймає участь у інгібуванні глутаматного рецептора N-метил-D-аспартату (NMDAR), який відповідає за смерть нейронів (Yamanaka et al., 2019).

На тваринних моделях нестача Mg²⁺ може призвести до гіперзбудливості центральної нервової системи, змін у поведінці у відповідь на слухову стимуляцію. До клінічних симптомів дефіциту Mg належать тремор, порушення координації рухів, втрата апетиту, ністагм (Fiorentini et al., 2021). У тяжких випадках дефіцит може спричинити судоми та навіть зупинку серця (Liu et al., 2024). Крім цього, нестача Mg тісно пов'язана з розвитком ожиріння, резистентності до інсуліну, метаболічного синдрому та цукрового діабету 2 типу (Xu et al., 2024). На клітинному рівні дефіцит Mg впливає на функцію Na-K помпи, яка за нормальних умов забезпечує перекачування Na⁺ назовні, а K⁺ – всередину клітини, використовуючи енергію АТФ. Як наслідок, дефіцит Mg супроводжується зниженням внутрішньоклітинного рівня K (Piuri et al., 2021).

Mg також контролює вивільнення Ca із саркоплазматичного ретикулуму, тому зменшення концентрації Mg (гіпомагніємія) веде до підвищення рівня внутрішньоклітинного Ca. Це у свою чергу пригнічує секрецію паратгормону, спричиняючи гіпопаратиреоз і гіпокальціємію. Крім того, гіпомагніємія знижує чутливість кісткових і м'язових рецепторів до дії паратгормону (Zaloga & Roberts, 1990). Mg бере участь у патогенезі остеопорозу, впливаючи на регуляцію рівня паратгормону та вітаміну D, впливаючи на вісь RANK/RANKL/OPG (Liu et al., 2024).

Нестача Mg негативно впливає й на функцію нервової системи (Stanojević et al., 2025), зменшуючи електричну збудливість нейронів, модулюючи вивільнення ацетилхоліну та посилюючи агоністичні ефекти на ГАМК-рецептори, що може проявлятися низкою неврологічних порушень (Mathew & Panonnummal, 2021). Магній є вторинним месенджером, який бере участь у внутрішньоклітинній передачі сигналів і регулятором генів циркадного годинника, які контролюють циркадний ритм у біологічних системах (Stangherlin & O'Neill, 2018).

Кишковий мікробіом мишей з обмеженням вмістом Mg²⁺ продемонстрував підвищену альфарізноманітність зі змінами в чисельності таксонів, включаючи збільшення *Romboutsia ilealis* і зменшення *Oscillospiraceae* і *Lachnospiraceae*. Дефіцит Mg²⁺ значно впливає на деякі імунні функції та кишкову мікробіоту, підкреслюючи важливість Mg²⁺ у підтримці здоров'я травного тракту (Lima et al., 2025). Бджолина отрута містить 3–4 % мінеральних речовин, ключовими серед них є калій (K), кальцій (Ca) і магній (Mg), які сприяють загальній ефективності та терапевтичному потенціалу отрути (Răşinar et al., 2025).

Застосування Mg у ветеринарній медицині. Причини явної недостатньої оцінки клінічної значущості Mg можуть бути пов'язані, принаймні частково, з відсутністю інформації щодо регуляторних процесів цього катіону на клітинному, тканинному та систем-

ному рівнях (Touyz et al., 2024). Будучи двовалентним катіоном, Mg конкурує з Ca за взаємодію з низкою рецепторів і каналів, завдяки чому вважається фізіологічним антагоністом Ca (Debuigne et al., 2024). Ця властивість дозволяє Mg відігравати роль в антиноцицепції – пригніченні больових сигналів у нервовій системі шляхом блокування пресинаптичного вивільнення нейромедіаторів та підвищення порогу постсинаптичних потенціалів дії (Maier et al., 2022). В окремих випадках Mg також може використовуватись як анальгетик, що було експериментально підтверджено на тваринах різних видів, включаючи собак, котів, коней, корів, кіз та овець (Debuigne et al., 2024), а також як допоміжний засіб при проведенні евтаназії. Крім цього, завдяки антигіпертензивним і антиаритмічним властивостям Mg застосовується у ветеринарній медицині для собак, котів і коней, зокрема для лікування шлуночкової тахікардії та інших порушень серцевого ритму (Crisponi et al., 2021).

Mg уже тривалий час активно використовується у ветеринарній медицині як міорелаксант для лікування правця (Sutjonong et al., 2024), а також у терапії пре-еклампсії, де препарати на основі Mg продемонстрували вищу ефективність у порівнянні з іншими протисудомними засобами, зменшуючи частоту повторних судомних нападів (De Oliveira et al., 2024). Дослідження на щурах та людях також підтверджують здатність Mg посилювати анальгетичний ефект опіоїдів (Shin et al., 2020). Окрім цього, доведено синергетичну взаємодію Mg з кетаміном, що дозволяє досягати ефективнішого контролю післяопераційного болю та суттєво знижує потребу в опіоїдних препаратах (Hassan & Mahran, 2023). Сульфат Mg широко застосовується як осмотичний проносний засіб для лікування закрепів у тварин та для спорожнення кишок перед діагностичними або хірургічними процедурами (Mori et al., 2021). Зокрема, первинне забиття товстої кишки є частою причиною колик у коней, і консервативна терапія із застосуванням сульфату Mg спрямована на зменшення больового синдрому та полегшення евакуації кишкового вмісту шляхом його гідратації та стимуляції моторики кишок (Lopes et al., 2002). Також у коней і інших тварин відзначено шлунково-ободовий рефлекс, коли помірне розтягнення шлунка стимулює моторику товстої кишки, і саме сульфат Mg є одним із найбільш ефективних засобів для стимуляції цього рефлексу завдяки його вираженій осмотичній дії.

Mg відіграє ключову роль у регуляції скорочень гладких м'язів, серцевої збудливості, вазомоторного тонуусу та підтримці артеріального тиску. Численні дослідження підтверджують, що хронічний латентний дефіцит Mg пов'язаний із порушенням механізмів, важливих для підтримання тонуусу серцево-судинної системи (Nielsen, 2024). Зокрема, тривала недостатність Mg сприяє погіршенню ендотеліальної функції, що є ключовим фактором у розвитку атеросклерозу, ішемічної хвороби серця та артеріальної гіпертензії. Дослідження на клітинах ендотелію пупкової вени людини (HUVES) показали, що саме ці клітини судинної стінки чутливо реагують на нестачу Mg, що призводить до їхньої дисфункції, яка є однією з

ранніх стадій розвитку серцево-судинних захворювань (Fedele et al., 2024).

Гомеостаз Mg в організмі контролюється трьома основними системами органів: кишечником, кістками та нирками. Засвоєння Mg є складним і багатофакторним процесом, інтенсивність якого значною мірою залежить від поточного рівня цього мікроелемента в організмі. Основна частина Mg абсорбується в тонкому кишечнику, тоді як всмоктування через товстий кишечник є незначним (Ehrenpreis et al., 2022).

Згідно з даними ветеринарної літератури, гіпомагніємія є частим патологічним станом у тварин (Patel et al., 2024). Гіпомагніємія може бути пов'язана з порушеннями електролітного балансу, включаючи гіпокальціємію, гіпокаліємію, метаболічний алкалоз, поряд з тим, рефрактерна гіпокаліємія часто реагує на лікування лише після нормалізації концентрації Mg. Основними причинами гіпомагніємії є порушення всмоктування Mg в кишечнику або його посиленна екскреція через нирки (Macias Ruiz et al., 2023). При зниженні концентрації Mg пригнічується функція зовнішніх мозкових калієвих каналів нирок, що спричиняє посилення екскреції калію із сечею і, як наслідок, зниження його внутрішньоклітинного рівня. Зменшення концентрації внутрішньоклітинного калію знижує поріг виникнення потенціалу дії у кардіоміоцитах та подовжує період реполяризації мембрани, суттєво збільшуючи ризик виникнення серцевих аритмій. Дефіцит Mg також пов'язаний із виникненням гіпокальціємії, оскільки Mg бере участь у регуляції синтезу циклічного аденозинмонофосфату (цАМФ) та секретії паратгормону (ПТГ). Зниження концентрації Mg пригнічує Mg-залежну аденілатциклазу, зменшує синтез цАМФ, що призводить до зниження вивільнення ПТГ і, як наслідок, зменшення рівня кальцію в крові (Ehrenpreis et al., 2022). Клінічні прояви гіпомагніємії найчастіше вражають нервово-м'язову та серцево-судинну системи. На ранніх стадіях вона може проявлятися м'язовими фасцикуляціями, слабкістю, порушеннями ковтання (дисфагією). Більш тяжкі неврологічні прояви включають судоми, вертикальний ністагм, апатію, марення і навіть кому. Серцево-судинні порушення при гострій гіпомагніємії включають небезпечні аритмії (наприклад, *torsades de pointes*) через подовження інтервалу QT, а також підвищений ризик розвитку інфаркту міокарда, серцевої недостатності, атеросклерозу та гіпотонії. Крім того, дефіцит Mg здатен посилювати інсулінорезистентність. Варто зазначити, що порушення ниркової реабсорбції кальцію при гіпомагніємії ще більше посилює стани, пов'язані з гіпокальціємією (Ehrenpreis et al., 2022).

Гіпермагніємія зустрічається значно рідше, ніж гіпомагніємія. Основними факторами розвитку гіпермагніємії можуть бути гіперпаратиреоз та порушення метаболізму кальцію, такі як гіперкальціємія або гіпокальціурія. Ці стани спричиняють збільшення реабсорбції Mg в ниркових каналцях під впливом кальцію. Зокрема, у тварин та людей із сімейною гіпокальціурією гіперкальціємією (рідкісним аутосомно-домінантним захворюванням) часто спостерігається гіпермагніємія.

У дослідженні собак, що потрапили до ветеринарного відділення інтенсивної терапії з різними захворюваннями, гіпермагніємія була виявлена у 6 із 48 тварин, тоді як гіпомагніємія спостерігалася значно частіше – у 26 із 48 собак (Martin et al., 1994). Найчастішою причиною гіпермагніємії є порушення функції нирок, зокрема ниркова недостатність. Крім того, задокументовані випадки ятрогенного передозування магнієм, які пов'язані з парентеральним введенням магнієвих добавок, а також пероральним застосуванням антацидів або препаратів проти застуди, що містять Mg (Vissers & Purssell, 1996).

Застосування Mg у тваринництві Mg є макроелементом живлення для всіх живих організмів, а співвідношення його стабільних ізотопів ($\delta^{26}\text{Mg}$) можна використовувати для аналізу кормових звичок та динаміки елементів в тваринному організмі (Yoshimura et al., 2025). Середній вміст Mg в організмі більшості тварин коливається в межах 0,4 г на кілограм маси тіла. Для порівняння, вміст кальцію (Ca) значно більший – приблизно у 42 рази, тобто близько 1000 г на тварину (Jahren-Dechent & Ketteler, 2012). Припускаючи, що аналогічне співвідношення характерне для інших ссавців, можна розрахувати, що загальна кількість Mg у корови масою 700 кг становитиме близько 455 г. При цьому 60–70 % Mg (близько 320 г) міститься в скелеті, приблизно 130 г перебуває у внутрішньоклітинному просторі, і лише 4–5 г Mg знаходиться у позаклітинному середовищі (Picone et al., 2020). У тієї ж корови загальний вміст кальцію складає близько 7–9,6 кг, що перевищує кількість Mg приблизно у 21 раз.

Щодо практичного застосування, важливими джерелами Mg з високою біологічною доступністю для сільськогосподарських тварин є його оксид, карбонат і сульфат. Найбільш поширеним джерелом Mg в кормових добавках вважається оксид Mg (MgO), який характеризується високою концентрацією доступного елемента та ефективністю засвоєння (“Animal Feed - European Commission,” n.d.). Бики, яких годували раціонами з 2,5 г/кг сухої речовини суміші оксиду магнію, показали більш високий рівень синтезу мікробного протеїну, покращене споживання сухої речовини корму (Nascimento et al., 2024).

Сульфат Mg активно застосовується як кормова добавка у випадках низького вмісту Mg на пасовищах для профілактики та лікування дефіцитних станів у худоби (Khiaosa-Ard et al., 2023). Одним із таких станів є лактаційна або трав'яна тетанія, яка виникає, коли жуйні тварини споживають траву чи корми з недостатнім рівнем Mg. Хвороба може проявлятися м'язовими спазмами, конвульсіями і часто призводить до раптової смерті тварин через розвиток дихальної недостатності (Martens et al., 2018).

Засвоєння Mg в організмі залежить не лише від його кількості у кормі, але й від розчинності джерела Mg, оскільки абсорбуватися може тільки іонізована форма цього елемента. Важливим фактором, що негативно впливає на засвоєння Mg, є високий рівень калію в раціоні, оскільки калій здатний пригнічувати всмоктування Mg у рубці корів, підвищуючи ризик

розвитку гіпомагніємії (de Groot et al., 2023). Попри те, що базові потреби тварин у магнії можуть бути задоволені звичайними кормовими інгредієнтами, практика та дослідження демонструють суттєві переваги від додавання Mg в корми вище мінімальних розрахункових норм. Такий підхід широко використовується у свинарстві, птахівництві та при вирощуванні жуйних тварин, зокрема корів, оскільки це дозволяє не лише запобігти дефіциту Mg, але й покращити продуктивність тварин та якість отримуваної продукції (Colombo et al., 2022).

Основними джерелами Mg в раціонах тварин є зелені корми, продукти тваринного походження та спеціалізовані мінеральні добавки. Серед кормових інгредієнтів із високим вмістом Mg слід відзначити пшеничні висівки, сушені дріжджі, лляне та бавовняне насіння, які характеризуються високою концентрацією цього елемента. Наприклад, середній вміст Mg в крупах становить 1,1–1,3 г/кг сухої речовини, у висівках – 3,0–5,8 г/кг, у рибному борошні – 1,7–2,5 г/кг. Mg всмоктується переважно у тонкому кишечнику (близько 60 % від кількості в раціоні) шляхом пасивного транспорту. Водночас важливо пам'ятати, що засвоєння Mg в кишечнику пригнічується такими факторами, як надлишок калію, кальцію та аміаку, які виступають його антагоністами (Houillier et al., 2023).

Для свинарства режим харчування є одним із вирішальних факторів, що впливає на продуктивність тварин, економічну ефективність виробництва та якість отриманої продукції. Мінімальна потреба свиней у магнії (Mg) за умови годування очищеними раціонами становить 325 мг/кг сухої речовини корму. Водночас Національна дослідницька рада (NRC) рекомендує вищий рівень – 400 мг/кг сухої речовини. На практиці ж більші дози Mg (400–500 мг/кг сухої речовини) демонструють позитивний вплив на репродуктивну здатність та загальний ріст свиней. Оптимальним вважається споживання Mg на рівні від 500 до 650 мг/кг сухої речовини корму. Водночас потреба в магнії зростає пропорційно збільшенню вмісту білка в раціоні (Zang et al., 2014). Важливо зазначити, що дієтичні добавки Mg не завжди істотно покращують середньодобові прирости свиней під час відгодівлі, однак вони здатні позитивно впливати на якість свинини, зокрема покращувати її колір (Apple et al., 2000).

Згідно з рекомендаціями Національної дослідницької ради (NRC), мінімальна потреба в магнії (Mg) для бройлерів, індичат і курей-несучок становить приблизно 500 мг/кг сухої речовини корму. Додавання Mg до раціону бройлерів позитивно впливає на міцність кісток і загальний стан скелета (“Improve Broiler, Layer Bone Strength with Magnesium Oxide | WATTAgNet | WATTPoultry.Com,” n.d.). Як правило, додатковий Mg рекомендується включати до раціону птиці після третього тижня життя, що дозволяє уникнути розвитку дефіциту та запобігти порушенням формування кісток ніг.

Для молочних та м'ясних корів рекомендована концентрація Mg у раціоні становить від 1,2 до 3 г/кг сухої речовини. Забезпечення достатнього рівня Mg в годівлі має важливе значення для підтримки здоров'я,

високої продуктивності і профілактики дефіцитних станів. Особливо значущими патологіями, пов'язаними з дефіцитом Mg, є трав'яна тетанія та молочна гарячка. Трав'яна тетанія є клінічним проявом гіпомагніємії у корів і характеризується значним зниженням рівня Mg у спинномозковій рідині нижче критичних значень (<0,7 ммоль/л), що супроводжується зниженням концентрації Mg у плазмі крові. Крім того, додавання Mg у корми має вирішальне значення для оптимізації продуктивності тварин, особливо з урахуванням сучасних умов вирощування молочних корів, коли їхні потреби у магнії значно зросли. Це обумовлено як активним використанням азотних (N) і калійних (K) добрив, що впливають на засвоєння Mg, так і значним зростанням генетичного потенціалу корів. Особливо чутливими до дефіциту Mg є високопродуктивні молочні корови, які продукують понад 40 кг молока на добу, а також корови в період пізньої тільності та на початку лактації (Pinotti et al., 2021).

Висновки

На основі проведеного аналізу встановлено, що Mg є одним із ключових мікроелементів, необхідних для нормального функціонування організму тварин. Його значення визначається участю в понад 300 ферментативних реакціях, регуляцією енергетичного обміну клітин, підтримкою цілісності клітинних мембран та стабілізацією генетичного матеріалу. Особливу увагу заслуговує роль Mg в регуляції нервової та серцево-судинної систем, де він виступає фізіологічним антагоністом кальцію, знижує ризики розвитку патологічних станів, таких як аритмії, ішемічна хвороба серця, гіпертензія та нейродегенеративні захворювання. Недостатнє надходження Mg призводить до серйозних порушень у тварин, зокрема розвитку гіпомагніємії, що супроводжується порушеннями нерво-м'язової передачі, м'язовими спазмами, судомами, серцево-судинними патологіями та ендокринними розладами. Особливо небезпечною є лактаційна або трав'яна тетанія, що нерідко призводить до летальних випадків у жуйних тварин. Водночас надлишок Mg (гіпермагніємія), хоча і трапляється рідше, може спричинити серйозні метаболічні порушення, переважно пов'язані з нирковою недостатністю або неконтрольованим застосуванням магнієвих добавок. Практичний аспект використання Mg у ветеринарії включає оптимізацію його кількості в раціонах різних видів тварин. Рекомендовані норми Mg залежать від виду, віку, продуктивності та фізіологічного стану тварин. Зокрема, оптимальне забезпечення магнієм у свиней, птиці та жуйних сприяє покращенню продуктивних показників, якості продукції, а також ефективно попереджає дефіцитні стани. Найчастіше використовуються такі доступні джерела Mg, як його оксид, карбонат і сульфат, з яких сульфат Mg є найпоширенішим для лікування станів дефіциту, особливо у великої рогатої худоби. Для профілактики захворювань, пов'язаних з порушенням магнієвого гомеостазу, необхідно регулярно контролювати його рівень у кормах і використовувати відповідні добавки.

Перспективи подальших досліджень. Подальші дослідження Mg у тваринництві та ветеринарній медицині відкривають широкі можливості для підвищення здоров'я, стійкості до стресів і продуктивності тварин. Перспективними напрямками є детальне вивчення механізмів засвоєння Mg з різних джерел, особливо з використанням передових технологій. Зокрема, особливий інтерес становить застосування біологічно активних наносполук Mg, які можуть забезпечити більш ефективне і контрольоване надходження цього мікроелемента до організму тварин. Вивчення впливу наночастинок Mg на стан автономної нервової системи, підвищення стресостійкості та покращення продуктивних якостей тварин є одним із пріоритетних напрямів майбутніх наукових розробок.

Відомості про конфлікт інтересів

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

References

- Animal feed (2025). European Commission. (n.d.). Food, Farming, Fisheries. URL: https://food.ec.europa.eu/food-safety/animal-feed_en.
- Ansu Baidoo, V. Y., Thiagarajah, K., Tekwe, C. D., Wallace, T. C., & Gletsu-Miller, N. (2023). Relationship between short-term self-reported dietary magnesium intake and whole blood ionized magnesium (iMg²⁺) or serum magnesium (s-Mg) concentrations. *Annals of medicine*, 55(1), 2195702. DOI: 10.1080/07853890.2023.2195702.
- Apple, J. K., Maxwell, C. V., deRodas, B., Watson, H. B., & Johnson, Z. B. (2000). Effect of magnesium mica on performance and carcass quality of growing-finishing swine. *Journal of animal science*, 78(8), 2135–2143. DOI: 10.2527/2000.7882135x.
- Auwerx, J., Rybarczyk, P., Kischel, P., Dhennin-Duthille, I., Chatelain, D., Sevestre, H., Van Seuning, I., Ouadid-Ahidouch, H., Jonckheere, N., & Gautier, M. (2021). Mg²⁺ Transporters in Digestive Cancers. *Nutrients*, 13(1), 210. DOI: 10.3390/nu13010210.
- Bessa-Gonçalves, M., Ribeiro-Machado, C., Costa, M., Ribeiro, C. C., Barbosa, J. N., Barbosa, M. A., & Santos, S. G. (2023). Magnesium incorporation in fibrinogen scaffolds promotes macrophage polarization towards M2 phenotype. *Acta biomaterialia*, 155, 667–683. DOI: 10.1016/j.actbio.2022.10.046.
- Bomar, M. C., Ewell, T. R., Brown, R. L., Brown, D. M., Kwarteng, B. S., Abbotts, K. S. S., Butterklee, H. M., Williams, N. N. B., Wrigley, S. D., Walsh, M. A., Hamilton, K. L., Thomson, D. P., Weir, T. L., & Bell, C. (2025). Short-Term Magnesium Supplementation Has Modest Detrimental Effects on Cycle Ergometer Exercise Performance and Skeletal Muscle Mitochondria and Negligible Effects on the Gut Microbiota: A Randomized Crossover Clinical Trial. *Nutrients*, 17(5), 915. DOI: 10.3390/nu17050915.
- Botturi, A., Ciappolino, V., Delvecchio, G., Boscutti, A., Viscardi, B., & Brambilla, P. (2020). The Role and the Effect of Magnesium in Mental Disorders: A Systematic Review. *Nutrients*, 12(6), 1661.

- DOI: 10.3390/nu12061661.
- Colombo, E. A., Cooke, R. F., Araújo, A. C. R., Harvey, K. M., Pohler, K. G., & Brandão, A. P. (2022). Supplementing a blend of magnesium oxide to feedlot cattle: effects on ruminal, physiological, and productive responses. *Journal of animal science*, 100(1), skab375. DOI: 10.1093/jas/skab375.
- Crisponi, G., Nurchi, V. M., Cappai, R., Zoroddu, M. A., Gerosa, C., Piras, M., Faa, G., & Fanni, D. (2021). The Potential Clinical Properties of Magnesium. *Current medicinal chemistry*, 28(35), 7295–7311. DOI: 10.2174/0929867327999201116195343.
- de Groot, B. M., Edwards, J. E., & Schonewille, J. T. (2023). Magnesium butyrate is a readily available magnesium source in dairy cow nutrition. *Animal Feed Science and Technology*, 304, 115697. DOI: 10.1016/j.anifeedsci.2023.115697.
- De Oliveira, L., Korkes, H., Rizzo, M., Siaulyš, M. M., & Cordioli, E. (2024). Magnesium sulfate in preeclampsia: Broad indications, not only in neurological symptoms. *Pregnancy hypertension*, 36, 101126. DOI: 10.1016/j.preghy.2024.101126.
- Debuigne, M., Chesnel, M. A., & Chebroux, A. (2024). The analgesic effects of magnesium in veterinary patients: a qualitative evidence synthesis. *Veterinary anaesthesia and analgesia*, 51(2), 115–125. DOI: 10.1016/j.vaa.2024.01.002.
- Dhillon, V. S., Deo, P., & Fenech, M. (2024). Low magnesium in conjunction with high homocysteine increases DNA damage in healthy middle aged Australians. *European journal of nutrition*, 63(7), 2555–2565. DOI: 10.1007/s00394-024-03449-0.
- Dominguez, L. J., Veronese, N., & Barbagallo, M. (2024). Magnesium and the Hallmarks of Aging. *Nutrients*, 16(4), 496. DOI: 10.3390/nu16040496.
- Dominguez, L. J., Veronese, N., Guerrero-Romero, F., & Barbagallo, M. (2021). Magnesium in Infectious Diseases in Older People. *Nutrients*, 13(1), 180. DOI: 10.3390/nu13010180.
- Dunn, J., & Grider, M. H. (2023). Physiology, Adenosine Triphosphate. *StatPearls*. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK553175>.
- Ehrenpreis, E. D., Jarrouj, G., Meader, R., Wagner, C., & Ellis, M. (2022). A comprehensive review of hypomagnesemia. *Disease-a-month : DM*, 68(2), 101285. DOI: 10.1016/j.disamonth.2021.101285.
- Ernest Pierson, E. (2017). Improve broiler, layer bone strength with magnesium oxide | WATTAgNet | WATTPoultry.com. (n.d.). URL: <https://www.wattagnet.com/home/article/15522093/improve-broiler-layer-bone-strength-with-magnesium-oxide-wattagnet>.
- Black, J. (1756). Experiments upon magnesia alba, quicklime, and some other alkaline substances. *Edinburgh : G. Hamilton and J. Balfour*. URL: <https://www.gutenberg.org/ebooks/24591>.
- Fedele, G., Castiglioni, S., Trapani, V., Zafferi, I., Bartolini, M., Casati, S. M., Ciuffreda, P., Wolf, F. I., & Maier, J. A. (2024). Impact of Inducible Nitric Oxide Synthase Activation on Endothelial Behavior under Magnesium Deficiency. *Nutrients*, 16(10), 1406. DOI: 10.3390/nu16101406.
- Fiorentini, D., Cappadone, C., Farruggia, G., & Prata, C. (2021). Magnesium: Biochemistry, Nutrition, Detection, and Social Impact of Diseases Linked to Its Deficiency. *Nutrients*, 13(4), 1136. DOI: 10.3390/nu13041136.
- Hassan, M. E., & Mahran, E. (2023). Effect of magnesium sulfate with ketamine infusions on intraoperative and postoperative analgesia in cancer breast surgeries: a randomized double-blind trial. *Brazilian Journal of Anesthesiology (English Edition)*, 73(2), 165–170. DOI: 10.1016/J.BJANE.2021.07.015.
- Houillier, P., Lievre, L., Hureauux, M., & Prot-Bertoye, C. (2023). Mechanisms of paracellular transport of magnesium in intestinal and renal epithelia. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1521(1), 14–31. DOI: 10.1111/NYAS.14953.
- Hanusa, T. P. (2025). Magnesium | Description, Properties, & Compounds | Britannica. (n.d.). URL: <https://www.britannica.com/science/magnesium>.
- Jahnen-Dechent, W., & Ketteler, M. (2012). Magnesium basics. *CKJ: Clinical Kidney Journal*, 5(SUPPL. 1), i3–i14 DOI: 10.1093/NDTPLUS/SFR163.
- Khiaosa-Ard, R., Ottoboni, M., Verstringe, S., Gruber, T., Hartinger, T., Humer, E., Bruggeman, G., & Zebeli, Q. (2023). Magnesium in dairy cattle nutrition: A meta-analysis on magnesium absorption in dairy cattle and assessment of simple solubility tests to predict magnesium availability from supplemental sources. *Journal of dairy science*, 106(12), 8758–8773. DOI: 10.3168/jds.2023-23560.
- Kröse, J. L., & de Baaij, J. H. F. (2024). Magnesium biology. *Nephrology Dialysis Transplantation*, 39(12), 1965–1975. DOI: 10.1093/NDT/GFAE134.
- Kurstjens, S., de Baaij, J. H. F., Overmars-Bos, C., van den Munckhof, I. C. L., Garzero, V., de Vries, M. A., ... Hoenderop, J. G. J. (2019). Increased NEFA levels reduce blood Mg²⁺ in hypertriacylglycerolaemic states via direct binding of NEFA to Mg²⁺. *Diabetologia*, 62(2), 311–321. DOI: 10.1007/s00125-018-4771-3.
- Lees, P., Bäumer, W., & Toutain, P. L. (2022). The Decline and Fall of Materia Medica and the Rise of Pharmacology and Therapeutics in Veterinary Medicine. *Frontiers in veterinary science*, 8, 777809. DOI: 10.3389/fvets.2021.777809.
- Li, P., Liu, S., Wallerstein, J., Villones, R. L. E., Huang, P., Lindkvist-Petersson, K., Meloni, G., Lu, K., Steen Jensen, K., Liin, S. I., & Gourdon, P. (2025). Closed and open structures of the eukaryotic magnesium channel Mrs2 reveal the auto-ligand-gating regulation mechanism. *Nature structural & molecular biology*, 32(3), 491–501. DOI: 10.1038/s41594-024-01432-1.
- Liguori, S., Moretti, A., Paoletta, M., Gimigliano, F., & Iolascon, G. (2024). Role of Magnesium in Skeletal Muscle Health and Neuromuscular Diseases: A Scoping Review. *International journal of molecular sciences*, 25(20), 11220. DOI: 10.3390/ijms252011220.
- Lima, F. D. S., Santos, M. Q. D., Makiyama, E. N., Hoffmann, C., & Fock, R. A. (2025). The essential role of magnesium in immunity and gut health: Impacts of dietary magnesium restriction on peritoneal cells and intestinal microbiome. *Journal of trace elements in medicine and biology : organ of the Society for Minerals and Trace Elements (GMS)*, 88,

127604. DOI: 10.1016/j.jtemb.2025.127604.
- Liu, B., Li, M., Wang, J., Zhang, F., Wang, F., Jin, C., Li, J., Wang, Y., Sanderson, T. H., & Zhang, R. (2024). The role of magnesium in cardiac arrest. *Frontiers in nutrition*, 11, 1387268. DOI: 10.3389/fnut.2024.1387268.
- Liu, L., Luo, P., Wen, P., & Xu, P. (2024). The role of magnesium in the pathogenesis of osteoporosis. *Frontiers in endocrinology*, 15, 1406248. DOI: 10.3389/fendo.2024.1406248.
- Lopes, M. A. F., Walker, B. L., White, N. A., & Ward, D. L. (2002). Treatments to promote colonic hydration: Enteral fluid therapy versus intravenous fluid therapy and magnesium sulphate. *Equine Veterinary Journal*, 34(5), 505–509. DOI: 10.2746/042516402776117782.
- Touyz, R. M., de Baaij, J. H. F., & Hoenderop, J. G. J. (2024). Magnesium Disorders. *New England Journal of Medicine*, 390(21), 1998–2009. DOI: 10.1056/nejmra1510603.
- Macías Ruiz, M. D. C., Cuenca Bermejo, L., Veronese, N., Fernández Villalba, E., González Cuello, A. M., Kublickiene, K., Raparelli, V., Norris, C. M., Kautzky-Willer, A., Pilote, L., Barbagallo, M., Dominguez, L., Herrero, M. T., & GOING-FWD Consortium (2023). Magnesium in Kidney Function and Disease-Implications for Aging and Sex-A Narrative Review. *Nutrients*, 15(7), 1710. DOI: 10.3390/nu15071710.
- Maier, J. A., Castiglioni, S., Locatelli, L., Zocchi, M., & Mazur, A. (2021). Magnesium and inflammation: Advances and perspectives. *Seminars in cell & developmental biology*, 115, 37–44. DOI: 10.1016/j.semedb.2020.11.002.
- Maier, J. A. M., Locatelli, L., Fedele, G., Cazzaniga, A., & Mazur, A. (2022). Magnesium and the Brain: A Focus on Neuroinflammation and Neurodegeneration. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(1), 223. DOI: 10.3390/IJMS24010223.
- Marín, R., Abad, C., Rojas, D., Fernández, M., & Ruetter, F. (2025). Magnesium sulfate in oxidative stress-associated pathologies: clinical, cellular, and molecular perspectives. *Biophysical reviews*, 17(2), 511–535. DOI: 10.1007/s12551-025-01292-z.
- Martens, H., Leonhard-Marek, S., Röntgen, M., & Stumpff, F. (2018). Magnesium homeostasis in cattle: absorption and excretion. *Nutrition research reviews*, 31(1), 114–130. DOI: 10.1017/S0954422417000257.
- Martin, L. G., Matteson, V. L., Wingfield, W. E., Van Pelt, D. R., & Hackett, T. B. (1994). Abnormalities of Serum Magnesium in Critically III Dogs: Incidence and Implications. *Journal of Veterinary Emergency and Critical Care*, 4(1), 15–20. DOI: 10.1111/j.1476-4431.1994.tb00111.x.
- Mathew, A. A., & Panonnummal, R. (2021). ‘Magnesium’-the master cation-as a drug—possibilities and evidences. *BioMetals*, 34(5), 955–986. DOI: 10.1007/S10534-021-00328-7.
- Mazur, A., Maier, J. A. M., Rock, E., Gueux, E., Nowacki, W., & Rayssiguier, Y. (2007). Magnesium and the inflammatory response: Potential physiopathological implications. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 458(1), 48–56. DOI: 10.1016/j.abb.2006.03.031.
- Mori, H., Tack, J., & Suzuki, H. (2021). Magnesium Oxide in Constipation. *Nutrients*, 13(2), 421. DOI: 10.3390/nu13020421.
- Nascimento, K. B., Ramirez, D. A. Z., Meneses, J. A. M., Bethancourt-Garcia, J. A., Huang, L. K., Souza, J. M. C., Lino, R. A., Nascimento, K. G., Batista, E. D., & Gionbelli, M. P. (2024). Nutritional, ruminal, and metabolic parameters of beef bulls fed high-energy diets as a function of dietary addition of a magnesium oxide blend associated or not with monensin. *Animal Feed Science and Technology*, 312, 115976. DOI: 10.1016/j.anifeedsci.2024.115976.
- Nielsen F. H. (2024). The Role of Dietary Magnesium in Cardiovascular Disease. *Nutrients*, 16(23), 4223. DOI: 10.3390/nu16234223.
- Ohyama, T. (2019). New Aspects of Magnesium Function: A Key Regulator in Nucleosome Self-Assembly, Chromatin Folding and Phase Separation. *International journal of molecular sciences*, 20(17), 4232. DOI: 10.3390/ijms20174232.
- Patel, V., Akimbekov, N. S., Grant, W. B., Dean, C., Fang, X., & Razzaque, M. S. (2024). Neuroprotective effects of magnesium: implications for neuroinflammation and cognitive decline. *Frontiers in Endocrinology*, 15, 1406455. DOI: 10.3389/FENDO.2024.1406455.
- Pethő, Á. G., Fülöp, T., Orosz, P., & Tapolyai, M. (2024). Magnesium Is a Vital Ion in the Body-It Is Time to Consider Its Supplementation on a Routine Basis. *Clinics and practice*, 14(2), 521–535. DOI: 10.3390/clinpract14020040.
- Pickering, G., Mazur, A., Trousselard, M., Bienkowski, P., Yaltsewa, N., Amessou, M., Noah, L., & Pouteau, E. (2020). Magnesium Status and Stress: The Vicious Circle Concept Revisited. *Nutrients*, 12(12), 3672. DOI: 10.3390/nu12123672.
- Picone, G., Cappadone, C., Farruggia, G., Malucelli, E., & Iotti, S. (2020). The assessment of intracellular magnesium: different strategies to answer different questions. *Magnesium research*, 33(1), 1–11. DOI: 10.1684/mrh.2020.0464.
- Pinotti, L., Manoni, M., Ferrari, L., Tretola, M., Cazzola, R., & Givens, I. (2021). The contribution of dietary magnesium in farm animals and human nutrition. *Nutrients*, 13(2), 1–15. DOI: 10.3390/NU13020509.
- Piuri, G., Zocchi, M., Della Porta, M., Ficara, V., Manoni, M., Zuccotti, G. V., Pinotti, L., Maier, J. A., & Cazzola, R. (2021). Magnesium in Obesity, Metabolic Syndrome, and Type 2 Diabetes. *Nutrients*, 13(2), 320. DOI: 10.3390/nu13020320.
- Price, M. A., & Tullius, T. D. (1992). Using hydroxyl radical to probe DNA structure. *Methods in enzymology*, 212, 194–219. DOI: 10.1016/0076-6879(92)12013-g.
- Rao, Z. X., Tokach, M. D., Woodworth, J. C., DeRouchey, J. M., Goodband, R. D., & Gebhardt, J. T. (2023). Effects of Various Feed Additives on Finishing Pig Growth Performance and Carcass Characteristics: A Review. *Animals : an open access journal from MDPI*, 13(2), 200. DOI: 10.3390/ani13020200.
- Rășinar, A. D., Radulov, I., Berbecea, A., Floares Oarga, D., Vicar, N., Simiz, E., Dragomirescu, M., & Pătruică, S. (2025). Assessing the Influence of Stimulatory Feeding of Bee Colonies on Mineral

- Composition and Antioxidant Activity of Bee Venom. *Insects*, 16(4), 423. DOI: 10.3390/insects16040423.
- Romeo, V., Cazzaniga, A., & Maier, J. A. M. (2019). Magnesium and the blood-brain barrier in vitro: effects on permeability and magnesium transport. *Magnesium research*, 32(1), 16–24. DOI: 10.1684/mrh.2019.0454.
- Rondanelli, M., Faliva, M. A., Tartara, A., Gasparri, C., Perna, S., Infantino, V., Riva, A., Petrangolini, G., & Peroni, G. (2021). An update on magnesium and bone health. *Biomaterials: an international journal on the role of metal ions in biology, biochemistry, and medicine*, 34(4), 715–736. DOI: 10.1007/s10534-021-00305-0.
- Rudolf, R. D. (1917). The use of Epsom salts, historically considered. *Canadian Medical Association Journal*, 7(12), 1069. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC1584988>.
- Ścibior, A., Llopis, J., Dobrakowski, P. P., & Męcik-Kronenberg, T. (2024). Magnesium (Mg) and Neurodegeneration: A Comprehensive Overview of Studies on Mg Levels in Biological Specimens in Humans Affected Some Neurodegenerative Disorders with an Update on Therapy and Clinical Trials Supplemented with Selected Animal Studies. *International journal of molecular sciences*, 25(23), 12595. DOI: 10.3390/ijms252312595.
- Shin, H.-J., Na, H.-S., & Do, S.-H. (2020). Magnesium and Pain. *Nutrients*, 12(8), 2184. DOI: 10.3390/nu12082184.
- Stangherlin, A., & O'Neill, J. S. (2018). Signal Transduction: Magnesium Manifests as a Second Messenger. *Current biology : CB*, 28(24), R1403–R1405. DOI: 10.1016/j.cub.2018.11.003.
- Stanojević, M., Djuricic, N., Parezanovic, M., Biorac, M., Pathak, D., Spasic, S., Lopicic, S., Kovacevic, S., & Nesovic Ostojic, J. (2025). The Impact of Chronic Magnesium Deficiency on Excitable Tissues-Translational Aspects. *Biological trace element research*, 203(2), 707–728. DOI: 10.1007/s12011-024-04216-2.
- Sutjonong, T., Pulinggomang, B. B., Sirait, A. N., Surya Bratha, I. N. Y. D., & Husada, D. (2024). The role of magnesium sulphate infusion in controlling muscle spasms and rigidity in a child with severe generalised tetanus unresponsive to diazepam in a resource-limited hospital – a case report and literature review. *Pediatrica i Medycyna Rodzinna*, 20(2), 245–248. DOI: 10.15557/PIMR.2024.0036.
- Tam, M., Gómez, S., González-Gross, M., & Marcos, A. (2003). Possible roles of magnesium on the immune system. *European journal of clinical nutrition*, 57(10), 1193–1197. DOI: 10.1038/sj.ejcn.1601689.
- Veronese, N., Pizzol, D., Smith, L., Dominguez, L. J., & Barbagallo, M. (2022). Effect of Magnesium Supplementation on Inflammatory Parameters: A Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials. *Nutrients*, 14(3), 679. DOI: 10.3390/nu14030679.
- Vissers, R. J., & Purssell, R. (1996). Iatrogenic magnesium overdose: two case reports. *The Journal of emergency medicine*, 14(2), 187–191. DOI: 10.1016/0736-4679(95)02115-9.
- Xu, M. R., Wang, A. P., Wang, Y. J., Lu, J. X., Shen, L., & Li, L. X. (2024). Serum Magnesium Levels Are Negatively Associated with Obesity and Abdominal Obesity in Type 2 Diabetes Mellitus: A Real-World Study. *Diabetes & metabolism journal*, 48(6), 1147–1159. DOI: 10.4093/dmj.2023.0401.
- Xu, P., Cui, D., Jin, M., & Sun, L. (2024). Magnesium ions and dementia. *Journal of Neurorestoratology*, 12(1), 100094. DOI: 10.1016/J.JNRT.2024.100094.
- Yamanaka, R., Shindo, Y., & Oka, K. (2019). Magnesium Is a Key Player in Neuronal Maturation and Neuropathology. *International journal of molecular sciences*, 20(14), 3439. DOI: 10.3390/ijms20143439.
- Yoshimura, T., Ishikawa, N. F., Ogawa, N. O., Kusaka, S., Wakaki, S., Ishikawa, T., ... Ohkouchi, N. (2025). Magnesium isotopic variation in marine fish organs. *Progress in Earth and Planetary Science*, 12, 19. DOI: 10.1186/S40645-025-00690-X.
- Zaloga, G. P., & Roberts, J. E. (1990). Magnesium disorders. *Problems in Critical Care*, 4(3), 425–436. DOI: 10.1056/NEJMRA1510603.
- Zang, J., Chen, J., Tian, J., Wang, A., Liu, H., Hu, S., ... Ma, X. (2014). Effects of magnesium on the performance of sows and their piglets. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 5(1), 39. DOI: 10.1186/2049-1891-5-39.