

DOI: <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2024.321793>

УДК 553.7:663.(477)

E-mail:

shestopalov@nas.gov.ua  
<https://orcid.org/0000-0002-3223-3074>  
moiseevanp37@gmail.com  
<https://orcid.org/0009-0002-9535-6167>  
lesiuk.igs.nasu@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0001-7218-2358>  
kondratevgen@ukr.net

**Ключові слова:** рідкісноземельні елементи, мінеральні води, родовища, бальнеологія, можливості застосування.

**Keywords:** rare earth elements, mineral waters, deposits, balneology, prediction of application.

© Видавець Інститут геологічних наук НАН України, 2024. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

© Publisher Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2024. This is an Open Access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## МІНЕРАЛЬНІ ВОДИ З РІДКІСНОЗЕМЕЛЬНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ БАЛЬНЕОЛОГІЧНОГО НАПРЯМУ ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ

### MINERAL WATERS WITH RARE EARTH ELEMENTS AND FORECASTING THE BALNEOLOGICAL DIRECTION OF THEIR APPLICATION

**В. М. Шестопалов<sup>1</sup>, Н. П. Моїсеєва<sup>1</sup>, Г. В. Лесюк<sup>1</sup>, Є. І. Кондратюк<sup>2</sup>**  
**V. M. Shestopalov<sup>1</sup>, N. P. Moiseeva<sup>1</sup>, H. V. Lesiuk<sup>1</sup>, E. I. Kondratiuk<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна

<sup>2</sup> ТОВ «КВАРЦ», Львів, Україна

<sup>1</sup> Institute of Geological Sciences, NAS of Ukraine, 55-b O. Honchara Str., Kyiv, Ukraine, 01601

<sup>2</sup> LLC KVARTS, 8 Korolova Str., Chervonohrad, Lviv Region, Ukraine, 80100

У статті викладено результати одного з перших досліджень вмісту рідкісноземельних елементів (РЗЕ) у мінеральних водах Прикарпаття (Львівська область). Виявлено ряд лантаноїдів у концентраціях, близьких до вмісту РЗЕ в організмі людини, що може засвідчувати їх потенційну спроможність проявляти бальнеологічний ефект. Аналіз опублікованих даних показав значний і постійно зростаючий інтерес до розробки ліків на основі лантаноїдів. Зроблено припущення, що одним із бальнеологічних факторів виявленого раніше авторами антиканцерогенного ефекту мінеральних вод може бути наявність в них РЗЕ. За результатами аналізу хімічних властивостей РЗЕ, а також аналізу літературних даних щодо застосування лантаноїдів у медицині та власних результатів досліджень пропонується новий напрям дослідження можливого бальнеологічного застосування мінеральних вод з РЗЕ. Підкреслено, що ця проблема є актуальною, перш за все, з прикладної точки зору і тому потребує першочергової подальшої наукової і практичної детальної розробки, а також регіонального дослідження поширення підземних вод з перспективними концентраціями РЗЕ.

This paper presents the results of one of the first studies in Ukraine examining the presence of REE in mineral waters in the Precarpathian region (Lviv region). A number of lanthanides have been found in the mineral waters of the Lviv region at concentrations similar to those of REE in the human body. This finding suggests their potential ability to have a balneological effect. Analysis of published data has revealed significant and increasing interest in developing lanthanide-based medicines. It has been suggested that REE may be one of the balneological factors that contribute to the anti-carcinogenic effects of mineral waters, which were previously discovered by the authors. Based on the analysis of the chemical properties of REE, literature on the use of lanthanides in medicine, and our research results, we propose a new research direction: investigating the balneological

**Цитування:** Шестопалов В. М., Моїсеєва Н. П., Лесюк Г. В., Кондратюк Є. І. Мінеральні води з рідкісноземельними елементами та прогнозування бальнеологічного напрямку їх застосування. Збірник наукових праць Інституту геологічних наук НАН України. 2024. Т. 17, вип. 2. С. 141–154. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2024.321793>.

**Citation:** Shestopalov V. M., Moiseeva N. P., Lesiuk H. V., Kondratiuk E. I., 2024. Mineral waters with rare earth elements and forecasting the balneological direction of their application. Collection of scientific works of the Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine. Vol. 17, iss. 2. Pp. 141–154. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2024.321793>.

use of mineral waters containing REE. First and foremost, it is emphasized that this problem is relevant from an applied point of view. Therefore, priority should be given to further scientific and practical development, as well as regional research on the distribution of groundwater with promising concentrations of REE.

## ВСТУП

До рідкісноземельних елементів (РЗЕ) відносять ітрії, скандії а також елементи ряду лантану — лантанюїди (№ 57–71 періодичної системи хімічних елементів).

Перший з них — ітрії, був відкритий у 1794 р. Ю. Гадолінім, останній — прометій — у 1945 р. Дж. Маріїнським. Спершу РЗЕ класифікували як рідкісні землі (*terra rara*). Проте згодом, коли було встановлено досить значний ( $1,78 \cdot 10^{-2}\%$ , за масою) вміст РЗЕ у земній корі, їх почали відносити до розсіяних елементів (Полінг, 1964), але назва «рідкісні» землі залишилась.

У зв'язку з прогресуючою потребою у РЗЕ, зумовленою розвитком нових технологій, з другої половини ХХ ст. розпочалось посилене теоретичне та практичне їх вивчення. Застосування РЗЕ з відкриттям нових їх властивостей стає все ширшим і різноманітнішим.

Глобальний ринок рідкісноземельних металів зростає швидкими темпами. За останні 50 років його обсяг збільшився у 25 разів (з 5 тис. до 125 тис. т/рік) (Owolabi, Kizito, 2024). Прогнозується, що з 2016 і 2026 рр. глобальне споживання РЗЕ зростатиме на 4,4% на рік (Golroudbary et al., 2022; Vesković et al., 2024). Головними сферами застосування РЗЕ є: випуск магнітів (22% від обсягу споживання), різних конструкційних матеріалів (близько 19%), сучасних каталізаторів для нафтохімії (18%). РЗЕ застосовуються у космічних технологіях, лазерах, сонячних енергосистемах, електромобілях, при створенні магнітних матеріалів, для виготовлення міцних легких конструкцій (за незначного їх вмісту у сплавах), в ядерній промисловості, нанотехнологіях. Також РЗЕ використовують для виготовлення високоякісної оптики із скла та приладів (Balaram, 2019; Owolabi, Kizito, 2024 та ін.).

В Україні РЗЕ добувалися до 1991 р. Найбагатші їх родовища розташовані в нашій країні в межах Українського щита. Найбільшим за запасами в Європі є Азовське родовище. Родовища РЗЕ в Україні (Михайлов, 2010) пов'язані з карбонатитами (Новополтавське, Маріупольське, Жовтневе) і з карбонатним метасоматозом (Азовське, Ястребецьке та ін.). У межах Українського щита виділено чотири райони ендегенної рідкісноземельної мінералі-

зації: Подільський, Пержанський, Криворізький та Приазовський. Відомі прояви рідкісноземельної мінералізації, пов'язані з корою вивітрювання, а також з монацитовмісними розсипами (Михайлов, 2010).

РЗЕ переважно накопичуються в гранітах і лужних породах (сієнітах і карбонатитах). Найбільш важливі їх мінерали: монацит ( $(Ce, La)PO_4$ ), ксенотим ( $YPO_4$ ), бастнезит ( $(Ce, La)$ ) та ін. — близько 70 мінералів. Як домішки РЗЕ містяться ще у 280 мінералах (Михайлов, 2010).

Домінуючий вміст того чи іншого елемента у рудах залежить від типу порід. Наприклад, церій і торій переважають у гранітах, сієнітах, пегматитах (Миколаївське і Сабарівське родовища Придніпров'я, Яструбецьке — Полісся); ітрії, цирконій, церій, лантан — у лужних породах (Гнутовське родовище, Приазов'я); уран і торій — у калієвих (Кіровоградщина) (Михайлов, 2010).

Дослідження РЗЕ у підземних водах рудоносних районів Українського щита, безумовно, є важливим напрямом, оскільки можна прогнозувати їх активний перехід із порід у воду і, відповідно, наявність аномальних концентрацій.

Ще у далекому 1934 р. в Чехії вийшло у світ цікаве дослідження українського автора (Галаган, 1934), в якому охарактеризовано всі відомі на той час РЗЕ та висвітлено деякі питання їх використання у медицині (зокрема, церію, празеодиму та самарію). У Радянському Союзі у 1970-х роках вийшла монографія (Крайнов, 1973), в якій детально висвітлено геохімію РЗЕ у ґрунтових водах. Зокрема, у зв'язку з геохімічними пошуками корисних копалин розглянуто розподіл РЗЕ довкола родовищ, описано особливості регіонального поширення вод, збагачених РЗЕ. Подібні дані наведено і в монографії (Балашов, 1976), де висвітлено вміст РЗЕ у підземних і поверхневих водах та їх міграція у вигляді комплексів з карбонатами та бікарбонатами.

Однією з останніх публікацій щодо РЗЕ у підземних водах є стаття польських геологів (Rogowsky, Kaszar-Kuzava, 2016), в якій досліджено використання цих металів для аналізу генезису підземних вод, зокрема вивчення термальних вод та їх колекторів. Наголошується, що в результаті таких процесів, як вивітрювання, розчинення,

перекристалізація або діагенез РЗЕ можуть доволі легко переходити з мінералів і гірських порід у водне середовище. Аналіз розподілу вмісту РЗЕ у водах використовується для встановлення походження вод, їх змішування, визначення умов рівноваги у системі вода–порода, перебігу геохімічних процесів на шляхах водних потоків, виявлення зон живлення або порід-колекторів. Для правильного розуміння теплових умов у системі термальні води – породи-колектори особливо важливо точно визначити хімічний склад (включаючи РЗЕ) вод і порід. Значна увага до РЗЕ у гідрогеології та гідрогеохімії пов'язана, насамперед, з використанням їх як чутливих індикаторів будь-яких біогеохімічних процесів при взаємодії вода–порода, незалежно від типу води – звичайної, мінеральної або термальної.

У статті (Wysocka et al., 2018) розглянуто джерела надходження та поведінку РЗЕ у гідросфері. Особливу увагу приділено природним водам Європи, зокрема Польщі. У роботі висвітлено результати досліджень концентрацій РЗЕ у природних водах Польщі (підземних та поверхневих), обговорено потенційні джерела надходження РЗЕ у води та визначено фактори, що впливають на концентрацію РЗЕ та характер їх розподілу. Окремо розглянуто техногенне надходження РЗЕ та наведено деякі приклади антропогенних чинників. Проте, зазначено, що у Польщі, як і в Україні, вивчення цього питання залишається «білою плямою», оскільки вміст РЗЕ, передусім у підземних водах, майже не досліджений. З 2015 р. розпочато вивчення вмісту РЗЕ у термальних водах Піддембіце в Польщі, у мінеральних водах Крилиць-Здруй та Прикарпаття в Україні (Моисеев, 2017; Шестопалов та ін., 2022).

Дослідження поведінки РЗЕ потребує використання сучасних методів дослідження, забезпечення аналітичним обладнанням з високою роздільною здатністю (ЯМР, ЕПР, ІК-спектроскопія, рентгеноскопія та ін.). Через високу вартість і незадовільний економічний стан в Україні ці прилади є в дуже обмеженій кількості в окремих науково-дослідних установах. Тому планомірні пошукові роботи покладів РЗЕ на більшості території України, зокрема, на Прикарпатті, раніше не проводились. Винятком є супутні роботи Є. П. Студзінського у 1994 р. з вивченням РЗЕ у пластових водах Покутсько-Буковинських Карпат.

У мінеральних водах Прикарпаття ми вперше виявили ітрію та ряд РЗЕ (Моисеев, 2017): лантан,

церій, празеодим, неодим, самарій, європій, тербій, диспрозій, гольмій, ербій, тулій, ітербій, лютецій. Слід зазначити, що радіоактивний прометій у жодній із досліджених проб води не виявлено.

**Мета даної роботи:** дослідження підземних вод з РЗЕ на прикладі мінеральних вод Прикарпаття з метою оцінювання їх поширеності та можливості застосування у бальнеології.

## МАТЕРІАЛИ І МЕТОД

Об'єктом досліджень є підземні мінеральні води Прикарпаття, предмет досліджень – виявлення у цих водах РЗЕ і прогнозування їх бальнеологічних властивостей.

Проби підземних вод відібрано з джерел і експлуатаційних та розвідувальних свердловин. На вміст РЗЕ проаналізовано мінеральні води окремих родовищ Львівської області як найперспективніші за своєю генезою та хімічним складом (Економічний атлас, 2007).

Проби природних мінеральних вод відбирали за стандартизованими методиками. Аналіз вмісту компонентів і стабілізацію проб води проводили згідно з (ДСТУ ISO 5667–11: 2005; ДСТУ ISO 5667–14: 2005; ДСТУ 878–93) за стандартизованими методиками.

Для отримання достовірних даних визначення концентрації легкозмінювальних компонентів – сірководню, вуглекислоти, гідрокарбонат-іона, заліза, нітрат-іонів та амонію, вимір рН і Eh води (Моисеев, 2017) проводили у польових умовах безпосередньо біля джерел і свердловин. Згідно із стандартними вимогами проби підкислювали до рН 2,5–3,0 за допомогою HCl марки ч.д.а. Порівняльні проби – бідистильована вода з відповідною кількістю кислоти. Додатково герметизували закриті проби за допомогою нейтральної синтетичної плівки марки «PARAFILM «M» LABORATORY FILM».

Концентрації мікроелементів у водах і порівняльних пробах визначали на базі Центру колективного користування разом зі співробітниками Інституту геохімії, мінералогії та рудоутворення НАН України ім. М. П. Семененка, застосовуючи мас-спектрометр Thermo Finnigan Element-2 з приставкою лазерної абляції New Wave UP-193 SS. Похибка вимірювань  $\delta \leq 3\%$  згідно з Додатком до свідоцтва про атестацію № ПТ-0347/01.

Отримані результати відповідають III категорії точності згідно з (ОСТ 41–08–212–82).

## РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

**Хімічні властивості РЗЕ**

Особливістю будови атомної оболонки лантанодів є незаповнена *f*-оболонка (Полінг, 1964), яка, подібно до атомів із незаповненою *d*-оболонкою, добудовується у міру збільшення атомного номера елемента ряду. Це передбачає можливу подібність їх хімічних властивостей, про яку можна робити висновки, розглядаючи передусім питання їх здатності до комплексоутворення.

РЗЕ поділяють на дві групи: важкі – ітрієва, легкі – церієва. Відмінності груп обумовлені особливостями будови їх електронних оболонок.

Стабільність комплексних сполук тим вища, чим більший іонний радіус катіона. РЗЕ зазвичай тривалентні, координаційне число дорівнює 6, або 8–10. РЗЕ часто утворюють змішані комплекси з різними лігандами (Яцимирский и др., 1979). Константи стійкості комплексів РЗЕ дещо відрізняються від констант комплексів перехідних *d*-елементів, що зумовлено різницею у координаційних числах. Доведено, що найбільш стабільними є п'ятичленні цикли. Хелати елементів з координаційним числом 6–9 малостійкі (Костромина, 1990).

**РЗЕ у мінеральних водах Прикарпаття**

Зважаючи на те, що, згідно із сучасними уявленнями, мікроелементи з концентрацією у воді менше як 0,0001 мг/дм<sup>3</sup>, є незначущими з точки зору класифікації мінеральних вод (Класифікація..., 2003) та їх бальнеологічних властивостей, розглянуто зразки, в яких концентрації РЗЕ вищі за наведене значення.

На вміст РЗЕ ми проаналізували проби мінеральних вод окремих родовищ Львівської області (табл. 1). У жодній із порівняльних проб РЗЕ не виявлено. Це перша робота такого напрямку, оскільки, бальнеологічну роль мінеральних вод, що містять РЗЕ, раніше не вивчали.

Природні мінеральні води є багатоконпонентною системою, яка складається з десятків форм макро- і мікроелементів, детальний розрахунок яких і точне експериментальне вивчення дуже складні. Один і той самий елемент може існувати у підземних водах у вигляді різних форм міграції (вільні іони, гідроксокомплекси, комплекси з різними неорганічними та органічними молекулами), утворювати різнолігандні комплекси та інші сполуки.

Дослідження форм знаходження елементів у мінеральних водах експериментально є складним з кількох причин: низькі концентрації елементів у водах; наявність фонового електроліту та розчинених органічних сполук, які можуть впливати на визначення окремих форм; рН деяких мінеральних вод обмежує застосування методів аналізу, оскільки більшість мікроелементів піддається гідролізу. До цього часу для багатьох типів мінеральних вод невідомі не лише форми знаходження, а й кількісний вміст розчинених мікроелементів, детальне вивчення якого розпочалося не так давно (Моїсеєв та ін., 2010) і, тим більше, малодосліджених РЗЕ та органічних сполук. Тому детальне розшифрування форм міграції РЗЕ у мінеральних водах є проблематичним. Однак за раніше визначеними (Моїсеєв, 2014) формами міграції мікроелементів для деяких типів мінеральних вод можна зрозуміти важливість питання щодо глибшого пізнання їх природи та механізмів впливу на метаболічні процеси в організмі.

**Обговорення результатів**

За хімічними властивостями лантанодиди мають перебувати у мінеральних водах у вигляді комплексів. На даний час відомо, що застосування комплексних сполук *d*-металів з органічними лігандами є більш результативним, ніж застосування індивідуальних органічних сполук (наприклад: Aragón-Muriel et al., 2020; Tyula et al., 2022; da Silva et al., 2023; Jorge et al., 2024; Nowakowska et al., 2024 та ін.).

У складі лікувальних препаратів РЗЕ, переважно є сполуками із лігандами, що містять кисень та/або азотовмісні групи (*b*-дикетони, амінокислоти, пептиди та ін.), часто утворюються змішані комплекси з різними лігандами (Іванов и др., 2009; Голубева и др., 2010; Sinicropi et al., 2022; Safinejad et al., 2022; Jorge et al., 2024 та ін.). Такі сполуки характерні для мінеральних вод типу «Нафтуся» як Прикарпатського, так і Подільського регіонів (Шестопалов и др., 2013; Моїсеєва и др., 2013).

У процесі багаторічного вивчення мінеральних вод типу «Нафтуся» спостерігались ефекти їх антиканцерогенної дії (Патент України № 2068, 1993). Згодом антиканцерогенний ефект мінеральних вод типу «Нафтуся» був підтверджений в експерименті (Моїсеєв, 2017; Шестопалов та ін., 2015).

**Застосування РЗЕ у медицині.** Лантанодиди виявлені в організмі людини (наприклад, Ascenzi et al., 2020). Їх функціональну необхідність досі не

**Таблиця.** Вміст рідкісноземельних елементів у мінеральних водах Львівської області, мкг/дм<sup>3</sup>

**Table.** Content of rare earth elements in mineral waters of Lviv region, µg/dm<sup>3</sup>

Елемент	Трускавець			Помірки	Східниця					
	св. 21-Н	св. 22-Д	св. 8-НО		св. 24-Р	св. 1	дж. 3	дж. 10	дж. 13	дж. 21
Y 89(HR), ітрій	0,030	0,048	0,254	0,052	0,706	0,052	0,142	0,636	0,716	0,724
La 139(HR), лантан	0,058	0,058	0,188	0,142	0,180	0,044	0,054	0,126	0,168	0,168
Ce 140(HR), церій	0,162	0,254	0,544	0,752	0,480	0,264	0,274	0,370	0,518	0,476
Pr 141(HR), празеодим	0,008	0,010	0,052	0,018	0,040	0,006	0,010	0,032	0,044	0,030
Nd 146(HR), неодим	0,024	0,040	0,226	0,074	0,234	0,022	0,026	0,134	0,236	0,128
Sm 149(HR), самарій	0,008	0,012	0,064	0,012	0,068	0,004	0,014	0,040	0,064	0,030
Eu 153(HR), європій	0,052	0,106	0,114	0,442	0,198	0,156	0,178	0,118	0,208	0,178
Gd 157(HR), гадоліній	0,070	0,124	0,190	0,516	0,304	0,214	0,228	0,198	0,294	0,266
Tb 159(HR), тербій	-	0,002	0,012	0,004	0,0160	0,002	0,002	0,012	0,016	0,012
Dy 163(HR), диспрозій	0,004	0,012	0,044	0,008	0,090	0,006	0,014	0,082	0,102	0,070
Ho 165(HR), гольмій	-	-	0,004	-	0,012	-	-	0,006	0,010	0,006
Er 167(HR), ербій	0,002	0,002	0,024	0,002	0,058	0,008	0,016	0,060	0,066	0,064
Tm 169(HR), тулій	-	-	0,004	0,002	0,010	0,002	0,002	0,010	0,012	0,008
Yb 173(HR), ітербій	0,002	0,004	0,018	0,004	0,062	0,002	0,016	0,066	0,072	0,064
Lu 175(HR), лютецій	-	-	0,002	0,002	0,014	0,002	0,004	0,012	0,016	0,012
Сума	0.402	0,672	1.740	2.048	2.472	0.781	1.061	1.902	2.542	2.224
C <sub>орг</sub> валове, мкг/дм <sup>3</sup>	19,8	14,4	18,6	18,0	9,0	5,7	14,3	6,0	6,0	6,0

**Закінчення таблиці**

Елемент	Верхнє Синьовидне			Урич		Підбуж	Розгірче	Гребенів	Солуки	
	св. 10	св. 18	св. 25	дж. 1	дж. 2	св. 1Е	св. 49	дж. 248	св. 11-41Р	св. 1586
Y 89(HR), ітрій	0,016	0,026	0,018	0,072	0,032	0,290	0,022	0,016	0,016	0,002
La 139(HR), лантан	0,020	0,110	0,022	0,372	0,052	0,054	0,026	0,046	0,020	0,004
Ce 140(HR), церій	0,056	0,770	0,856	0,986	0,334	0,244	0,206	0,096	0,206	0,006
Pr 141(HR), празеодим	0,006	0,016	0,004	0,092	0,008	0,008	0,002	0,004	0,006	-
Nd 146(HR), неодим	0,022	0,040	0,016	0,348	0,034	0,030	0,012	0,014	0,012	0,002
Sm 149(HR), самарій	-	0,004	-	0,046	0,006	0,008	0,008	0,012	0,012	-
Eu 153(HR),європій	0,008	0,248	0,804	0,194	0,242	0,144	0,146	0,074	0,172	0,002
Gd 157(HR), гадоліній	0,014	0,282	0,920	0,218	0,274	0,162	0,174	0,042	0,216	-
Tb 159(HR), тербій	-	0,002	0,004	0,004	0,004	0,004	0,002	-	0,002	-
Dy 163(HR), диспрозій	0,002	0,004	0,006	0,016	0,006	0,030	0,006	0,002	0,002	0,002
Ho 165(HR), гольмій	-	-	-	-	-	-	0,006	-	0,002	0
Er 167(HR), ербій	-	0,004	-	0,006	0,002	0,026	-	-	-	-
Tm 169(HR), тулій	-	-	-	-	-	0,004	-	-	-	-
Yb 173(HR), ітербій	0,004	0,238	0,004	0,01	0,006	0,022	0,004	0,002	0,008	-
Lu 175(HR), лютецій	-	0,002	-	0,002	0,002	0,004	0,002	-	0,002	-
Сума	0.0740	1.974	2.780	2,366	0.624	1.030	0.622	0.118	0.676	0,018
C <sub>орг</sub> валове, мкг/дм <sup>3</sup>	24.4	22,1	21,3	6,6	30,0	4,8	1,8	Не. визн.	3.0	Не. визн.

встановлено, але здатність впливати на біологічні процеси не викликає сумніву. Невелику кількість РЗЕ знайдено у селезінці —  $10^{-4}\%$ , ще менше ( $10^{-6}\%$ ) — у дентині та емалі зубів, у крові та ін. Ці дані, хоча і доволі скупи, разом з особливостями електронної структури *f*-елементів наштотують на думку про подібність їх функції до функції *d*-елементів перехідного ряду. Максимальна концентрація РЗЕ у питних водах — близько  $1 \text{ мкг/дм}^3$ . Особливо небезпечним є радіоактивний прометій, який, на щастя, в проаналізованих нами мінеральних водах відсутній.

Як потенційні комплексоутворювачі (незаповнена *f*-електронна оболонка) лантаноїди здатні утворювати сполуки з багатьма органічними лігандами (вуглеводами, амінокислотами, оксикислотами, нуклеотидами, фосфатидами, вітамінами), а також з біополімерами, що підтверджено низкою досліджень (наприклад: Труш и др., 2002; Голубева и др. 2010; Schijf, Su et al., 2025).

Завдяки подібності біологічних властивостей іонів РЗЕ та іонів кальцію, їх широко використовують у медичних дослідженнях (Kaczmarek et al., 2018; Barker et al., 2022; Wang, Li, 2022).

Перший представник РЗЕ, застосований у терапевтичних цілях, — церій, оксалат якого був використаний як протиблювотний засіб (Kaczmarek et al., 2018). З початку ХХ ст. РЗЕ використовують у різних сферах медицини, наприклад солі РЗЕ — для лікування туберкульозу, атеросклерозу, гіперфосфатемії, ангіни (Fricker, 2006; Azab et al., 2013; Zhang et al., 2017; Van et al., 2017).

Завдяки подібності іонного радіусу іони лантаноїдів можуть заміщати кальцій у багатьох біомолекулах, не змінюючи при цьому їх функціональність. Наприклад, вони втручаються в кальцієзалежні реакції згортання крові. Антитромботичні препарати на основі лантаноїдів мають клінічне застосування, їх використовують поряд з добре відомим гепарином (Barker et al., 2022).

Також РЗЕ використовують у вигляді комплексонів як люмінофори (La, Pr, Nd, Sm) у лазерній терапії, при діагностиці магнітно-резонансною томографією (МРТ), у масовій цитометрії та ін. (Aime et al., 2009; Ascenzi et al., 2020; Li et al., 2023; Martin et al., 2023).

Наноматеріали, синтезовані на основі РЗЕ, демонструють чудову стабільність та біосумісність, які можна додатково покращити шляхом модифікації поверхні або функціоналізації (додаванням функціональних груп). Ці матеріали можуть

бути багатофункціональними носіями для транспортування ліків (Wang et al., 2025).

Окрема сфера застосування лантаноїдів у медицині — лікування онкологічних захворювань (наприклад: Труш, 2001; Голубева и др., 2010; Рукк и др., 2014; Teo et al., 2016; Ямбулатов, 2017; Sinicropi et al., 2022; Wang, Li, 2022; Bellot et al., 2024). Майже половина комплексних сполук, що використовуються при лікуванні пухлин, — лантаноїдні ліки. Ймовірно, лантаноїди, потрапляючи в організм людини, здатні накопичуватися у пухлинах у значній кількості та порушувати в них обмін кальцію, магнію та фосфору, руйнуючи пухлину, але механізм дії цих ліків остаточно ще не визначений. На цей час для діагностики та лікування раку використовують координаційні комплекси 15 рідкісноземельних елементів (Patyal et al., 2023).

Певний вплив на біологічні властивості лантаноїдів надає наявність в електронних оболонках атомів *f*-електронів завдяки ефекту зумовлених ними магнітних мікрополів (Benzly, 2017). Саме цим пояснюється здатність лантаноїдів підвищувати фагоцитарну активність лейкоцитів крові.

Застосування лантаноїдів у медицині також пов'язане з їх антиоксидантними та антивірусними властивостями (Rim, 2016; Barker et al., 2022; Dong et al., 2022 та ін.). Вважають, що лантаноїди впливають на різні стадії процесу згортання крові: пригнічують синтез протромбіну, виявляють антагоністичні властивості щодо тромбіну, діють як антиметаболіти  $\text{Ca}^{2+}$ , витісняючи його із систем з одним або більше білковими факторами коагуляції; через гладкі клітини підвищують рівень вільного гепарину в крові при введенні у доволі великих дозах (Иванов и др., 2009). Gd(III), Tb(III), La(III), Dy(III), Pr(III), Sm(III) та Ce(III) можуть заміщати Ca(II) у процесі утворення тромбіну з протромбіну або претромбіну 1 за допомогою активованого фактора X (Fuirie et al., 1976).

У багатьох роботах описано протизапальний, антимікробний та ранозаживляючий (Antonenco et al., 2012) ефект лантаноїдів, їх високу спорідненість до фосфоліпідів та «стабілізування» мембрани клітин, блокування іонних каналів — тому карбонати лантану у вигляді ліків «fosrenol» застосовуються при гіперфосфотенії нирок. Така дія лантаноїдів на осередок запалення подібна до ефекту кортикостероїдів. За даними ВОЗ 80% жителів міст дихає повітрям, яке часто містить отруйні домішки, що призводить до дермозахворювань.

Більш детально наведемо деякі виявлені ефекти медичного застосування сполук **лантану** та

інших небагатьох досліджених рідкісноземельних елементів.

**Лантан** утворює комплекси із складовими організму, зменшує розвиток гострих запалень і мутацію у клітинах. На основі РЗЕ був створений препарат «Глікоген», він входить у склад армійських пакетів як захисні ліки для шкіри та органів дихання, а також до складу косметики (Пешук та ін., 2007).

Карбонат лантану використовують при лікуванні гіперфосфатемії – підвищення концентрації неорганічних фосфатів у сироватці крові (наприклад: Joy et al., 2006; Ketteler et al., 2013; Lloret et al., 2013; Yaguchi et al., 2019; Fang, Chen, 2024 та ін.).

Лантан покращує також ріст рослин (de Oliveira et al., 2015; Contreras-Martínez et al., 2022 та ін.), у багатьох на РЗЕ Китаї його застосовують як мікродобриво.

**Церій** та його похідні з початку ХХ ст. використовують як засоби для лікування ран. Зокрема, нітрат церію застосовують для лікування глибоких опіків. Згодом були виявлені його антимікробні властивості, зокрема сульфат калію та  $\text{Ce}^{4+}$  застосовували як антисептичний порошок під назвою «ceriform», в якому бактеріостатичний ефект  $\text{Ce}^{4+}$  зумовлювався його окиснювальними властивостями (Barker et al., 2022).

Наночастинки оксиду церію (III) використовують для лікування захворювань, пов'язаних з активними формами кисню, включаючи серцеві захворювання, хворобу Альцгеймера та рак (Rajeshkumar, Naik, 2018; Barker et al., 2022).

Церій у вигляді комплексних органічних сполук застосовують для лікування стресів, депресій, серцевих хвороб і лор-захворювань, у стоматології як антиоксидант та антивірусний препарат (Щербаков, 2011; Barker et al., 2022).

Наночастинки оксиду церію ( $\text{CeO}_2$ ) мають активність, подібну до активності супероксиддисмутази та каталази, що дає можливість застосовувати їх для ефективного знешкодження надлишку вільних радикалів в організмі, а також розглядати як потенційний компонент терапії пухлин (Wang et al., 2025).

**Неодим** застосовують при лікуванні гінекологічних захворювань методом лазерної терапії (Паузіна и др., 2020). Неодимові магніти, завдяки їхній здатності генерувати статичне магнітне поле, використовуються, наприклад, у приладах магнітно-резонансної томографії для діагностики та лікування хронічного больового синдрому, артриту, загоєння ран, безсоння, головного болю

та ряду інших захворювань (Yüksel et al., 2018). Останнім часом досліджуються можливості використання наноксидів неодиму для лікування деяких форм раку, наприклад раку печінки та легень (Ahmad et al., 2022).

**Самарій і тулій** стимулюють метаболізм, притамовують больові синдроми (Крылов, 2007). Препарати на основі ізотопу Sm-153 використовують для полегшення больового синдрому при метастазах у кістках, наприклад (Sartor et al., 2007; Longo et al., 2013).

**Гадоліній** активно використовують як контрастний елемент у МРТ. На цей час синтезовано новий протизапальний терагностичний МРТ-агент, який впливає на медіатори запалення для візуалізації та одночасного лікування запальних захворювань (Sung et al., 2023).

При лікуванні за допомогою РЗЕ застосовують лазерну терапію або накопичують ці елементи у ракових пухлинах безпосереднім введенням мікроголок (Свидетельство ПИ-ННФ С-77–52865, 2015). Бальнеологія лантаноїдів вивчалася мало, можливо, через складність визначення їх низьких концентрацій, або зовсім не вивчалась.

Передбачений нами механізм бальнеологічної дії РЗЕ полягає у такому. Припускаємо, що багаточленні хелати біометалів РЗЕ є менш стабільними, ніж *d*-елементів. При введенні в організм комплексів РЗЕ з мінеральною водою легше відбувається заміщення в них лігандів конкурентними групами ДНК, білків, ферментів та ін. При цьому біологічна активність комплексів перевищує активність індивідуальних елементів (Моисеев, 2017). Крім того, більш висока валентність РЗЕ, ніж *d*-елементів, імовірно, посилює їх протипухлинну активність, збільшуючи ступінь «зшивки» уражених молекул в організмі, яка перешкоджає розвитку пухлин.

Таким чином, РЗЕ можуть обумовлювати антиканцерогенну дію на організм або безпосередньо завдяки своїм хімічним властивостям, або посилюючи дію органічних сполук мінеральних вод, зокрема типу «Нафтуса».

Перевагою введення в організм РЗЕ з мінеральною водою, у порівнянні із застосуванням мікроголок безпосередньо у пухлинах, є їх доступність до будь-яких внутрішніх органів.

Вплив РЗЕ може бути одним із бальнеологічних факторів виявленого нами (Шестопалов та ін., 2015) антиканцерогенного ефекту мінеральних вод.

Інші бальнеологічні ефекти РЗЕ у мінеральних водах, як і кумулятивна дія на організм окремих лантанодів, потребують масштабного дослідження на основі сучасної аналітичної бази та за участю вчених різного наукового профілю — гідрогеологів, хіміків, бальнеологів і лікарів.

## ВИСНОВКИ

За отриманими результатами зроблено такі висновки.

1. Розвідка декількох родовищ РЗЕ в Україні засвідчує поширення цих елементів, як мінімум, у підземних водах рудоносних районів Українського щита, самих родовищах і ореолах розсіяння навколо них. Дослідженнями вмісту РЗЕ у мінеральних водах Прикарпаття у межах Львівської області, водовмісні осадові відклади яких суттєво відрізняються від порід відкритих родовищ у межах Українського щита, виявлено широке поширення цих елементів у підземних водах різних типів.

2. Аналіз наявності РЗЕ в організмі людини та різні напрями їх застосування під час лікування засвідчують імовірну перспективність використання мінеральних вод із вмістом РЗЕ у бальнеології. На користь можливості такого застосування мінеральних вказує подібність лантанодів до *d*-елементів (біологічна роль яких в організмі добре вивчена і відома) за атомною будовою, хімічними властивостями, біологічною дією на організм.

3. У мінеральних водах Львівської області виявлено ряд лантанодів у концентраціях, близьких до їх вмісту в організмі людини, що засвідчує їх здатність проявляти бальнеологічний ефект. Можна припустити, що деякі ефекти дії мінеральних вод можна пояснити наявністю в них РЗЕ. Це, напри-

клад, ранозагоювальний ефект Урицьких джерел (Василечко, 2006), який раніше пояснювали вмістом у водах срібла, яке насправді відсутнє. Можливо, що вміст РЗЕ у мінеральних водах типу «Нафтуса» підсилює виявлені (Моисеев, 2017) їх антиоксидантні властивості.

4. Вплив РЗЕ може бути одним із бальнеологічних факторів виявленого нами раніше (Шестопалов та ін., 2015) антиканцерогенного ефекту мінеральних вод.

5. Перевагою введення в організм РЗЕ з мінеральною водою, у порівнянні із застосуванням мікроглок безпосередньо у пухлинах, є їх легке транспортування до будь-яких внутрішніх органів.

6. Досі в Україні не проводилось системного та комплексного дослідження вмісту та поширення РЗЕ у підземних водах — як мінеральних, так і питних. Потребують розвитку цілеспрямовані дослідження щодо бальнеології, впливу РЗЕ на організм людини. Ця проблема є актуальною, передусім з прикладної точки зору. Необхідні першочергова подальша наукова і практична детальна розробки, а також регіональне дослідження поширення підземних вод з перспективними концентраціями РЗЕ.

7. Вивчення РЗЕ у питних підземних водах є новим обширним і багатообіцяючим напрямом досліджень практичного спрямування.

8. Використання РЗЕ як індикаторів багатьох гідрогеохімічних процесів дає можливість визначити походження вод, шляхи їх міграції, ідентифікувати водовмісні гірські породи, зрештою, змодельювати окремі мінералогічні процеси. Отже, широке застосування РЗЕ у різних сферах гідрогеологічних досліджень за відповідних зусиль може перерости у великий напрям «гідрогеології РЗЕ».

## REFERENCES

Balashov Yu. L., 1976. Geochemistry of rare earth elements. M.: Nauka. (In Russian).

Vasilechko V. O., Hryshchuk G. V., Tymoshuk S. V., Shchur R. S., Bilyk O. O., 2006. Chemical-analytical study of waters of Tustan springs. *Environment and health*. No 1. Pp. 70–74. (In Ukraine).

Galagan M., 1934. Rare earths. A short systematic essay. Prague. (In Ukraine).

Golubeva I. S., Yavorskaya N. P., Baryshnikova M. A., 2010. Use of lanthanoid-based drugs in immunodeficiency. *Bioterapeuticheskiy zhurnal*. No 4. Pp. 89–95. (In Russian).

Балашов Ю. Л. Геохимия редкоземельных элементов. М.: Наука, 1976. 258 с.

Василечко В. О., Гришук Г. В., Тимошук С. В., Щур Р. С., Білик О. О. Хіміко-аналітичне дослідження вод Тустанських джерел. *Довкілля та здоров'я*. 2006. № 1. С. 70–74.

Галаган М. Рідкі землі короткий систематичний нарис. Прага, 1934. 40 с.

Голубева І. С., Яворська Н. П., Барышнікова М. А. Применение препаратов на основе лантаноидов при иммунodefиците. *Биотерапевтический журнал*. 2010. № 4. С. 89–95.

- DSTU ISO 5667-11:2005. Water quality. Sampling of samples. Part 11: Guidelines for the sampling of groundwater (ISO 5667-11:1993, IDT). (In Ukraine).
- DSTU ISO 5667-14:2005. Water quality. Sampling of samples. Part 14. Guidelines for quality assurance of sampling and processing of natural water samples (ISO 5667-14:1998, IDT). (In Ukraine).
- DSTU 878-93. Mineral drinking water. [Reprint, May 1996]. K. 1996. 88 p. (State Standard of Ukraine). (In Ukraine).
- Matolich B. M. (Ed.), 2007. Economic Atlas of Lviv Oblast. Lviv. (In Ukraine).
- Ivanov A. B., Shcherbakov O. D., Usatenko A. V., 2009. Structurally sensitive properties and biomedical applications of lanthanides. *Journal Successes of chemistry*. Vol. 48, No 9. Pp. 924-941. (In Russian).
- Shestopalov V. M. (Ed.), 2003. Classification of mineral waters of Ukraine. Kyiv: Makkom. (In Russian).
- Kostromina N. A., 1990. Chemistry of coordination compounds. M: Publishing house Vyssh. school. (In Russian).
- Krainov S. R., 1973. Geochemistry of rare elements in underground waters (in connection with geochemical searches of deposits). M.: Nedra. (In Russian).
- Krylov V. V., 2007. Radionuclide therapy of Sm-oxybioforms in metastatic bone lesions. ARF, Obninsk: Med. radiologist center of the Russian Academy of Sciences. (In Russian).
- Mikhailov V. A., 2010. Rare earth ores of the world: geology, resources, economy. Kyiv: KSU. (In Russian).
- Moiseev A. Yu., 2014. Complexes of trace elements in natural mineral waters. *Geochemistry and ore formation*. Iss. 34. Pp. 85-93. (In Ukraine).
- Moiseev A. Yu., 2017. Peculiarities of the chemical composition and balneological application of mineral waters. Kyiv: Kim. (In Ukraine).
- Moiseeva N. P., Shestopalov V. M., Moiseev A. Yu., 2013. Organic matter of mineral waters of the Naftusya type. *Geochemistry and ore formation*. Iss. 33. Pp. 53-63. (In Russian).
- Moiseyev A. Yu., Druzhina M. O., Moiseeva N. P., Shestopalov V. M., 2010. Biological aspects of the use of natural mineral waters. K: Kim. (In Ukraine).
- Ost 41-08-212-82. "Management of the quality of analytical work. Classification of methods of analysis of mineral raw materials according to the accuracy of the results". (In Russian).
- Patent of Ukraine No 2068 dated August 17, 1993. The method of correcting hematopoiesis in case of radiation damage to the body. (In Ukraine).
- Pauzina O. A., Apolikhina I. A., Malyshkina D. A., 2020. Possibilities of using neodymium laser (Nd: YAG) in patients with concomitant diseases which are accompanied by pathological discharge from the genital tract. *Gynecology*. Vol. 22. No 4. Pp. 75-81. DOI:10.26442/20795696.2020.4.200277. (in Russian).
- Peshuk L. V., Bavika L. I., Demidov I. M., 2007. Technology of perfume and cosmetic products. K.: Centre for Educational Literature. (In Ukrainian).
- ДСТУ ISO 5667-11:2005. Якість води. Відбирання проб. Частина 11. Настанови щодо відбирання проб підземних вод (ISO 5667-11:1993, IDT).
- ДСТУ ISO 5667-14:2005. Якість води. Відбирання проб. Частина 14. Настанови щодо забезпечення якості відбирання та оброблення проб природних вод (ISO 5667-14:1998, IDT)
- ДСТУ 878-93. Води питні мінеральні. [Перевидання, травень 1996]. К. 1996. 88 с. (Держстандарт України)
- Економічний атлас Львівщини. За ред. Б. М. Матолича. Львів: ПП Лукашук В. С., 2007. 68 с.
- Иванов А. Б., Щербаков О. Д., Усатенко А. В. Структурно чувствительные свойства и биомедицинские применения лантаноидов. *Успехи химии*. 2009. Т. 48, № 9. С. 924-941.
- Классификация минеральных вод Украины: За ред. В. М. Шестопалова. Киев: Макком, 2003. 121 с.
- Костромина Н. А. Химия координационных соединений. М: Высш. Школа, 1990. 432 с.
- Крайнов С. Р. Геохимия редких элементов в подземных водах (в связи с геохимическими поисками месторождений). М.: Недра, 1973. 296 с.
- Крылов В. В. Радионуклидная терапия Sm-оксибиоформ при метастатических поражениях костей. АРФ, Обнинск: Мед. радиолог. центр РАН, 2007. 1535 с.
- Михайлов В. А. Редкоземельные руды мира: геология, ресурсы, экономика. Киев: КГУ, 2010. 223 с.
- Моисеев А. Ю. Комплексы микроэлементов в природных минеральных водах. *Геохимия та рудоутворення*. 2014. Вип. 34. С. 85-93.
- Моисеев А. Ю. Особенности химического состава и бальнеологического применения минеральных вод. Київ: Кім, 2017. 464 с.
- Моисеева Н. П., Шестопалов В. М., Моисеев А. Ю. Органическое вещество минеральных вод типа "Нафтуса". *Геохимия та рудоутворення*. 2013. Вип. 33. С. 53-63.
- Моисеев А. Ю., Дружина М. О., Моисеева Н. П., Шестопалов В. М. Біологічні аспекти застосування природних мінеральних вод. К: Кім, 2010. 123 с.
- ОСТ 41-08-212-82. «Управление качеством аналитической работы. Классификация методов анализа минерального сырья по точности результатов».
- Патент України № 2068 від 17.08.93. Спосіб корекції кровотворення.
- Паузина О. А., Аполихина И. А., Малышкина Д. А. Возможности применения неодимового лазера (Nd: YAG) у пациенток с сопутствующими заболеваниями, сопровождающимися патологическими выделениями из половых путей. *Гинекология*. 2020. Т. 22, № 4. С. 75-81. DOI:10.26442/20795696.2020.4.200277.
- Пешук Л. В., Бавіка Л. І., Демідов І. М. Технологія парфумерно-косметично продуктів. К.: Центр учбової літератури, 2007. 376 с.

- Poling L., 1974. General chemistry, Moscow: Mir. (In Russian).
- Rukk N. S., Apryshko G. N., Skryabina A. V., 2014. The prospect of creating antitumor drugs based on coordination compounds of elements of the REE group. *Russia therapeutic magazine*. Vol. 13, No 2. Pp. 14–19. (In Russian).
- Certificate of PI-NNF C-77–52865. *Medicine, target projects*. No 21. 2015. (In Russian).
- Trush V. A., 2002. Synthesis, properties and structure of coordination compounds based on dimethyl-N-trichloroacetylamidophosphate. PhD Thesis. KSU named after Taras Shevchenko. Kyiv. (In Ukraine).
- Fedyushkin I. L., 2001. Synthesis, structure and properties of complexes of divalent lanthanides with carbo- and heterocyclic aromatic ligands. Dissertation for the scientific degree of doctor of sciences. NGPU named after Minina. (In Russian).
- Shestopalov V. M., Moiseeva N. P., Lesyuk G. V., Kondratyuk E. I., 2022. Mineral waters with rare earth elements. *Proceedings of the XX International Scientific and Practical Conference “Natural Water Resources of the Carpathian Region”*. Lviv. Pp. 133–138. (In Ukraine).
- Shestopalov V. M., Moiseyev A. Yu., Druzhina M. O., 2015. Prospects for the use of therapeutic mineral waters in oncology. *Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine*. No 9. Pp. 56–63. (In Ukraine).
- Shestopalov V. M., Moiseeva N. P., Ischenko A. P., Kondratyuk E. I., Usov V. Yu., Moiseev A. Yu., Gudzenko V. V., Luty H. G., Sinitsyn N. I., Suleymanov S. P., Yasevych A. P., Druzhina N. A., Kovalskaya V. V., Gela A. A., Rodionova N. K., Kirilyuk N. D., Rudko G. I., Mytko A. P., Netsky A. V., Bakarzhieva O. O., 2013. Therapeutic mineral waters of the “Naftusia” type of the Ukrainian Carpathians and Podolia. Chernivtsi: Bukrek. (In Russian).
- Shestopalov V. M., Moiseeva N. P., Serkiz Ya. I., Pukhova G. G., Gela A. O., Druzhina M. O. USSR Author’s Certificate dated 07/24/1989. (In Ukraine).
- Yambulatov D. S., 2017. Complexes of 2-valent europium with redox-active ligands. PhD Thesis. IONH RAS. (In Russian).
- Yatsimirskiy K. B., Gvyzdovskaya V. L., 1979. Stability constants of metal complexes with bioligands. Kyiv: Naukova dumka. (In Russian).
- Ahmad J., Wahab R., Siddiqui M. A., Farshori N. N., Saquib Q., Ahmad N., Al-Khedhairi A. A., 2022. Neodymium oxide nanostructures and their cytotoxic evaluation in human cancer cells. *J Trace Elem Med Biol*. Vol. 73. 127029. doi: 10.1016/j.jtemb.2022.127029.0.
- Aime S., Castelli D. D., Crich S. G., Gianolio E., Terreno E., 2009. Pushing the sensitivity envelope of lanthanide-based magnetic resonance imaging (MRI) contrast agents for molecular imaging applications. *Acc Chem Res*. Vol. 42. No 7. Pp. 822–831. doi:10.1021/ar800192p.
- Antonenco T. A., Shpakovsky D. B., Gracheva Yu. A., Balashova T. V., Pushkarev A. P., Bochkarev M. N., Milaeva E. R., 2012. Lantanoide benzoates with 2,6-di-tert-butylphnol motets syntehesis luminescent and antioxidant properties. *J. Inorganica Chimica Acta*. Vol. 455. No 1. Pp. 276–282. <https://doi.org/10.1016/j.ica.2016.10.025>
- Полинг Л. Общая химия. Москва: Мир, 1974. 850 с.
- Рукк Н. С., Апрышко Г. Н., Скрябина А. В. Перспективность создания противоопухолевых лекарств на основе координационных соединений элементов РЗЭ-группы. *Рос. терапевтический журн*. 2014. Т. 13, № 2. С. 14–19.
- Свидетельство ПИ-NNF C-77–52865. *Медицина, целевые проекты*. 2015. № 21.
- Труш В. А. Синтез, властивості та будова координаційних сполук на основі диметил-N-трихлорацетиламідфосфату. Дисертація на здобуття наукового наукового к.х.н. КДУ ім. Тараса Шевченка. Київ. 2002. 222 с.
- Федюшкин И. Л. Синтез, строение и свойства комплексов 2-х валентных лантанидов с карбо- и гетероциклическими ароматическими лигандами. Диссертация на соискание научной степени д.х.н. НГПУ им. Минина. 2001. 500 с.
- Шестопалов В. М., Моісеєва Н. П., Лесюк Г. В., Кондратюк Є. І. Мінеральні води з рідкісноземельними елементами. Докл. XX Міжнародна науково-практична конференція «Ресурси природних вод Карпатського регіону». Львів, 2022. С. 133–138.
- Шестопалов В. М., Моісеєв А. Ю., Дружина М. О. Перспективи використання лікувальних мінеральних вод в онкології. *Вісник НАН України*. 2015. № 9. С. 56–63.
- Шестопалов В. М., Моісеєва Н. П., Ищенко А. П., Кондратюк Е. И., Усов В. Ю., Моісеєв А. Ю., Гудзенко В. В., Лютий Г. Г., Синицин Н. И., Сулейманов С. П., Ясевич А. П., Дружина Н. А., Ковальская В. В., Гела А. А., Родионова Н. К., Кирилюк Н. Д., Рудько Г. И., Митько А. П., Нецкий А. В., Бакаржиева О. О. Лечебные минеральные воды типа «Нафтуса» Украинских Карпат и Подолья. Черновцы: Букрек, 2013. 600 с.
- Шестопалов В. М., Моісеєва Н. П., Серкіз Я. І., Пухова Г. Г., Гела А. О., Дружина М. О. Авторське свідоцтво СРСР від 24.07.1989 р.
- Ямбулатов Д. С. Комплексы 2-х валентного европия с редокс-активными лигандами. Диссертация на соискание научной степени к.х.н. ИОНХ РАН. 2017. 168 с.
- Яцимирский К. Б., Гвяздовская В. Л. Константы устойчивости комплексов металлов с биолигандами. Киев: Наук. думка, 1979. 225 с.
- Ahmad J., Wahab R., Siddiqui M. A., Farshori N. N., Saquib Q., Ahmad N., Al-Khedhairi A. A. Neodymium oxide nanostructures and their cytotoxic evaluation in human cancer cells. *J Trace Elem Med Biol*. 2022. Vol. 73. 127029. doi:10.1016/j.jtemb.2022.127029.0.
- Aime S., Castelli D. D., Crich S. G., Gianolio E., Terreno E. Pushing the sensitivity envelope of lanthanide-based magnetic resonance imaging (MRI) contrast agents for molecular imaging applications. *Acc Chem Res*. 2009. Vol. 42. No 7. P. 822–831. doi:10.1021/ar800192p.
- Antonenco T. A., Shpakovsky D. B., Gracheva Yu. A., Balashova T. V., Pushkarev A. P., Bochkarev M. N., Milaeva E. R. Lantanoide benzoates with 2,6-di-tert-butylphnol motets syntehesis luminescent and antioxidant properties. *J. Inorganica Chimica Acta*. 2012. Vol. 455. No 1. P. 276–282. <https://doi.org/10.1016/j.ica.2016.10.025>

Aragón-Muriel A., Liscano-Martínez Y., Rufino-Felipe E., Morales-Morales D., Oñate-Garzón J., Polo-Cerón D., 2020. Synthesis, biological evaluation and model membrane studies on metal complexes containing aromatic N, O-chelate ligands. *Heliyon*. Vol. 6. No 6: e04126. doi:10.1016/j.heliyon.2020.e04126.

Ascenzi P., Bettinelli M., Boffi A., De Simone G., Luchinat C., Marengo E., Mei H., Aime S. Rare earth elements (REE) in biology and medicine. *Rend. Fis. Acc. Lincei*. No 1. Pp. 821–833 (2020) <https://doi.org/10.1007/s12210-020-00930-w>

Azab H. A., Hussein B. H., El-Azab M. F., Gomaa M., El-Falouji A. I., 2013. Bis(acridine-9-carboxylate)-nitro-europium(III) dihydrate complex a new apoptotic agent through Flk-1 down regulation, caspase-3 activation and oligonucleosomes DNA fragmentation. *Bioorg Med Chem*. Vol. 21. No 1. Pp. 223–34. doi:10.1016/j.bmc.2012.10.020.

Balaram V., 2019. Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact. *Geoscience Frontiers*. Vol. 10. No 4. Pp. 1285–1303. doi:10.1016/j.gsf.2018.12.005.

Ban S., Suzuki S., Kubota K., Ohshima S., Satoh H., Imada H., Ueda Y., 2017. Gastric mucosal status susceptible to lanthanum deposition in patients treated with dialysis and lanthanum carbonate. *Ann. Diagn. Pathol.* Vol. 26. Pp. 6–9. doi:10.1016/j.anndiagpath.2016.10.001.

Barker E., Shepherd J., Asencio I. O., 2022. The Use of Cerium Compounds as Antimicrobials for Biomedical Applications. *Molecules*. Vol. 27. No 9. 2678. doi:10.3390/molecules27092678.

Bellot G. L., Liu D., Fivaz M., Yadav S. K., Kaur C., Pervaiz S., 2024. Lanthanide conjugate Pr-MPO elicits anti-cancer activity by targeting lysosomal machinery and inducing zinc-dependent cataplerosis. *Cell Commun Signal*. Vol. 22. No 1. 509. doi:10.1186/s12964-024-01883-5.

Benzli G. C., Pecharsky V., 2017. Handbook on the physics and chemistry of Rare Earts. Vol. 52. I-st Edition including Actinides. Norts-Holland.

Contreras-Martínez G., Gómez-Merino F. C., Peralta-Sánchez M. G., Alcántar-González G., TrejoTéllez L. I., 2022. Biostimulant effects of lanthanum (La) on crop growth, yield, and quality. *Agro Productividad*. Vol. 15. No 8. Pp. 107–113. <https://doi.org/10.32854/agrop.v15i8.2241>.

da Silva F., Rizk Y. S., das Neves A. R., Lourenço E. M. G., Ferreira A. M. T., Monteiro M. M., de Lima D. P., Perdomo R. T., Bonfá I. S., Toffoli-Kadri M. C., Duarte A. P., Nunes D. M., Martines M. A. U., Piranda E. M., de Arruda C. C. P., 2023. Antileishmanial Activity, Toxicity and Mechanism of Action of Complexes of Sodium Usnate with Lanthanide Ions: Eu(III), Sm(III), Gd(III), Nd(III), La(III) and Tb(III). *Int J Mol Sci*. Vol.25. No 1. P. 413. doi:10.3390/ijms25010413.

de Oliveira C., Ramos S. J., Siqueira J. O., Faquin V., de Castro E. M., Amaral D. C., Techio V. H., Coelho L. C., e Silva P. H., Schnug E., Guilherme L. R., 2015. Bioaccumulation and effects of lanthanum on growth and mitotic index in soybean plants. *Ecotoxicol Environ Saf*. Vol. 122. Pp. 136–144. doi:10.1016/j.ecoenv.2015.07.020.

Dong J., Wan T., Li K., Kong X., Shen Q., Wu H., 2022. Mononuclear Dy(III)/heteropolynuclear Zn(II)–Dy(III) Schiff base complexes: Synthesis, structures, fluorescence and antioxidant

Aragón-Muriel A., Liscano-Martínez Y., Rufino-Felipe E., Morales-Morales D., Oñate-Garzón J., Polo-Cerón D. Synthesis, biological evaluation and model membrane studies on metal complexes containing aromatic N, O-chelate ligands. *Heliyon*. 2020. Vol. 6. No 6. e04126. doi:10.1016/j.heliyon.2020.e04126.

Ascenzi P., Bettinelli M., Boffi A., De Simone G., Luchinat C., Marengo E., Mei H., Aime S. Rare earth elements (REE) in biology and medicine. *Rend. Fis. Acc. Lincei*. 2020. No 1. P. 821–833 <https://doi.org/10.1007/s12210-020-00930-w>

Azab H. A., Hussein B. H., El-Azab M. F., Gomaa M., El-Falouji A. I. Bis(acridine-9-carboxylate)-nitro-europium(III) dihydrate complex a new apoptotic agent through Flk-1 down regulation, caspase-3 activation and oligonucleosomes DNA fragmentation. *Bioorg Med Chem*. 2013. Vol. 21. No 1. P. 223–234. doi:10.1016/j.bmc.2012.10.020.

Balaram V. Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact. *Geoscience Frontiers*. 2019. Vol. 10. No 4. P. 1285–1303. doi:10.1016/j.gsf.2018.12.005.

Ban S., Suzuki S., Kubota K., Ohshima S., Satoh H., Imada H., Ueda Y. Gastric mucosal status susceptible to lanthanum deposition in patients treated with dialysis and lanthanum carbonate. *Ann. Diagn. Pathol.* 2017. Vol. 26. P. 6–9. doi:10.1016/j.anndiagpath.2016.10.001.

Barker E., Shepherd J., Asencio I. O. The Use of Cerium Compounds as Antimicrobials for Biomedical Applications. *Molecules*. 2022. Vol. 27. No 9. 2678. doi:10.3390/molecules27092678.

Bellot G. L., Liu D., Fivaz M., Yadav S. K., Kaur C., Pervaiz S. Lanthanide conjugate Pr-MPO elicits anti-cancer activity by targeting lysosomal machinery and inducing zinc-dependent cataplerosis. *Cell Commun Signal*. 2024. Vol. 22. No 1. 509. doi:10.1186/s12964-024-01883-5.

Benzli G. C., Pecharsky V. 2017. Handbook on the physics and chemistry of Rare Earts, Vol. 52. I-st Edition including Actinides. Norts-Holland. 375 p.

Contreras-Martínez G., Gómez-Merino F. C., Peralta-Sánchez M. G., Alcántar-González G., TrejoTéllez L. I. Biostimulant effects of lanthanum (La) on crop growth, yield, and quality. *Agro Productividad*. 2022. Vol. 15. No 8. P. 107–113. <https://doi.org/10.32854/agrop.v15i8.2241>.

da Silva F., Rizk Y. S., das Neves A. R., Lourenço E. M. G., Ferreira A. M. T., Monteiro M. M., de Lima D. P., Perdomo R. T., Bonfá I. S., Toffoli-Kadri M. C., Duarte A. P., Nunes D. M., Martines M. A. U., Piranda E. M., de Arruda C. C. P. Antileishmanial Activity, Toxicity and Mechanism of Action of Complexes of Sodium Usnate with Lanthanide Ions: Eu(III), Sm(III), Gd(III), Nd(III), La(III) and Tb(III). *Int J Mol Sci*. 2023. Vol.25. No 1. P. 413. doi:10.3390/ijms25010413.

de Oliveira C., Ramos S. J., Siqueira J. O., Faquin V., de Castro E. M., Amaral D. C., Techio V. H., Coelho L. C., e Silva P. H., Schnug E., Guilherme L. R. Bioaccumulation and effects of lanthanum on growth and mitotic index in soybean plants. *Ecotoxicol Environ Saf*. 2015. Vol. 122. P. 136–44. doi:10.1016/j.ecoenv.2015.07.020.

Dong J., Wan T., Li K., Kong X., Shen Q., Wu H. Mononuclear Dy(III)/heteropolynuclear Zn(II)–Dy(III) Schiff base complexes: Synthesis, structures, fluorescence and antioxidant properties.

properties. *J. Mol. Struct.* Vol. 1264. 133340. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2022.133340>

Fang H., Chen C., 2024. Therapeutic effectiveness and safety profile of lanthanum carbonate in conjunction with calcium carbonate for managing hyperphosphatemia in hemodialysis patients: a meta-analysis of randomized controlled trials. *Am J Transl Res.* Vol. 16. No 11. Pp. 6980–6990. doi:10.62347/WXBL2590.

Fricker S. P., 2006. The therapeutic application of lanthanides. *Chem. Soc. Rev.* Vol. 35. Pp. 524–33. doi:10.1039/b509608c

Furie B. C., Mann K. G., Furie B., 1976. Substitution of lanthanide ions for calcium ions in the activation of bovine prothrombin by activated factor X. High affinity metal-binding sites of prothrombin and the derivatives of prothrombin activation. *J. Biol. Chem.* Vol. 251. Pp. 3235–3241. [https://doi.org/10.1016/S0021-9258\(17\)33428-2](https://doi.org/10.1016/S0021-9258(17)33428-2).

Golroudbary S. R., Makarava I., Kraslawski A., Repo E., 2022. Global Environmental Cost of Using Rare Earth Elements in Green Energy Technologies. *Sci. Total Environ.* Vol. 832. 155022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155022>.

Jorge J., Del Pino Santos K. F., Timóteo F., Vasconcelos R. R. P., Ayala Cáceres O. I., Granja I. J. A., de Souza D. M., Frizon T. E. A., Di Vaccari Botteselle G., Braga A. L., Saba S., Rashid H. U., Rafique J., 2024. Recent Advances on the Antimicrobial Activities of Schiff Bases and their Metal Complexes: An Updated Overview. *Curr Med Chem.* Vol. 3. No 17. Pp. 2330–2344. doi:10.2174/0929867330666230224092830.

Joy M. S., Kshirsagar A., Candiani C., Brooks T., Hudson J. Q., 2006. Lanthanum carbonate. *Ann Pharmacother.* Vol. 40. No 2. Pp. 234–40. doi:10.1345/aph.1G224.

Kaczmarek M. T., Zabiszak M., Nowak M., Jastrzab R., 2018. Lanthanides: schiff base complexes, applications in cancer diagnosis, therapy, and antibacterial activity. *Coordinat Chem Rev.* Vol. 370. Pp. 42–5. doi:10.1016/j.ccr.2018.05.012.

Ketteler M., Wüthrich R. P., Floege J., 2013. Management of hyperphosphataemia in chronic kidney disease-challenges and solutions. *Clin Kidney J.* Vol. 6. No 2. Pp. 128–36. doi:10.1093/cjk/sfs173.

Li Y., Biswas R., Kopcha W. P., Dubroca T., Abella L., Sun Y., Crichton R. A., Rathnam C., Yang L., Yeh Y. W., Kundu K., Rodríguez-Forte A., Poblet J. M., Lee K. B., Hill S., Zhang J., 2023. Structurally Defined Water-Soluble Metallofullerene Derivatives towards Biomedical Applications. *Angew Chem Int Ed Engl.* Vol. 62. No 3. e202211704. doi:10.1002/anie.202211704.

Lloret M. J., Ruiz-García C., Dasilva I., Furlano M., Barreiro Y., Ballarín J., Bover J., 2013. Lanthanum carbonate for the control of hyperphosphatemia in chronic renal failure patients: a new oral powder formulation – safety, efficacy, and patient adherence. *Patient Prefer Adherence.* Vol. 7. Pp. 1147–56. doi:10.2147/PPA.S31694.

Longo J., Lutz S., Johnstone C., 2013. Samarium-153-ethylene diamine tetramethylene phosphonate, a beta-emitting bone-targeted radiopharmaceutical, useful for patients with osteoblastic bone metastases. *Cancer Manag Res.* Vol. 5. Pp. 235–242. doi:10.2147/CMAR.S35789.

*J. Mol. Struct.*, 2022. Vol. 1264. 133340. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2022.133340>

Fang H., Chen C. Therapeutic effectiveness and safety profile of lanthanum carbonate in conjunction with calcium carbonate for managing hyperphosphatemia in hemodialysis patients: a meta-analysis of randomized controlled trials. *Am J Transl Res.* 2024. Vol. 16. No 11. P. 6980–6990. doi:10.62347/WXBL2590.

Fricker S. P. The therapeutic application of lanthanides. *Chem. Soc. Rev.* 2006. Vol. 35. P. 524–33. doi:10.1039/b509608c

Furie B. C., Mann K. G., Furie B. Substitution of lanthanide ions for calcium ions in the activation of bovine prothrombin by activated factor X. High affinity metal-binding sites of prothrombin and the derivatives of prothrombin activation. *J. Biol. Chem.* 1976. Vol. 251. P. 3235–3241. [https://doi.org/10.1016/S0021-9258\(17\)33428-2](https://doi.org/10.1016/S0021-9258(17)33428-2).

Golroudbary S. R., Makarava I., Kraslawski A., Repo E. Global Environmental Cost of Using Rare Earth Elements in Green Energy Technologies. *Sci. Total Environ.* 2022. Vol. 832. 155022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155022>.

Jorge J., Del Pino Santos K. F., Timóteo F., Vasconcelos R. R. P., Ayala Cáceres O. I., Granja I. J. A., de Souza D. M., Frizon T. E. A., Di Vaccari Botteselle G., Braga A. L., Saba S., Rashid H. U., Rafique J. Recent Advances on the Antimicrobial Activities of Schiff Bases and their Metal Complexes: An Updated Overview. *Curr Med Chem.* 2024. Vol. 3. No 17. P. 2330–2344. doi:10.2174/0929867330666230224092830.

Joy M. S., Kshirsagar A., Candiani C., Brooks T., Hudson J. Q. Lanthanum carbonate. *Ann Pharmacother.* 2006. Vol. 40. No 2. P. 234–40. doi:10.1345/aph.1G224.

Kaczmarek M. T., Zabiszak M., Nowak M., Jastrzab R. Lanthanides: schiff base complexes, applications in cancer diagnosis, therapy, and antibacterial activity. *Coordinat Chem Rev.* 2018. Vol. 370. P. 42–5. doi:10.1016/j.ccr.2018.05.012.

Ketteler M., Wüthrich R. P., Floege J. Management of hyperphosphataemia in chronic kidney disease-challenges and solutions. *Clin Kidney J.* 2013. Vol. 6. No 2. P. 128–36. doi:10.1093/cjk/sfs173.

Li Y., Biswas R., Kopcha W. P., Dubroca T., Abella L., Sun Y., Crichton R. A., Rathnam C., Yang L., Yeh Y. W., Kundu K., Rodríguez-Forte A., Poblet J. M., Lee K. B., Hill S., Zhang J. Structurally Defined Water-Soluble Metallofullerene Derivatives towards Biomedical Applications. *Angew Chem Int Ed Engl.* 2023. Vol. 62. No 3. e202211704. doi:10.1002/anie.202211704.

Lloret M. J., Ruiz-García C., Dasilva I., Furlano M., Barreiro Y., Ballarín J., Bover J. Lanthanum carbonate for the control of hyperphosphatemia in chronic renal failure patients: a new oral powder formulation – safety, efficacy, and patient adherence. *Patient Prefer Adherence.* 2013. Vol. 7. P. 1147–56. doi:10.2147/PPA.S31694.

Longo J., Lutz S., Johnstone C. Samarium-153-ethylene diamine tetramethylene phosphonate, a beta-emitting bone-targeted radiopharmaceutical, useful for patients with osteoblastic bone metastases. *Cancer Manag Res.* 2013. Vol. 5. P. 235–242. doi:10.2147/CMAR.S35789.

Martin K. E., Mattocks J. A., Śmiłowicz D., Aluicio-Sarduy E., Whetter J. N., Engle J. W., Cotruvo J. A. Jr, Boros E., 2023. Radiolabeling and in vivo evaluation of lanmodulin with biomedically relevant lanthanide isotopes. *RSC Chem Biol*. Vol. 4. No 6. Pp. 414–421. doi:10.1039/d3cb00020f.

Nowakowska J., Radomska D., Czarnomysy R., Marciniak K., 2024. Recent Development of Fluoroquinolone Derivatives as Anticancer Agents. *Molecules*. Vol. 29. No 15. 3538. doi:10.3390/molecules29153538.

Owolabi J., Kizito E., 2024. The Rare Earth Elements: An in-Depth Exploration of Industrial Utilization, Recycling Potential and Environmental Ramifications. *Engineering And Technology Journal*. Vol. 9. No 01. Pp. 3298–3303. https://doi.org/10.47191/etj/v9i01.07.

Porowsky A., Kaczar-Kuzava D., 2016. Pierwiactki ziem zadkich (REE) w wodach terminalnih – wystepowanie, pochodzenie, znaczenie I perspektywy badan w Polsce. *Technica Poschzykivan Geologichnych*. R.55. –Nr1. – S. 89–102.

Patyal M., Kaur K., Bala N., Gupta N., Malik A. K., 2023. Innovative lanthanide complexes: Shaping the future of cancer/ tumor chemotherapy. *J Trace Elem Med Biol*. Vol. 80. Pp. 127277. doi:10.1016/j.jtemb.2023.127277.

Rajeshkumar S., Naik P., 2018. Synthesis and biomedical applications of Cerium oxide nanoparticles – A Review. *Biotechnol. Rep*. Vol. 17. Pp. 1–5. https://doi.org/10.1016/j.btre.2017.11.008.

Rim K. T., 2016. Effects of rare earth elements on the environment and human health: A literature review. *Toxicol. Environ. Health Sci*. Vol. 8. Pp. 189–200. https://doi.org/10.1007/s13530-016-0276-y.

Safinejad M., Rigi A., Zeraati M., Heidary Z., Jahani S., Chauhan N. P. S., Sargazi G., 2022. Lanthanum-based metal organic framework (La-MOF) use of 3,4-dihydroxycinnamic acid as drug delivery system linkers in human breast cancer therapy. *BMC Chem*. Vol. 16. No 1. 93. doi:10.1186/s13065-022-00886-y.

Sartor O., Reid R. H., Bushnell D. L., Quick D. P., Ell P. J., 2007. Safety and efficacy of repeat administration of samarium Sm-153 lexidronam to patients with metastatic bone pain. *Cancer*. Vol. 109. No 3. Pp. 637–643. doi:10.1002/cncr.22431.

Schijf J., Byrne R. 2021. Speciation of yttrium and the rare earth elements in seawater: Review of a 20-year analytical journey. *Chemical Geology*. Vol. 584. 120479. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2021.120479.

Sinicropi M. S., Ceramella J., Iacopetta D., Catalano A., Mariconda A., Rosano C., Saturnino C., El-Kashef H., Longo P., 2022. Metal Complexes with Schiff Bases: Data Collection and Recent Studies on Biological Activities. *Int J Mol Sci*. Vol. 23. No 23. 14840. doi:10.3390/ijms232314840.

Su P., Song F., Cao J., Yan C. H., Tang Y., 2025. Rare Earth Complex-Based Functional Materials: From Molecular Design and Performance Regulation to Unique Applications. *Acc Chem Res*. Vol. 58. No 2. Pp. 218–230. doi:10.1021/acs.accounts.4c00649.

Sung B., Kim H.-K., Baek A.-R., Yang B.-W., Kim Y.-H., Choi G., Park H.-J., Kim M., Lee J., Chang Y., 2023. Nonsteroidal Anti-Inflammatory Drug Conjugated with Gadolinium (III) Complex

Martin K. E., Mattocks J. A., Śmiłowicz D., Aluicio-Sarduy E., Whetter J. N., Engle J. W., Cotruvo J. A. Jr, Boros E. Radiolabeling and in vivo evaluation of lanmodulin with biomedically relevant lanthanide isotopes. *RSC Chem Biol*. 2023. Vol. 4. No 6. P. 414–421. doi:10.1039/d3cb00020f.

Nowakowska J., Radomska D., Czarnomysy R., Marciniak K. Recent Development of Fluoroquinolone Derivatives as Anticancer Agents. *Molecules*. 2024. Vol. 29. No 15. 3538. doi:10.3390/molecules29153538.

Owolabi J., Kizito E. The Rare Earth Elements: An in-Depth Exploration of Industrial Utilization, Recycling Potential and Environmental Ramifications. *Engineering And Technology Journal*. 2024. Vol. 9. No 01. P. 3298–3303. https://doi.org/10.47191/etj/v9i01.07.

Porowsky A., Kaczar-Kuzava D. Pierwiactki ziem zadkich (REE) w wodach terminalnih – wystepowanie, pochodzenie, znaczenie I perspektywy badan w Polsce. *Technica Poschzykivan Geologichnych*. 2016. R.55. Nr 1. S. 89–102.

Patyal M., Kaur K., Bala N., Gupta N., Malik A. K. Innovative lanthanide complexes: Shaping the future of cancer/ tumor chemotherapy. *J Trace Elem Med Biol*. 2023. Vol. 80. P. 127277. doi:10.1016/j.jtemb.2023.127277.

Rajeshkumar S., Naik P. Synthesis and biomedical applications of Cerium oxide nanoparticles – A Review. *Biotechnol. Rep*. 2018. Vol. 17. P. 1–5. https://doi.org/10.1016/j.btre.2017.11.008.

Rim K. T. Effects of rare earth elements on the environment and human health: A literature review. *Toxicol. Environ. Health Sci*. 2016. Vol. 8. P. 189–200. https://doi.org/10.1007/s13530-016-0276-y.

Safinejad M., Rigi A., Zeraati M., Heidary Z., Jahani S., Chauhan N. P. S., Sargazi G. Lanthanum-based metal organic framework (La-MOF) use of 3,4-dihydroxycinnamic acid as drug delivery system linkers in human breast cancer therapy. *BMC Chem*. 2022. Vol. 16. No 1. 93. doi:10.1186/s13065-022-00886-y.

Sartor O., Reid R. H., Bushnell D. L., Quick D. P., Ell P. J. Safety and efficacy of repeat administration of samarium Sm-153 lexidronam to patients with metastatic bone pain. *Cancer*. 2007. Vol. 109. No 3. P. 637–643. doi:10.1002/cncr.22431.

Schijf J., Byrne R. Speciation of yttrium and the rare earth elements in seawater: Review of a 20-year analytical journey. *Chemical Geology*. 2021. Vol. 584. 120479. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2021.120479.

Sinicropi M. S., Ceramella J., Iacopetta D., Catalano A., Mariconda A., Rosano C., Saturnino C., El-Kashef H., Longo P. Metal Complexes with Schiff Bases: Data Collection and Recent Studies on Biological Activities. *Int J Mol Sci*. 2022. Vol. 23. No 23. 14840. doi:10.3390/ijms232314840.

Su P., Song F., Cao J., Yan C. H., Tang Y. Rare Earth Complex-Based Functional Materials: From Molecular Design and Performance Regulation to Unique Applications. *Acc Chem Res*. 2025. Vol. 58. No 2. P. 218–230. doi:10.1021/acs.accounts.4c00649.

Sung B., Kim H.-K., Baek A.-R., Yang B.-W., Kim Y.-H., Choi G., Park H.-J., Kim M., Lee J., Chang Y. Nonsteroidal Anti-Inflammatory Drug Conjugated with Gadolinium (III) Complex

as an Anti-Inflammatory MRI Agent. *International Journal of Molecular Sciences*. Vol. 24. No 7. Pp. 6870. <https://doi.org/10.3390/ijms24076870>.

Teo R. D., Termini J., Gray H. B., 2016. Lanthanides: Applications in Cancer Diagnosis and Therapy. *J Med Chem*. Vol. 59. No 13. 6012–24. doi:10.1021/acs.jmedchem.5b01975.

Tyula Y. A., Goudarziafshar H., Yousefi S., Dušek M., Eigner V., 2023. Template synthesis, characterization and antibacterial activity of d10 (Zn<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup>, Hg<sup>2+</sup>) Schiff base complexes: A novel supramolecular Cd<sup>2+</sup> complex with two 1D helical chains, and its Hirshfeld surface analysis. *J. Mol. Struct.* Vol. 1272. Pp. 134051. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2022.134051>.

Vesković J., Lučić M., Ristić M., Perić-Grujić A., Onjia A., 2024. Spatial Variability of Rare Earth Elements in Groundwater in the Vicinity of a Coal-Fired Power Plant and Associated Health Risk. *Toxics*. Vol. 12. No 1. 62. <https://doi.org/10.3390/toxics12010062>.

Wang J., Li S., 2022. Applications of rare earth elements in cancer: Evidence mapping and scientometric analysis. *Front Med (Lausanne)*. Vol. 9. 946100. doi:10.3389/fmed.2022.946100.

Wang J., Wang H., Zou F., Gu J., Deng S., Cao Y., Cai K., 2025. The Role of Inorganic Nanomaterials in Overcoming Challenges in Colorectal Cancer Diagnosis and Therapy. *Pharmaceutics*. Vol. 17. No 4. 409. doi:10.3390/pharmaceutics17040409.

Wysocka I. A., Porowsky A., Rogowska A. M., Kaczor-Kurzawa D., 2018. Pierwiastki ziem rzadkich (REE) w wodach powierzchniowych i podziemnych Polski na tle innych krajów Europy. *Przegląd Geologiczny*. Vol. 66. Pp. 692–705. <http://dx.doi.org/10.7306/2018.12>.

Yaguchi A., Akahane K., Tsuchioka K., Yonekubo S., Yamamoto S., Tamai Y., Tatemichi S., Takeda H., 2019. A comparison between the combined effect of calcium carbonate with sucroferric oxyhydroxide and other phosphate binders: an in vitro and in vivo experimental study. *BMC Nephrol*. Vol. 20. No 1. 465. doi:10.1186/s12882-019-1655-9.

Yuksel C., Ankarali S., Yuksel N. A., 2018. The use of neodymium magnets in healthcare and their effects on health. *North Clin Istanbul*. Vol. 5. No 3. Pp. 268–273. doi:10.14744/nci.2017.00483.

Zhang C., Wang S., Zhao S., Zhang X., 2017. Effect of lanthanum carbonate on coronary artery calcification and bone mineral density in maintenance hemodialysis patients with diabetes complicated with a dynamic bone disease. *Medicine*. Vol. 96. Pp. 45–52. doi:10.1097/MD.0000000000008664.

as an Anti-Inflammatory MRI Agent. *International Journal of Molecular Sciences*. 2023. Vol. 24. No 7. 6870. <https://doi.org/10.3390/ijms24076870>.

Teo R. D., Termini J., Gray H. B. Lanthanides: Applications in Cancer Diagnosis and Therapy. *J Med Chem*. 2016. Vol. 59. No 13. 6012–24. doi:10.1021/acs.jmedchem.5b01975.

Tyula Y. A., Goudarziafshar H., Yousefi S., Dušek M., Eigner V. Template synthesis, characterization and antibacterial activity of d10 (Zn<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup>, Hg<sup>2+</sup>) Schiff base complexes: A novel supramolecular Cd<sup>2+</sup> complex with two 1D helical chains, and its Hirshfeld surface analysis. *J. Mol. Struct.* 2023. Vol. 1272. P. 134051. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2022.134051>.

Vesković J., Lučić M., Ristić M., Perić-Grujić A., Onjia A. Spatial Variability of Rare Earth Elements in Groundwater in the Vicinity of a Coal-Fired Power Plant and Associated Health Risk. *Toxics*. 2024. Vol. 12. No 1. 62. <https://doi.org/10.3390/toxics12010062>.

Wang J., Li S. Applications of rare earth elements in cancer: Evidence mapping and scientometric analysis. *Front Med (Lausanne)*. 2022. Vol. 9. 946100. doi:10.3389/fmed.2022.946100.

Wang J., Wang H., Zou F., Gu J., Deng S., Cao Y., Cai K. The Role of Inorganic Nanomaterials in Overcoming Challenges in Colorectal Cancer Diagnosis and Therapy. *Pharmaceutics*. 2025. Vol. 17. No 4. 409. doi:10.3390/pharmaceutics17040409.

Wysocka I. A., Porowsky A., Rogowska A. M., Kaczor-Kurzawa D. Pierwiastki ziem rzadkich (REE) w wodach powierzchniowych i podziemnych Polski na tle innych krajów Europy. *Przegląd Geologiczny*. 2018. Vol. 66. P. 692–705. <http://dx.doi.org/10.7306/2018.12>.

Yaguchi A., Akahane K., Tsuchioka K., Yonekubo S., Yamamoto S., Tamai Y., Tatemichi S., Takeda H. A comparison between the combined effect of calcium carbonate with sucroferric oxyhydroxide and other phosphate binders: an in vitro and in vivo experimental study. *BMC Nephrol*. 2019. Vol. 20. No 1. 465. doi:10.1186/s12882-019-1655-9.

Yuksel C., Ankarali S., Yuksel N. A. The use of neodymium magnets in healthcare and their effects on health. *North Clin Istanbul*. 2018. Vol. 5. No 3. P. 268–273. doi:10.14744/nci.2017.00483.

Zhang C., Wang S., Zhao S., Zhang X. Effect of lanthanum carbonate on coronary artery calcification and bone mineral density in maintenance hemodialysis patients with diabetes complicated with a dynamic bone disease. *Medicine*. 2017. Vol. 96. P. 45–52. doi:10.1097/MD.0000000000008664.

Manuscript received February 20, 2024;  
revision accepted May 28, 2024.

<sup>1</sup> Інститут геологічних наук НАН України,  
Київ, Україна

<sup>2</sup> ТОВ «КВАРЦ»,  
Львів, Україна