

ВИЗНАЧЕННЯ ВМІСТУ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ У СОЛЬОВИХ БАТАРЕЙКАХ ТА АКУМУЛЯТОРАХ¹

Ковров О.С., Зворигін К.О.

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»
пр. Д. Яворницького, 19, 49005, м. Дніпро,
kovralex1@gmail.com, zvoryhin@gmail.com

Сольові батареї та акумулятори є загальноживними елементами живлення, які використовуються в різноманітних побутових приладах. Але внаслідок високого вмісту важких металів, кислот, лугів і специфічних органічних сполук вони є джерелом екологічної небезпеки, у складі внутрішньої частини яких міститься не менше 10 хімічних високотоксичних елементів і розчинні важкі метали – літій, ртуть, свинець, кадмій, нікель, кобальт, цинк, марганець та інших. Разом зі сміттям батареї потрапляють на сміттєзвалища, де з часом їх корпус руйнується, важкі метали вивільнюються, створюючи небезпеку для навколишнього середовища. Мета дослідження полягає в комплексному хімічному аналізі вмісту відпрацьованих сольових та акумуляторних батарейок та орієнтовній оцінці їх екологічного впливу. У статті наведено результати виконаного хімічного аналізу на вміст важких металів у 14 видах довільно обраних відпрацьованих сольових батарейок та акумуляторів методом мас-спектрометрії з індуктивно-зв'язаною плазмою (ІЗП-МС). Встановлено, що вміст макроелементів (цинк, марганець, калій, натрій, кремній) коливається в незначних межах, тому є відносно типовим для усіх досліджених батарейок. Найбільший вміст мікроелементів (церій, сурма, олово, індій, кадмій, срібло, молібден, ітрій, кобальт, хром, ванадій, літій), рідкоземельних і радіоактивних елементів (уран, торій, реній, самарій, празеодим, цезій) виявлено в батарейках Germania, а також Sony New Ultra, Panasonic, Digital, Energy (Енергія), Varta. Також надмірний вміст лантанідів визначено в батарейках Germania та Digital, що в 2–15 разів вище порівняно з іншими батарейками. На підставі результатів ІЗП-МС аналізу встановлено, що саме сольові батареї Germania та Digital є найбільш екологічно небезпечними для довкілля за умови несанкціонованого потрапляння на сміттєзвалища внаслідок вмісту важких металів. *Ключові слова:* сольова батарея, акумулятор, метод мас-спектрометрії з індуктивно зв'язаною плазмою, важкі метали.

Determination of heavy metal contents in salt and rechargeable batteries. Kovrov O., Zvoryhin K.

Salt batteries and rechargeable batteries are common electric devices used in various household appliances. But the high content of heavy metals, acids, alkalis and specific organic compounds is a source of environmental hazard. The inner part contains at least 10 highly toxic chemical elements and soluble heavy metals – lithium, mercury, lead, cadmium, nickel, cobalt, zinc, manganese, etc. Together with the domestic wastes, the batteries get to the landfills, where over time their shells are destroyed and heavy metals are released outside causing environmental hazard. The purpose of the study is to provide a comprehensive chemical analysis of the content of used salt and rechargeable batteries and provide an indicative assessment of their environmental impact. The paper presents the results of the chemical analysis of heavy metals content for 14 types of arbitrarily selected used salt batteries and rechargeable batteries by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) technique. Macro-elements (zinc, manganese, potassium, sodium, silicon) are detected within a small range of variation and therefore relatively typical for all the batteries tested. The highest content of trace elements (cerium, antimony, tin, indium, cadmium, silver, molybdenum, yttrium, cobalt, chromium, vanadium, lithium), rare earths and radioactive elements (uranium, thorium, rhenium, samarium, praseodymium, cesium) are detected in the batteries Germania, Sony New Ultra, Panasonic, Digital, Energy, Varta. Also, the excess lanthanide content is determined in Germania and Digital batteries, which is 2–15 times higher than in other batteries. Based on the result of the ICP-MS analysis, it was established that Germania and Digital salt batteries are the most environmentally hazardous in the case of unauthorized depositing to landfill due to the high content of heavy metals. *Key words:* salt battery, battery, inductively coupled plasma mass spectrometry, heavy metals.

Постановка проблеми. Сучасний ринок пропонує споживачу широкий спектр малих хімічних джерел струму: мангано-цинкові (сольові), мангано-цинкові (лужні), ртутно-цинкові (RTS), літєві, такі, що водоактивуються, срібно-цинкові (срібно-оксидні), повітряно-цинкові; а також акумулятори: нікель-кадмієві (Ni-Cd), нікель-металогідридні (Ni-MH), літій-іонні (Li-Ion), свинцево-кислотні герметичні (SLA) [1].

Батареї – це хімічні пристрої, елементи яких вступають у реакцію, даючи на виході електрику. Корпус елемента живлення зроблений із металу,

який повністю ізолює вміст до того часу, поки оболонка не піддалася корозії. У складі внутрішньої частини є не менше 10 хімічних високотоксичних елементів і розчинні важкі метали – літій, ртуть, свинець, кадмій. У кожній із них є анод – порошок цинку, просочений електролітом і катод – двоокис магнію в суміші з двоокисом титану [2].

Викидаючи відпрацьовану батарею разом з іншими відходами, люди навіть не замислюються, що вбивають довкілля та самих себе. Лише одна пальчикова батарея, викинута у відро для сміття, забруднює важкими металами ґрунт. Це відбувається

¹ Автори висловлюють подяку Німецькій службі академічних обмінів (DAAD, Deutscher Akademischer Austauschdienst) за можливість провести вказані вище дослідження в рамках спільного освітнього проекту “EcoMining: Development of Integrated PhD Program for Sustainable Mining & Environmental Activities” між Технічним університетом Фрайберзька гірничої академії (TU Bergakademie Freiberg) та НТУ «Дніпровська політехніка».

тому, що батарейки містять різні важкі метали (цинк, марганець, кадмій, нікель, ртуть). Дія цих речовин на організм людини залежить від способу потрапляння, дози та тривалості контакту зі сполукою. Але кожен із цих елементів так чи інакше негативно впливає на живі організми, які навіть у невеликих кількостях можуть завдати шкоди здоров'ю людини. Разом зі сміттям батарейки потрапляють на сміттєзвалища, де з часом їх корпус руйнується, а важкі метали вивільнюються, створюючи небезпеку для навколишнього середовища.

Актуальність дослідження. Дані про хімічний вміст батарейок різняться. Тому для точного визначення хімічних складників батарейок необхідно застосовувати лабораторні методи спектрофотометричного аналізу, порівнюючи їх із наявною інформацією від виробника [3].

Батарейки можуть також містити специфічні компоненти, які залежить від технології їх виробництва, зокрема пластик (Ni-Cd, Ag-Zn), диметоксіетан (Li-Mn), діетилкарбонат, етилен карбонат (Li-Ion) тощо. Основні хімічні речовини, які містяться у батарейках, наведені в табл. 1.

Якщо відпрацьовані батарейки з полікомпонентним хімічним складом потрапляють разом зі змішаними побутовими відходами на звалища або полігони, вони чинять екологічну небезпеку. Під впливом зовнішніх факторів їх корпус поступово руйнується, а токсичний вміст надходить у навко-

лишне середовище, забруднюючи ґрунт і підземні води. Тому застосування сучасних методів спектрофотометричного аналізу слугує підґрунтям для прогностичної оцінки екологічної небезпеки від використаних сольових батарейок.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Авторами виконано ґрунтовне дослідження мікроелементного вмісту 16 видів пальчикових батарейок різних виробників, які реалізуються через споживчу мережу супермаркетів і спеціалізованих магазинів України. Виявлені концентрації важких металів у сольових батарейках є важливою інформацією для подальшого екологічного та гідрогеологічного аналізу з метою оцінки міграції мікроелементів у ґрунтах і підземних водах.

Результати дослідження є підставою для проведення екологічної експертизи на державному та регіональному рівнях, а також громадського екологічного контролю за дотриманням вимог чинного законодавства щодо поводження з небезпечними відходами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ґрунти є природними накопичувачами важких металів у навколишньому середовищі і основним джерелом забруднення суміжних середовищ, включаючи вищі рослини. Майже 90% важких металів, які потрапляють у довкілля, акумулюються ґрунтом, а потім «мігрують» у природні води, поглинаються

Таблиця 1

Основні типи батарейок та їх хімічний склад (%) [2–5]

Хімічний склад батарейок	Mn-Zn [4]	C-Zn [4]	Li-Mn [2; 4]	Ag-Zn [4]	Li [5]	Air-Zn [2]	Ni-Cd акумулятор [4]	Li-Ion акумулятор [4]
Fe	23	4	50	42	0,3	4	40	
Zn	16	23		9		16	+	
C	4	10	3	0,5		40		25
KOH	5			1		2	2	
MnO ₂	37	27	30	3		35		
Ni			2	2	26,3		22	
Li			3		2,7			
Cr			2					
Hg			10	0,4		1		
Cd							15	
Ag ₂ O				33				
H ₂ O	9	18		2		2	2	
Co							2	
Mn							1	
Cu				4				10
Al					3,7			20
LiPF ₆								3
LiCoO ₂								40
ZnCl/NH ₄ Cl		5						
Тіонілхлорид					29,2			
Інші	6	13		3,1	37,8		16	2

рослинами та включаються у трофічні ланцюги, кінцевою ланкою яких є організм людини [6].

У роботі [7] виконано аналіз токсичності продуктів згоряння при утилізації літій-іонних батарейок та ідентифіковано понад 100 газоподібних продуктів, які чинять негативний вплив на навколишнє середовище. Проте у дослідженні не пропонуються альтернативні технології утилізації відпрацьованих батарейок.

У роботі [8] наведений статистичний аналіз кампанії збору використаних акумуляторів у мексиканському штаті Тлакскала та показано, що граничні норми вмісту важких металів Hg, Cd і Pb у батарейках та акумуляторах вище у 20, 7,5 і 5 разів порівняно з європейськими стандартами. Але у статті не наведено розширеної інформації стосовно вмісту інших важких металів та інгредієнтів в акумуляторах.

У роботі [9] методом лазерно-індукованої спектроскопії була досліджена можливість застосування швидкого аналізу важких металів у відпрацьованих Zn-Mn акумуляторних батарейках, але цей метод має значні похибки при визначенні вмісту важких металів.

Аналіз вмісту одноразових батарейок розміром AA переважно від китайських виробників показав, що переважна їх більшість не є екологічними через високі концентрації важких металів [10]. В Японії проведено масштабні польові обстеження відпрацьованих акумуляторів і відходів електронного обладнання у Токіо. Встановлено, що 6–10% лужних батарейок містять ртуть. Більше 26% акумуляторних батарейок, які викидають, можуть мати понадлімітний вміст свинцю порівняно із зазначеним у Директиві ЄС 2006/66 / ЄС про акумулятори [11]. Також близько половини від загальної кількості батарейок, які пропонуються виробниками, містять високі концентрації ртуті та кадмію [12].

Ртуть є найбільш небезпечним металом, який міститься в акумуляторах та батарейках, і спричиняє важке захворювання Міномата [13]. Дослідження вмісту відпрацьованих батарейок типів AA, AAA, C, 123 та інших переважно китайського виробництва, зібраних у м. Яунде (Камерун) показало, що трохи більше половини з них містять ртуть [14].

У роботі [15] наведено результати польового експерименту, який був проведений на ділянках, забруднених важкими металами від акумуляторних батарейок. Встановлено, що за умов застосування різних органічних добрив і компостів у тестових рослинах кукурудзи максимально накопичувався Pb і Cd, тоді як концентрація Cr була нижче межі виявлення у врожаї, що залежить від стадії вирощування та кількості внесення добрив. Але авторами роботи не показана кореляція між фіксованими та рухомими формами важких металів у ґрунті за умов використання різних типів добрив.

У роботі [16] наведено оцінку екологічного ризику від забруднення земель сільськогосподар-

ських угідь важкими металами (As, Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb і Zn) та вміст у рослинах пшениці Cd, Pb і Zn поблизу свинцево-кислотного акумуляторного заводу Фенгфан у китайській провінції Баодін. Доведено, що для сільського населення існує потенційний ризик для здоров'я внаслідок комбінованого впливу важких металів. Тому виникають сумніви щодо інтегрованої екологічної оцінки, наведеної в роботі.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Виконаний аналіз останніх досліджень і публікацій свідчить про те, що проблема відпрацьованих батарейок та акумуляторів є досить актуальною через невизначеність можливих впливів на довкілля. Тому брак вірогідної інформації стосовно дійсного вмісту складників сольової батарейки може бути проблемою для оцінки потенційного впливу на довкілля в разі неконтрольованого потрапляння на сміттєзвалища.

Мета дослідження. Враховуючи наведений аналіз сучасних досліджень щодо відпрацьованих акумуляторних батарейок та їх потенційного впливу на складники довкілля, є можливість доповнити наявні здобутки в зазначеному напрямі. Мета дослідження полягає в комплексному хімічному аналізі вмісту відпрацьованих сольових та акумуляторних батарейок та орієнтовній оцінці їх екологічного впливу.

Новизна дослідження полягає у вирішенні таких задач:

1. Виконання хімічного аналізу на вміст важких металів у відпрацьованих сольових батарейках та акумуляторах методом мас-спектрометрії з індуктивно-зв'язаною плазмою (ІЗП-МС).
2. Виявлення видів сольових батарейок, які можуть чинити найбільшу екологічну небезпеку для довкілля за умов несанкціонованого потрапляння на сміттєзвалища.

Методологічне значення. Відповідно до мети дослідження довільно обрано 16 видів відпрацьованих сольових та акумуляторних батарейок для мікроелементного аналізу. Дослідження виконувались у лабораторії Інституту біонаук Технічного університету Фрайберзька гірничої академії (Німеччина).

Метод мас-спектрометрії з індуктивно-зв'язаною плазмою ІЗП-МС (Inductively coupled plasma mass spectrometry ICP-MS) – це різновид мас-спектрометрії, яка відрізняється високою чутливістю і здатністю визначати низку металів і декількох неметалів у концентраціях до 10^{-10} %, тобто одну частинку з 10^{12} . Метод ґрунтується на використанні індуктивно-зв'язаної плазми в якості джерела іонів і мас-спектрометра для їх розподілу і детектування. ІЗП-МС складається з компонентів, наведених на рис. 1.

Система введення зразка складається з перистальтичного насоса, небулайзера і розпилювальної камери.

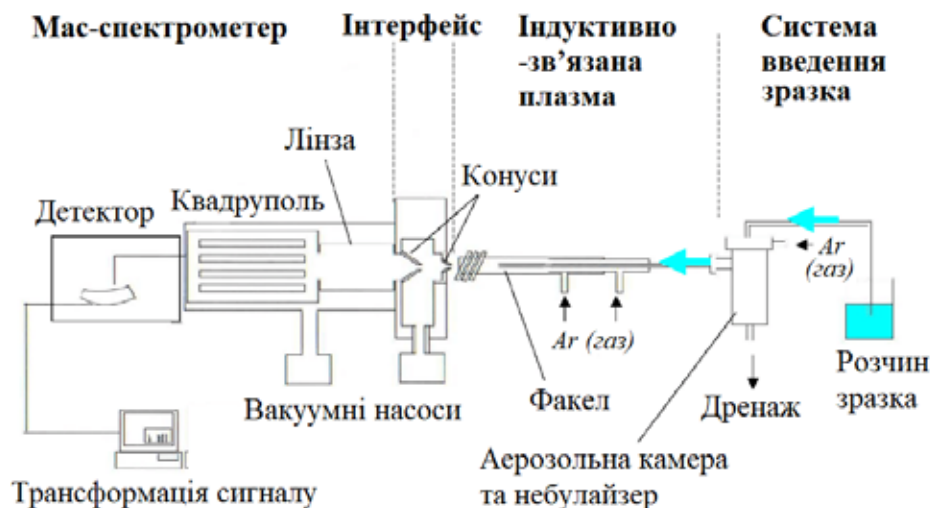


Рис. 1. Схема принципу роботи мас-спектрометра з індуктивно-зв'язаною плазмою ICP-MS [17]

Основне призначення системи введення полягає у переведенні зразка в стан аерозолі. ІЗП факел необхідний для підтримки плазми, яка і утворює атомарні іони зі сполук, які входять до складу зразка. Інтерфейс пов'язує простір, де знаходяться іони і тиск практично дорівнює атмосферному, з глибоким вакуумом мас-спектрометра. Лінзи фокусують іони в щільний пучок, який пропускається через осередок зіткнень або реакційний осередок. Квадруполь виконує функцію фільтра мас і розподіляє іони за їх співвідношенням маса / заряд. Вакуумна система з насосами підтримує в системі глибокий вакуум, необхідний для роботи іонної оптики, квадруполя і детектора. Детектор підраховує окремі іони, які пройшли через квадруполь. Комп'ютерна система трансформує сигнал та обробки інформації дозволяє контролювати роботу мас-спектрометра, керувати приладом та отримувати результати аналізу.

Рідкі зразки, які досліджуються, випаровуються завдяки лазерній та мікрохвильовій системі. Найбільш типова конструкція системи введення зразка складається з небулайзера і розпилювальної камери. Небулайзер перетворює рідину в суспензію маленьких крапель (аерозоль), що проходять через розпилювальну камеру в трубку або інжектор, які відкриваються по центру пальника, в результаті чого краплі потрапляють у потік плазми. Плазма розкладає складні сполуки та іонізує атоми. Далі іони проходять крізь інтерфейс та іонні лінзи. Сфокусований потік іонів розділяється за співвідношенням маса / заряд і потрапляє на детектор. Детектор фіксує попадання кожного іона, а комп'ютерна система перетворює ці сигнали в концентрації кожного елемента і формує звіт про результати аналізу.

Результати хімічного аналізу вмісту важких металів у відпрацьованих акумуляторних батареях. На рис. 2 наведено батарейки, які було довільно обрано для мікроелементного аналізу



Рис. 2. Набір сольових батарейок та акумуляторів для мікроелементного аналізу

методом ІЗП-МС. Загальні характеристики сольових батарейок та акумуляторів визначені в табл. 2.

Результати мікроелементного аналізу сольових батарейок наведено на рис. 3–7. Вміст макроелементів (цинк, марганець, калій, натрій, кремній) є типовим для усіх батарейок (рис. 3). Концентрації елементів у пробах варіюють: цинк – від 87,88 мг/кг (Z7) до 309,9 мг/кг (Z10); марганець – від 150,4 мг/кг (Z12) до 439,6 мг/кг (Z7); калій – від 727,9 мг/кг (Z8) до 1323,0 мг/кг (Z3); натрій – від 406,1 мг/кг (Z3) до 744,0 мг/кг (Z9); кремній – від 19,6 мг/кг (Z14) до 33,8 мг/кг (Z12). Більший вміст макроелементів виявлено в батарейках Energizer, Generator Energy, Energy (Енергія) та Varta порівняно з іншими, але в межах 10-15% від середнього вмісту важких металів.

Таблиця 2

Характеристики сольових батарейок та акумуляторів

№ проби	Назва	Країна-виробник	Тип батарейки	Підтип	A-тип	Відсутність металів
Z1	Duracell	Бельгія	Лужні	LR6	AA	
Z2	Sunmol		Лужні	LR6	AA	
Z3	Energizer		Лужні			
Z4	Sony New Ultra	Польща		R6	AA	Hg
Z5	Videx		Сольові	RO3P	AAA	Hg, Cd
Z6	Panasonic	Польща	Zn-вуглець	R6BE	AA	Hg, Pb
Z7	Generator Energy			LR03	AAA	
Z8	Digital		Zn-хлорид	RO3P	AAA	
Z9	Large	Китай		RO3	AAA	Hg
Z10	Energy (Енергія)	Китай		RO3	AAA	Hg
Z11	Maxus Mega Power		Лужні	LR6	AA	
Z12	Germania			LR6	AA	Hg
Z13	Varta	Німеччина	Лужні	LR6	AA	
Z14	Nasha Sylva	Китай / Україна	Лужні	LR06	AA	Hg, Cd

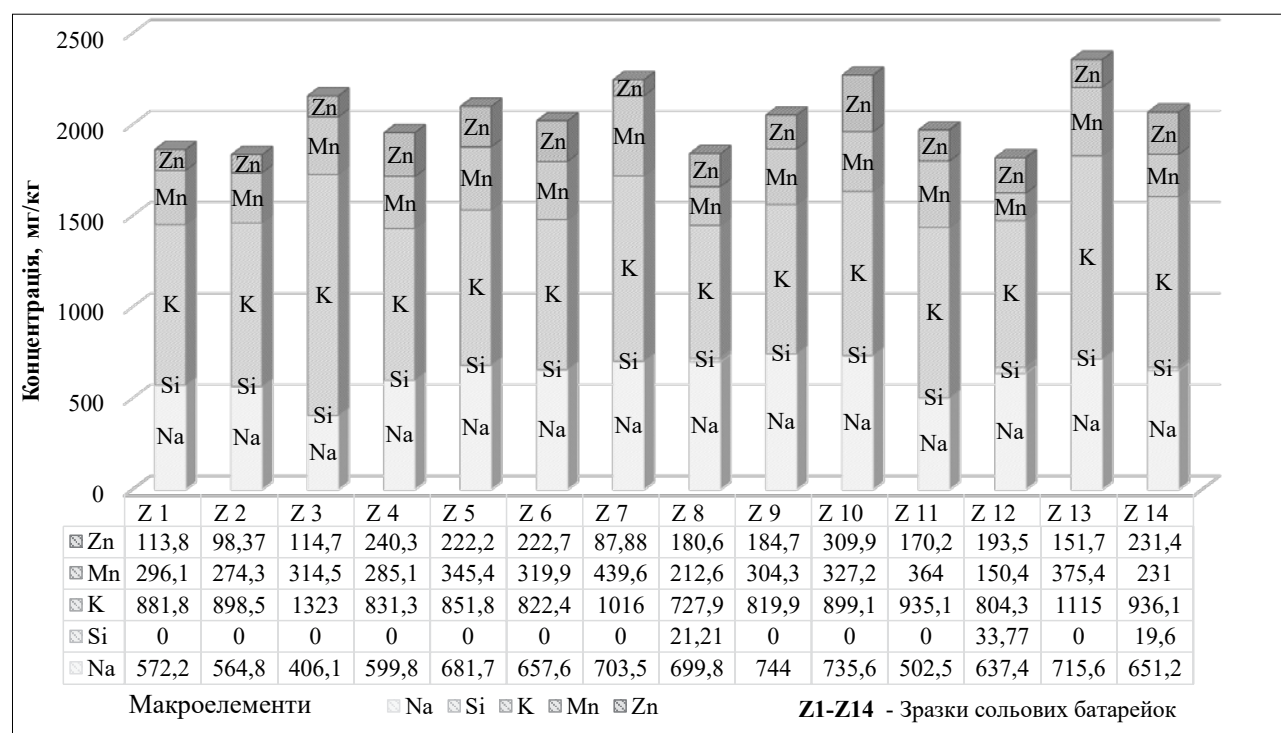


Рис. 3. Вміст макроелементів у сольових батарейках

Вміст макроелементів, які є породотворюючими та в природних умовах є складниками порід і мінералів (залізо, алюміній, магній), наведено на рис. 4. Концентрації елементів у пробах варіюють: залізо – від 0,5 мг/кг (Z11) до 18,1 мг/кг (Z12); алюміній – від 3,4 мг/кг (Z14) до 9,9 мг/кг (Z12); магній – від 0,5 мг/кг (Z9) до 0,7 мг/кг (Z12). Більший вміст породотворюючих макроелементів виявлено в батарейках Digital і Germania порівняно з іншими, проте в половині зразків зазначені еле-

менти не виявлені взагалі або присутні в незначних концентраціях.

Вміст мікроелементів (церій, сурма, олово, індій, кадмій, срібло, молибден, ітрій, кобальт, хром, ванадій, літій) наведено на рис. 5.

Концентрації елементів у пробах варіюють: церій – від 1,7 мкг/кг (Z9) до 20,9 мкг/кг (Z12); олово – від 5,8 мкг/кг (Z5) до 195,9 мкг/кг (Z10); індій – від 0,6 мкг/кг (Z5) до 23,5 мкг/кг (Z7); кадмій – від 8,0 мкг/кг (Z14) до 24,9 мкг/кг (Z12);

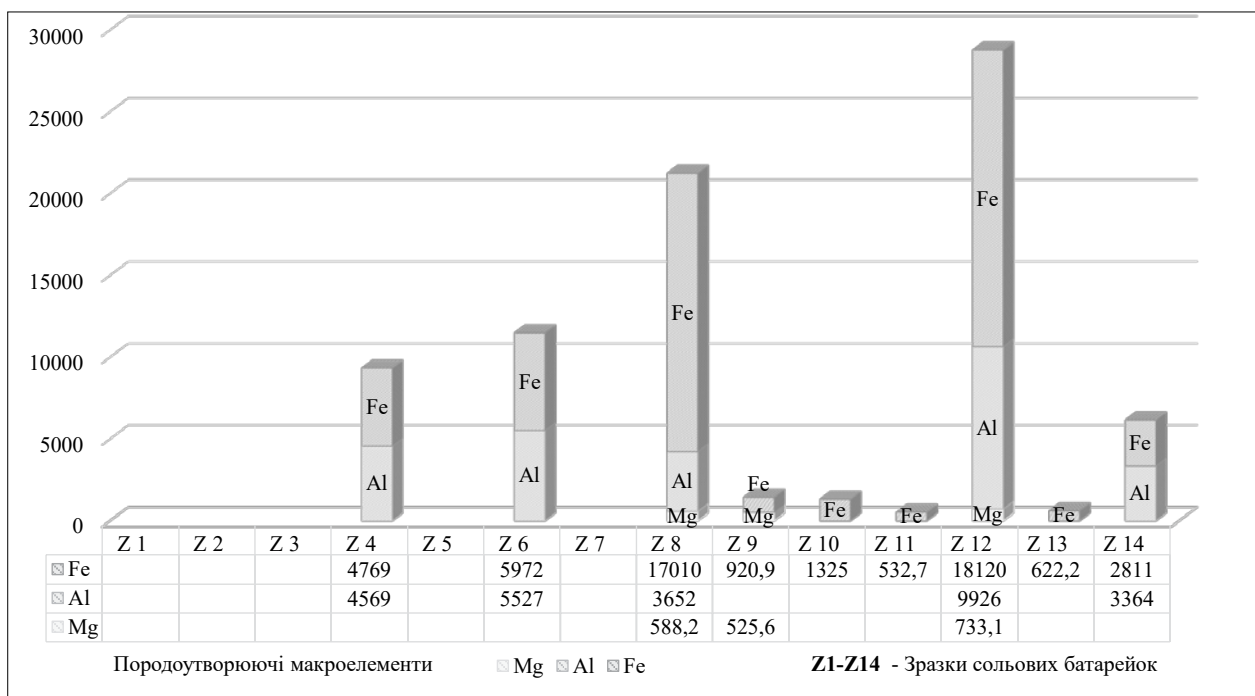


Рис. 4. Вміст породоутворюючих макроелементів у сольових батарейках

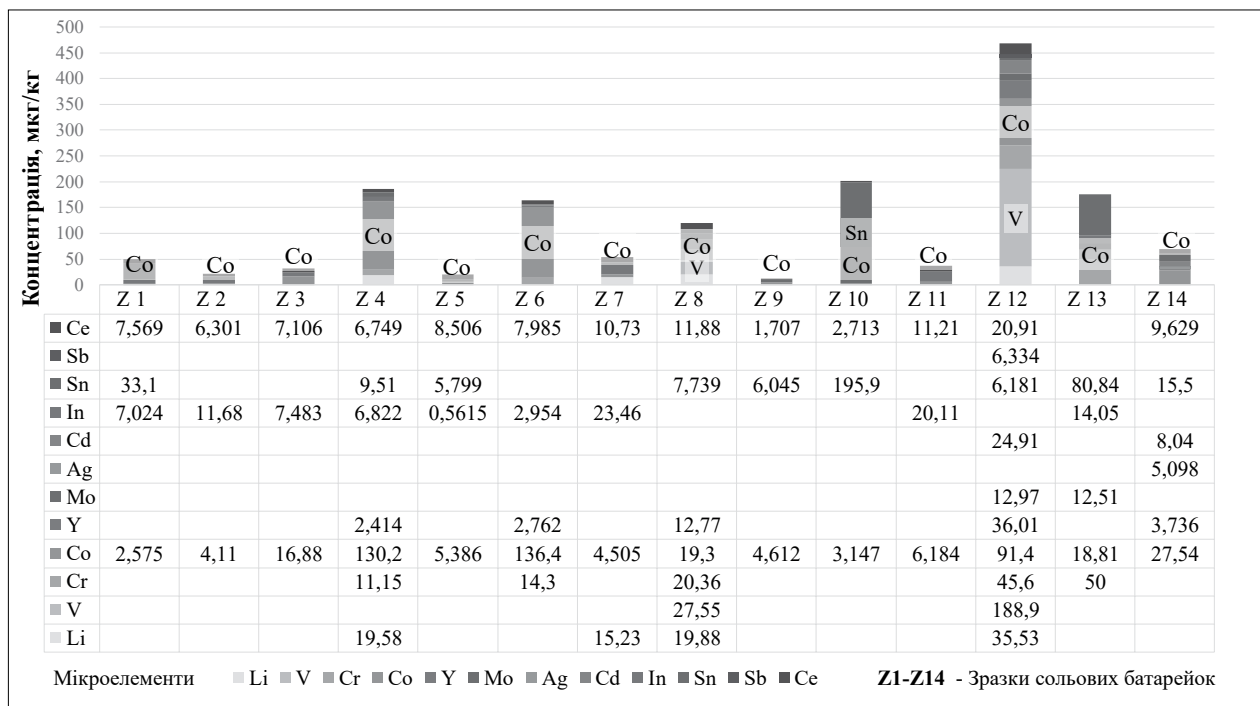


Рис. 5. Вміст мікроелементів у сольових батарейках

молібден – від 12,5 мкг/кг (Z13) до 13,0 мкг/кг (Z12); ітрій – від 2,4 мкг/кг (Z4) до 36,0 мкг/кг (Z12); кобальт – від 2,6 мкг/кг (Z1) до 136,4 мкг/кг (Z6); хром – від 11,2 мкг/кг (Z4) до 50,0 мкг/кг (Z13); ванадій – від 27,6 мкг/кг (Z8) до 188,9 мкг/кг (Z12); літій – від 15,2 мкг/кг (Z7) до 35,5 мкг/кг (Z12). Деякі елементи виявлено лише в окремих батарейках: сурма – 6,3 мкг/кг (Z12); срібло – 5,1 мкг/кг (Z14). Загалом найбільший вміст наведених мікроелемен-

тів виявлено в батарейках Germania, а також Sony New Ultra, Panasonic, Digital, Energy (Енергія), Varta.

Вміст рідкоземельних і радіоактивних елементів (уран, торій, реній, самарій, празеодим, цезій) наведено на рис. 6. Концентрації елементів у пробах варіюють так: уран – від 0,146 мкг/кг (Z4) до 2,223 мкг/кг (Z12); торій – від 0,214 мкг/кг (Z12) до 0,523 мкг/кг (Z12); реній – від 0,101 мкг/кг (Z5) до 0,107 мкг/кг (Z2); самарій – від 0,541 мкг/кг (Z14)

до 5,476 мкг/кг (Z12); празеодим – від 0,105 мкг/кг (Z7) до 3,486 мкг/кг (Z12); цезій – від 1,094 мкг/кг (Z5) до 6,204 мкг/кг (Z10). Найбільший вміст наведених мікроелементів виявлено в батарейках Germania, Digital, Energy (Енергія).

Вміст лантаноїдів (лютецій, ітербій, тулій, ербій, гольмій, диспрозій, тербій, гадоліній, європій) наведено на рис. 7. Концентрації елементів у пробах варіюють так: лютецій – від 0,134 мкг/кг (Z8) до 0,469 мкг/кг (Z12); ітербій – від 0,170 мкг/кг (Z4) до 3,171 мкг/кг (Z12); тулій – від 0,155 мкг/кг (Z8) до

0,508 мкг/кг (Z12); ербій – від 0,102 мкг/кг (Z1) до 3,367 мкг/кг (Z12); гольмій – від 0,111 мкг/кг (Z14) до 1,092 мкг/кг (Z12); диспрозій – від 0,427 мкг/кг (Z4) до 4,862 мкг/кг (Z12); тербій – від 0,389 мкг/кг (Z8) до 0,711 мкг/кг (Z12); гадоліній – від 0,127 мкг/кг (Z13) до 5,830 мкг/кг (Z12); європій – від 0,135 мкг/кг (Z14) до 0,999 мкг/кг (Z12). Привертає увагу надмірний вміст лантаноїдів у батарейках Germania та Digital, що в 2-15 разів вище порівняно з іншими батарейками. Лише в цих пробах виявлено лютецій, тулій, тербій. Гадоліній виявлено в усіх пробах.

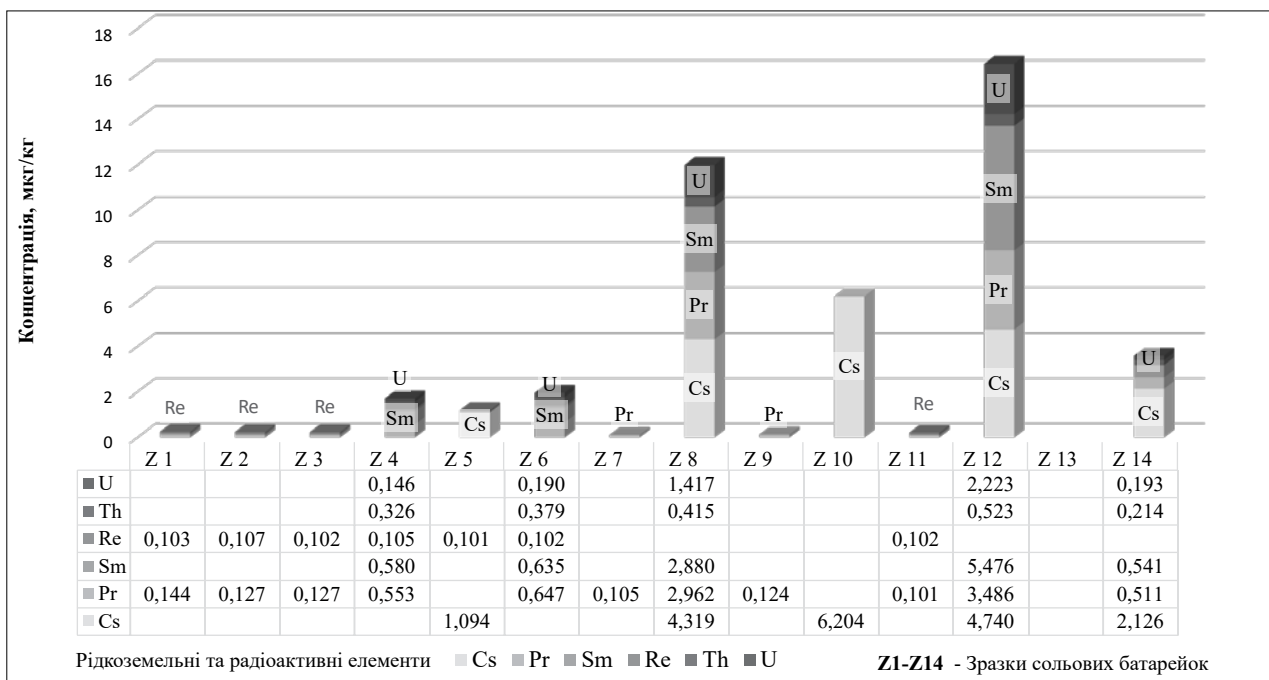


Рис. 6. Вміст рідкоземельних і радіоактивних елементів у сольових батарейках

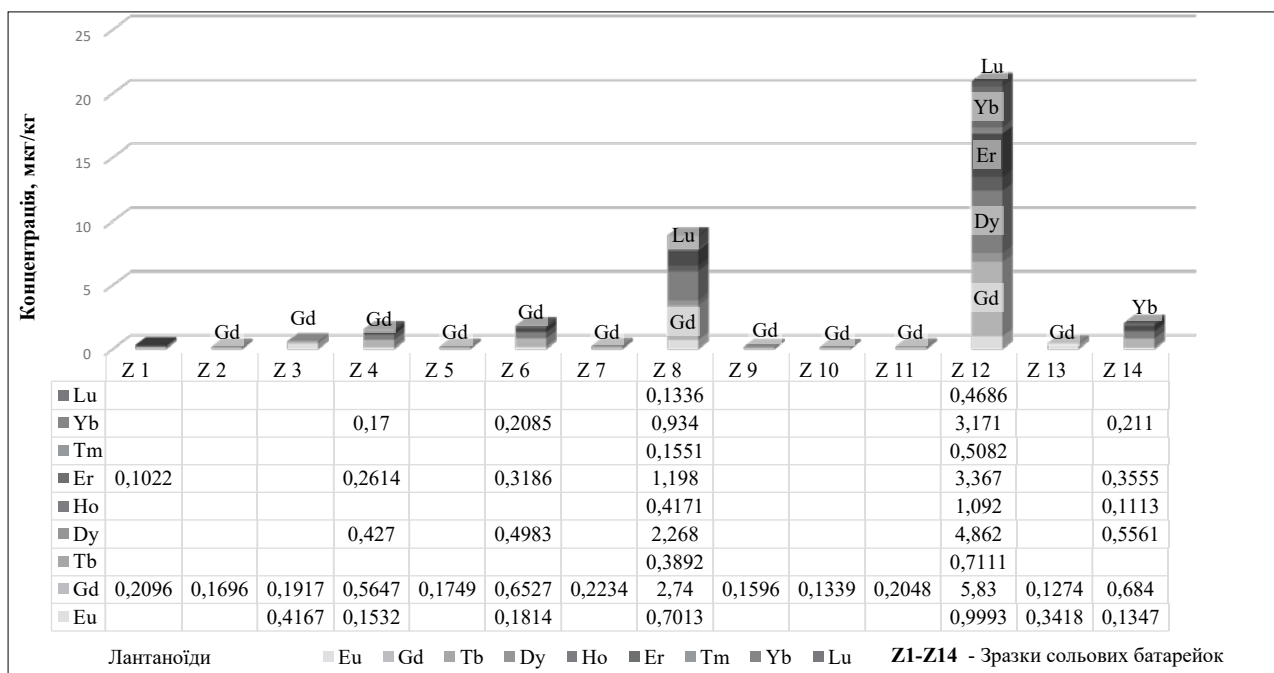


Рис. 7. Вміст лантаноїдів у сольових батарейках

Загалом мікроелементний аналіз із використанням методу ІЗП-МС дозволив виявити хімічний вміст 14 видів сольових батарейок. Найбільші концентрації важких металів присутні в батарейках Germania та Digital, що в 2–15 разів перевищує вміст порівняно з іншими батарейками.

Головні висновки. У статті наведено результати хімічного аналізу вмісту важких металів у відпрацьованих акумуляторних батарейках методом мас-спектрометрії з індуктивно-зв'язаною плазмою (ІЗП-МС). Встановлено, що сольові батарейки Germania та Digital є найбільш екологічно небезпечними для довкілля за умови несанкціонованого потрапляння на сміттєзвалища внаслідок високого вмісту важких металів.

Перспективи використання результатів дослідження. Натепер в Україні не існує централізованої системи збору та переробки батарейок та акумуляторів, тому 99 % використаних батарейок потрапляють на сміттєзвалища, що створює загрозу довкіллю. Ретельний аналіз ІЗП-МС дозволив оцінити хімічний вміст сольових батарейок, які реалізуються через споживчу мережу супермаркетів і спеціалізованих магазинів, та виявити, які є найбільш небезпечними в екологічному сенсі.

Результати аналізу можуть бути використані для подальшого проведення екологічної експертизи як на офіційному рівні, так і з залученням громадських організацій.

Література

1. Башкирцев А.С. Реанимация опасных отходов: батарейки / А.С. Башкирцев, О.Н. Пылаева. С.-Петербург : Некоммерческое партнерство «Институт обучения через опыт», 2013. 155 с.
2. Химические источники тока : Справочник / Под ред. Н.В. Коровина, А.М. Скундина. М. : Из-во МЭИ, 2003. 739 с.
3. Рыжакова М.Г. Отработавшая батарейка как опасный отход / Твердые бытовые отходы, 2015. № 6. С. 42–47.
4. The European Portable Battery Association Product Information Primary and Rechargeable Batteries. URL: http://www.epbaeurope.net/EPBA_product%20information_may2007_FINAL.pdf.
5. Кулифеев В.К. Утилизация литиевых химических источников тока : монография / В.К. Кулифеев, В.П. Тарасов, О.Н. Криволапова. М. : МИСиС, 2010. 261 с.
6. Ведення сільськогосподарського виробництва у приватному секторі в умовах посиленого антропогенного впливу на навколишнє середовище / [Т.М. Мислива, П.П. Надточій, Л.О. Герасимчук та ін.]; за ред. Т.М. Мисливої. Житомир, 2011. 50 с.
7. Sun J., Li J., Zhou T., Yang K., Wei S., Tang N., Dang N., Li H., Qiu X., Chen L. (2016). Toxicity, a serious concern of thermal runaway from commercial Li-ion battery. *Nano Energy*, Vol. 27, P. 313–319. URL: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2016.06.031>.
8. Guevara-García J.A., Montiel-Corona V. (2012). Used battery collection in central Mexico: Metal content, legislative / management situation and statistical analysis. *Journal of Environmental Management*. Vol. 95, P. 154–157. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.09.019>.
9. Peng L., Sun D., Su M., Han J., Dong C. (2012). Rapid analysis on the heavy metal content of spent zinc–manganese batteries by laser-induced breakdown spectroscopy. *Optics & Laser Technology*. Vol. 44, Issue 8, P. 2469–2475. URL: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2012.01.036>.
10. Barrett H.A., Ferraro A., Burnette C., Meyer A., Krekeler M.P.S. (2012). An investigation of heavy metal content from disposable batteries of non-U.S. origin from Butler County, Ohio: An environmental assessment of a segment of a waste stream. *Journal of Power Sources*, Vol. 206, P. 414–420. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.01.008>.
11. Terazono A., Oguchi M., Iino S., Mogi S. (2015). Battery collection in municipal waste management in Japan: Challenges for hazardous substance control and safety. *Waste Management*, Vol. 39, P. 246–257. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.01.038>.
12. Recknagel S., Radant H., Kohlmeyer R. (2014). Survey of mercury, cadmium and lead content of household batteries. *Waste Management*, Vol. 34, Issue 1, P. 156–161. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.09.024>.
13. Budnik L.T., Casteleyn L. (2019). Mercury pollution in modern times and its socio-medical consequences. *Science of The Total Environment*, Vol. 654, P. 720–734. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.408>.
14. Tetsoopan S., Kueoouo G. (2008). Quantification and characterization of discarded batteries in Yaoundé, from the perspective of health, safety and environmental protection. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 2, Issues 8-9, Pages 1077–1081. URL: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.04.006>.
15. Adejumo S.A., Ogundiran M.B., Togun A.O. (2018). Soil amendment with compost and crop growth stages influenced heavy metal uptake and distribution in maize crop grown on lead-acid battery waste contaminated soil. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Vol. 6, Issue 4, P. 4809–4819. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.07.027>.
16. Liu G., Yu Y., Hou J., Xue W., Liu X., Liu Y., Wang W., Alsaedi A., Hayat T., Liu Z. (2014). An ecological risk assessment of heavy metal pollution of the agricultural ecosystem near a lead-acid battery factory. *Ecological Indicators*. Vol. 47, P. 210–218. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.04.040>.
17. Gilstrap R.A. (2009). A colloidal nanoparticle form of indium tin oxide: system development and characterization. PhD Dissertation. Georgia Institute of Technology. URL: <http://hdl.handle.net/1853/33995>.