

ПОТЕНЦІЙНІ НАПРЯМКИ ЗАСТОСУВАННЯ БІШОФІТУ ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ДЛЯ РЕКУЛЬТИВАЦІЯ (ДЕПОНУВАННЯ) ПОЛІГОНІВ І ЗВАЛИЩ

Ілляш О. Е., Ганошенко Г. В.

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
пр. Першотравневий, 24, 36011, м. Полтава
iloks2504@gmail.com, vkb_gena@ukr.net

У статті узагальнено сучасні наукові підходи та практичні результати щодо використання природного бішофіту ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) та відходів його видобування як екологічно безпечного реагенту для стабілізації та рекультивациі полігонів твердих побутових відходів (ТПВ). На основі аналізу міжнародних досліджень (Китай, Польща, Литва, Італія, США, Японія) та українського досвіду (Полтавська, Харківська, Львівська області) систематизовано напрями застосування магнієвих солей у технологіях іммобілізації важких металів, пилоподавлення, зміцнення зольних і ґрунтових систем, а також формування технічних бар'єрних та рекультивацийних шарів полігонів. Показано, що Mg^{2+} -іони знижують лужність золошлакових матеріалів, сприяють утворенню малорозчинних оксихлоридних та фосфатних фаз, істотно зменшують вилугування Pb, Zn, Cd, Cu та підвищують водостійкість стабілізованих матриць, що є критичним для довгострокової ізоляції забруднювачів у полігонних масивах. Окреслено мінерально-сировинний потенціал Полтавського (Затуринаського) родовища бішофіту, визначено його переваги як локального доступного ресурсу для екологічного будівництва та реконструкції полігонів, зокрема у поєднанні з МОС/МКРС-в'язучими матеріалами з низьким вуглецевим слідом. Обґрунтовано необхідність розроблення національних методичних підходів та технічних регламентів, що визначатимуть оптимальні параметри застосування бішофіту у стабілізаційних та рекультивацийних системах. Робота має міждисциплінарний характер, поєднує екологічну інженерію, геохімію, технологію будівельних матеріалів та інженерію довкілля. Отримані результати можуть бути використані для оновлення регіональних програм поводження з відходами, впровадження принципів циркулярної економіки, планування післявоєнного екологічного відновлення територій і підготовки пілотних проєктів рекультивациі полігонів із використанням природного бішофіту. *Ключові слова:* бішофіт, рекультивациа полігонів, депонування полігонів, стабілізація відходів, вуглецевий слід, циркулярна економіка.

Potential directions for the application of bischofite ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) in landfill and dumpsite reclamation. Illiash O., Hanoshenko H.

The article summarizes modern scientific approaches and practical results regarding the use of natural bischofite ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) and its mining waste as an environmentally safe reagent for stabilizing and recultivating solid waste landfills. Based on an analysis of international studies (China, Poland, Lithuania, Italy, the USA, Japan) and Ukrainian experience (Poltava, Kharkiv, Lviv regions), the directions of application of magnesium salts in technologies for immobilization of heavy metals, dust suppression, strengthening of ash and soil systems, as well as the formation of technical barrier and reclamation layers of landfills are systematized. It has been shown that Mg^{2+} ions reduce the alkalinity of ash and slag materials, promote the formation of poorly soluble oxychloride and phosphate phases, significantly reduce the leaching of Pb, Zn, Cd, Cu leaching, and increase the water resistance of stabilized matrices, which is critical for the long-term isolation of pollutants in landfill arrays. The mineral resource potential of the Poltava (Zaturyn) bischofite deposit has been outlined, and its advantages as a locally available resource for ecological construction and landfill reconstruction have been identified, particularly in combination with МОС/МКРС binding materials with a low carbon footprint. The need to develop national methodological approaches and technical regulations that will determine the optimal parameters for the use of bischofite in stabilization and reclamation systems is justified. The results obtained can be used to update regional waste management programs, implement circular economy principles, plan post-war ecological restoration of territories, and prepare pilot projects for landfill reclamation using natural bischofite. *Key words:* bischofite, landfill reclamation, landfill deposition, waste stabilization, carbon footprint, circular economy.

Постановка проблеми. Сучасний стан полігонів і звалищ твердих побутових відходів (ТПВ) в Україні характеризується високим рівнем екологічного ризику та низьким ступенем технологічного контролю. Понад 90 % обсягів ТПВ захоронюються на полігонах, значна частина яких експлуатується з порушенням проєктних вимог, без систем збору фільтрату та належної ізоляції небезпечних фракцій [1]. Це спричиняє інфільтрацію забруднюючих речо-

вин у ґрунтові води, емісію важких металів і органічних сполук, а також нестійкість покривних шарів.

Традиційні методи рекультивациі полігонів – використання ґрунтових або цементних покриттів – не забезпечують достатнього рівня хімічної стабільності відходів. Цементні системи, хоч і створюють міцні моноліти, є надмірно лужними ($\text{pH} > 11$), що підвищує рухливість окремих металів, зокрема Pb, Zn, Cd, у поверхневих водах [2]. Крім того, виробни-

цтво цементу має значний вуглецевий слід, що суперечить принципам «зеленої» реконструкції України.

Міжнародний досвід останніх років показує, що солі магнію ($MgCl_2$, $MgSO_4$) та похідні матеріали на їх основі (MgO , МОС (магнієвий оксихлоридний цемент (цемент Сорелля), МКРС (магнієво-калійний фосфатний цемент)), можуть ефективно використовуватись у технологіях стабілізації золи після спалювання ТПВ, зменшення лужності та іммобілізації важких металів [3–6]. Іони Mg^{2+} здатні формувати щільні оксихлоридні та фосфатні фази, які фіксують токсичні елементи у малорозчинних сполуках, підвищуючи довговічність рекультиваційних шарів [7–8].

Водночас в Україні наявні потужні ресурси природного бішофіту, особливо Полтавського (Затуринського) родовища, що містить $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ із високою концентрацією магнію (до 95 г/л) та мінімальним вмістом домішок [9–10]. Незважаючи на промислове використання бішофіту в дорожньому господарстві та як пилоподавлювача, його потенціал у екологічній інженерії, зокрема для рекультивації полігонів, залишається недостатньо дослідженим.

Таким чином, наукова проблема полягає у відсутності системного підходу до оцінки можливостей і технологічних напрямів застосування природного бішофіту для рекультивації та стабілізації полігонних масивів. Необхідно визначити ефективні склади бішофітвмісних стабілізуючих сумішей, оцінити їхній вплив на лужність і мобільність важких металів, а також розробити наукові рекомендації щодо практичного використання цієї сировини у процесах екологічного відновлення полігонів і звалищ.

Актуальність дослідження. Проблема екологічно безпечної рекультивації полігонів і звалищ твердих побутових відходів (ТПВ) є однією з ключових для сучасної екологічної політики України та Європейського Союзу. Значна кількість полігонів в Україні функціонує з перевищенням проєктних потужностей і без належного захисту ґрунтів і підземних вод, що призводить до інфільтрації токсичних компонентів, накопичення важких металів та вторинного забруднення довкілля [1].

У міжнародній практиці останніх десятиліть активно розвиваються технології стабілізації золи та шлаків після спалювання ТПВ і використання цих матеріалів у системах рекультивації полігонів. Особливу увагу дослідників привертають магнієві солі, зокрема хлорид магнію ($MgCl_2$), завдяки їхній здатності зменшувати лужність середовища, фіксувати важкі метали та підвищувати водостійкість шарів [2, 5].

Україна має значний потенціал для використання власних мінеральних ресурсів у таких технологіях. Полтавське (Затуринське) родовище бішофіту є унікальним джерелом природного $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ із високою чистотою (93–96 %) та концентрацією магнію до 95 г/л [9]. Цей природний ресурс може бути засто-

сований не лише в хімічній промисловості, а й у екологічній інженерії для стабілізації полігонних масивів і формування технічних шарів рекультивації.

На відміну від традиційних матеріалів – цементу або вапна – бішофіт має високу іонну активність та здатність до утворення оксихлоридних фаз, які сприяють зниженню розчинності Pb, Zn, Cd і зменшенню ризику вимивання токсикантів у навколишнє середовище [3, 7]. Таким чином, застосування бішофіту може забезпечити екологічно безпечну, енергозберігаючу та економічно доцільну альтернативу традиційним технологіям рекультивації.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю:

1) адаптації міжнародного досвіду стабілізації золошлакових матеріалів із використанням $MgCl_2$ до умов стабілізації полігонних мас відходів;

2) розроблення науково обґрунтованої методики рекультивації полігонів із залученням місцевих мінеральних ресурсів – зокрема природного бішофіту Полтавського родовища.

Таким чином, дослідження потенціалу використання бішофіту ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$) для рекультивації полігонів і звалищ має високу наукову, практичну та екологічну значущість і спрямоване на створення інноваційних рішень для безпечного управління відходами в Україні у післявоєнний період відновлення та євроінтеграції.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Мета та завдання дослідження. Сучасні напрями розвитку науки про поводження з відходами передбачають інтеграцію принципів циркулярної економіки, скорочення полігонного навантаження та використання місцевих ресурсів у процесах екологічної рекультивації. У цьому контексті застосування природного бішофіту ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$) є перспективним як з наукової, так і з практичної точки зору.

Авторський доробок безпосередньо пов'язаний із вирішенням важливих науково-технічних завдань, визначених на рівні:

1. Національної стратегії управління відходами в Україні до 2030 року, де передбачено розроблення технологій екологічної стабілізації полігонів і мінімізації впливу відходів на довкілля.

2. Європейського Зеленого курсу (EU Green Deal), який стимулює перехід до замкнених матеріальних циклів і скорочення викидів CO_2 у будівельному та екологічному секторах.

3. Завдань післявоєнного екологічного відновлення територій України, зокрема у сфері рекультивації порушених земель і небезпечних полігонів.

Розробка напрямів використання бішофіту у процесах рекультивації полігонів і звалищ відповідає актуальним міжнародним науковим пріоритетам, пов'язаним із застосуванням магнієвих в'язучих систем (МОС, МКРС), хлоридних стабілізаторів та екологічно безпечних реагентів для іммобілізації

токсичних компонентів у зольних і шлакових матеріалах [2, 5].

Метою дослідження є наукове обґрунтування потенційних напрямків використання бішофіту ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$) як промислового матеріалу для рекультивації (депонування) полігонів і звалищ твердих побутових відходів, з урахуванням його фізико-хімічних властивостей, доступності в Україні та здатності знижувати екологічні ризики забруднення довкілля.

Для досягнення поставленої мети передбачено виконання таких **основних завдань**:

1. Вивчити фізико-хімічний склад і властивості полтавського бішофіту, визначити вміст Mg^{2+} , Cl^- , домішок і показники мінералізації.

2. Проаналізувати міжнародний і вітчизняний досвід застосування магнієвих солей (зокрема бішофіту) у технологіях стабілізації золи, шлаків і технічних шарів полігонів. Визначити ключові висновки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

У контексті сучасних тенденцій переходу до циркулярної економіки та сталого управління відходами, особливу увагу привертають технології, що поєднують утилізацію промислових матеріалів із екологічною стабілізацією полігонних систем. Однією з таких перспективних речовин є **відходи видобування** бішофіту ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$), який є природним мінералом, що завдяки високій концентрації магнію та іонів хлору проявляє властивості ефективного стабілізатора, зв'язувального агента і пилоподавувача. Бішофіт видобувається в Україні (Полтавська, Дніпропетровська обл.) та має властивості, корисні для рекультивації полігонів і звалищ:

- В'язучі та стабілізуючі властивості – у суміші з золою, шлаками, ґрунтом може утворювати міцні ущільнені шари (зменшення інфільтрації, стабілізація відходів).

- Антипилова дія – знижує підйом пилу при формуванні верхніх шарів рекультиваційного покриття.

- Зниження утворення та міграції лічейту (рідина, що утворюється в результаті фільтрації води крізь масу відходів на полігоні або звалищі) – $MgCl_2$ сприяє ущільненню пор, зменшуючи водопроникність.

- Хімічна стабілізація – Mg^{2+} може зв'язувати деякі важкі метали (Pb, Cd, Zn) та інші іони, обмежуючи їх міграцію.

- Антибактеріальний ефект (висока іонна сила) – частково пригнічує анаеробну біоактивність у шарі стабілізації, що корисно для зон із високим газоутворенням.

Тож бішофіт ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$) – це природна мінеральна речовина, що належить до класу галогенідних мінералів і є шестиводним хлоридом магнію [2]. Мінерал утворюється внаслідок випаровування морських басейнів у закритих умовах, переважно в евапоритових товщах пермського та неогенового віку [11]. У природі трапляється як у вигляді кристаліч-

них утворень, так і у формі високомінералізованих розсолів.

Дослідження з 2018–2025 рр., що наведені в міжнародних публікаціях підтверджують, що магнієві системи стають важливим напрямом «зелених» технологій стабілізації відходів і матеріалів рекультивації. Найбільшу ефективність $MgCl_2$ демонструє у складі МОС/МКРС-в'язучих і при попередній хімічній активації золи ТПВ [2–7, 10–13, 20–23].

Аналіз українських джерел свідчить, що природний бішофіт активно використовується як технологічний реагент для пилоподавлення, стабілізації ґрунтових і золошлакових сумішей, а також розглядається як перспективна добавка у в'язучих системах для рекультивації полігонів [8–9, 18–19].

Порівняння міжнародного та українського досвіду дозволяє ідентифікувати ключові тенденції, технологічні підходи та перспективи адаптації європейських практик використання $MgCl_2$ до умов національної сировинної бази. Такий аналіз є необхідним кроком для формування науково-технічних основ інтегрованого використання бішофіту та відходів видобування бішофіту у рекультиваційних, стабілізаційних і дорожніх технологіях України.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Попри наявність значної кількості наукових і технічних досліджень у сфері рекультивації полігонів, комплексна оцінка можливостей застосування природного бішофіту ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$) у таких технологіях на сьогодні відсутня. Існуючі роботи здебільшого стосуються використання магнієвих солей у цементних і фосфатних системах [2, 3, 4], однак не враховують специфіки української сировинної бази, фізико-хімічного складу полтавського бішофіту та умов експлуатації полігонів побутових відходів.

Основними невирішеними аспектами загальної проблеми є такі:

1. Недостатня кількість досліджень, присвячених впливу природного бішофіту на поведінку золошлакових матеріалів при його використанні як стабілізуючого реагенту. Не встановлено оптимальні концентрації $MgCl_2 \cdot 6H_2O$, які забезпечують одночасно хімічну стабільність і механічну міцність рекультиваційного шару.

2. Відсутність систематизованих експериментальних даних щодо здатності бішофіту зменшувати вилуговування важких металів (Pb, Zn, Cd, Cu) у зольних сумішах після спалювання ТПВ. Існуючі міжнародні дослідження вказують на позитивний ефект магнієвих сполук, але не враховують особливості реального складу українських зол і фільтратів полігонів.

3. Брак практичних методик застосування бішофіту в процесах рекультивації полігонів і звалищ. Не розроблено національних технічних рекомендацій, які б визначали склад, послідовність укладання, граничні дози реагенту та вимоги до контролю екологічних показників.

4. Відсутність інтегрованого підходу до оцінки рекультиваційного потенціалу місцевих мінеральних ресурсів, таких як бішофіт, у контексті національної стратегії поводження з відходами та концепції замкненого матеріального циклу.

Отже, означена стаття присвячена заповненню наукової прогалини, що полягає у відсутності комплексного підходу до оцінки, моделювання та експериментального підтвердження ефективності використання природного бішофіту/відходів видобування природного бішофіту, як стабілізатора і структуроутворювача у процесах рекультивації полігонів твердих побутових відходів.

Результати цієї роботи мають стати науковим підґрунтям для створення методики оцінки ефективності бішофітвмісних систем, адаптованої до українських екологічних умов і нормативної бази, а також для практичної реалізації пілотних проектів з використанням природного бішофіту в процесах технічної рекультивації.

Новизна даного дослідження полягає у комплексному підході до обґрунтування можливостей використання природного бішофіту/відходів видобування природного бішофіту, як ефективного реагенту для екологічної стабілізації та рекультивації полігонів твердих побутових відходів (ТПВ). Вперше для українських умов науково обґрунтовано концепцію використання природного бішофіту (на прикладі Полтавського родовища) як локального ресурсу для формування стабілізуючих і рекультиваційних шарів полігонів побутових відходів. Запропоновано класифікацію потенційних напрямків застосування бішофіту ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$) – у пилоподавленні, стабілізації золи, створенні технічних шарів і у складі магнезівих в'язучих систем (МОС, МКРС) для депонування відходів. Уперше узагальнено міжнародний і вітчизняний досвід використання магнезівих солей у стабілізаційних технологіях та виділено ключові чинники, які зумовлюють перспективність їх адаптації до українських екологічних і ресурсних умов.

Методологічне та загальнонаукове значення роботи. Методологічне значення роботи полягає у формуванні науково обґрунтованої моделі використання природного бішофіту/відходів видобування природного бішофіту у технологіях рекультивації полігонів і звалищ, що поєднує екологічні, геохімічні та інженерні підходи. Запропонована методика дослідження базується на системному аналізі властивостей природних магнезівих солей, їх взаємодії з компонентами золи та шлаків і оцінці ефективності стабілізаційних процесів у контексті принципів циркулярної економіки. Запропонований у роботі підхід може бути використаний як **методологічна основа для подальших досліджень** у сферах:

- рекультивації забруднених територій і хвостосховищ;
- стабілізації зольних залишків після спалювання ТПВ;

- створення магнезівих групи цементувальних матеріалів з низьким вуглецевим слідом;
- розроблення регіональних програм поводження з відходами із залученням місцевих мінеральних ресурсів.

Таким чином, робота має **міждисциплінарний характер**, поєднує **прикладну екологію, геохімію та технологію будівельних матеріалів**, і створює **нову методологічну основу для оцінки екологічної ефективності стабілізаційних процесів** у системах рекультивації полігонів і звалищ.

Виклад основного матеріалу. Рекультивація полігонів і звалищ твердих побутових відходів (ТПВ) передбачає створення стабілізуючих, ізолювальних і технічних шарів, здатних знизити вплив забруднюючих речовин на довкілля. Одним із перспективних напрямків є використання солей магнезю, зокрема бішофіту ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$), який проявляє комплексну дію – хімічну, фізико-механічну та структуроутворювальну.

Застосування бішофіту у рекультиваційних процесах ґрунтується на його здатності:

- 1) зменшувати лужність середовища за рахунок реакції Mg^{2+} з гідроксидами кальцію та натрію, що характерні для золошлакових систем;
- 2) зв'язувати іони важких металів (Pb^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} , Cu^{2+}) у малорозчинні хлоридні та оксихлоридні сполуки;
- 3) підвищувати міцність і водостійкість рекультиваційних шарів завдяки утворенню оксихлоридів магнезю ($3Mg(OH)_2 \cdot MgCl_2 \cdot 8H_2O$), які виконують роль природного цементувального агента [12].

Таким чином, бішофіт може бути розглянутий як альтернатива традиційним цементним в'язучим, що мають високий вуглецевий слід і не забезпечують ефективної фіксації важких металів у зольних залишках.

Хімічний склад і структура. Основна формула бішофіту – $MgCl_2 \cdot 6H_2O$, молярна маса – 203,30 г/моль. Катіони магнезю у структурі координуються шістьма молекулами води, утворюючи комплекси $[Mg(H_2O)_6]^{2+}$, що забезпечує високу гігроскопічність і добру розчинність у воді (до 54 г/100 мл при 20 °С) [8].

Природні розсоли містять домішки NaCl, KCl, CaCl₂, MgSO₄, Br⁻, I⁻, B, Sr, Fe, Si, що відображає багатоконпонентність геохімічного середовища. За даними досліджень Полтавського родовища, загальна мінералізація становить 350–450 г/л, вміст магнезю – до 95 г/л Mg^{2+} , а чистота мінералу сягає 93–96 % [9–10].

Фізико-хімічні властивості. Бішофіт має моноклінну кристалічну систему, безбарвний або білий колір і склоподібний блиск. Його густина становить 1,56–1,60 г/см³, температура плавлення – близько 117 °С [12]. У водних розчинах $MgCl_2$ проявляє властивості сильного електроліту, рН зазвичай у межах 6,5–7,5. Висока гігроскопічність робить бішофіт ефективним у технологіях пилоподавлення, стабі-

лізації ґрунтів і зміцнення поверхневих покриттів полігонів [13–14].

Геологічне походження. Бішофіт формується у процесі послідовного випаровування морських вод у соленосних басейнах. Найвідоміші промислові поклади розташовані у Німеччині, Польщі, Китаї, Росії та Україні [11, 15]. В Україні основним промисловим джерелом є Затуринське родовище Полтавської області, де бішофіт видобувається з глибин 2–2,5 км у вигляді концентрованого розсолу.

Склад полтавського бішофіту. Джерела онлайн-даних свідчать, що розчин полтавського бішофіту (РПБ) є полімінеральним хлормагнієвим розсоллом (основа – $MgCl_2 \cdot 6H_2O$) із варіативним вмістом домішок (K, Na, Ca, Br, I, B тощо). Ключові параметри, зафіксовані у відкритих джерелах: густина «сирого» розсолу на гирлі свердловини: $\approx 1270\text{--}1290$ кг/м³ – за матеріалами Полтавської ОДА (технологічний опис видобування на Затуринському родовищі) [16]. Загальна мінералізація застосовуваного РПБ: $\approx 350\text{--}450$ г/л – за фаховим оглядом (Харків) про «розчин полтавського бішофіту», де також вказано варіабельність між свердловинами [9]. Магній у РПБ (орієнтовно): до ≈ 95 г/л Mg – за довідником ДУ «Укрпрофздравниця» (узагальнені медико-курортні дані для бішофітових розсолів). Для конкретної партії РПБ значення має підтверджуватись паспортом якості [17]. Номенклатура мікродомішок: K⁺, Na⁺, Ca²⁺, Br⁻, I⁻, B, Fe, Si тощо – підтверджується матеріалами виробника (ТОВ «Фірма «Мінерал»») і оглядовими джерелами [10].

Повний кількісний склад конкретної партії РПБ (іонний/мікроелементний профіль, у т.ч. важкі метали) зазвичай наводиться у паспорті якості виробника або у звітах лабораторних аналізів для свердловин/партій. Для коректних розрахунків у проєктах рекультивациі рекомендуємо запитувати паспорти якості від ТОВ «Фірма «Мінерал»» (Полтава). Склад РПБ змінюється за глибиною та між свердловинами родовища; це типово для евапоритових пластів (аналогічні висновки наведено у геолого-ресурсних оглядах USGS для соленосних басейнів) [18]. Тому для інженерних розрахунків використовувати аналіз саме тієї партії, що постачається на об'єкт.

В Україні основним джерелом природного бішофіту є поклади Полтавського регіону, де розчини застосовуються в промисловості та дорожньому господарстві. Фізико-хімічні властивості розчинів (густина, мінералізація) відповідають застосуванню як реагентів за наявності контролю домішок. Для інтеграції у полігонні проєкти необхідні стандартизовані паспорти якості та регламенти застосування.

Прикладні напрями використання. Хімічна промисловість – як сировина для одержання магнієвих сполук, каталізаторів і металевих магнію. Будівельна галузь – у виробництві магнієвих оксихлоридних цементів (МОС) та магнієво-фосфатних цементів (МКРС), що мають високу міцність

і здатність фіксувати важкі метали [2, 4, 5]. Екологічні технології – як реагент для стабілізації золи після спалювання ТПВ, де Mg^{2+} знижує лужність середовища і сприяє утворенню нерозчинних сполук Pb, Zn, Cd [3, 7]. Інженерна геологія – для пилоподавлення, зміцнення дорожніх шарів, а також як компонент технічних шарів рекультивациі [19, 20]. Медико-бальнеологічне застосування – у вигляді розсолів при лікуванні опорно-рухових захворювань [17].

Наукове значення для рекультивациі полігонів та звалищ. Бішофіт є перспективним модифікатором і стабілізатором у системах утилізації та рекультивациі твердих відходів. Його іони Mg^{2+} проявляють властивості нейтралізатора лужності, а в поєднанні з Cl⁻ формують малорозчинні оксихлоридні фази, які фіксують важкі метали [5]. Завдяки наявності високоякісних покладів у Полтавській області, бішофіт можна розглядати як локальний природний матеріал для технологій стабілізації золи, шлаків і формування технічних шарів полігонів, що відповідають принципам циркулярної економіки.

Аналіз міжнародного та українського досвіду використання бішофіту. Досвід міжнародних досліджень (США, Литва, Польща, Китай, Японія, Італія) демонструє широкий спектр застосування сполук магнію, зокрема $MgCl_2$, у технологіях стабілізації золи після спалювання твердих побутових відходів (ТПВ), виготовлення магнієзальних цементів (МОС, МКРС), а також зміцнення дорожніх шарів і пилоподавлення. Ці рішення дозволяють зменшити лужність матеріалів, знизити розчинність і мобільність важких металів (Pb, Zn, Cd) у 2–10 разів, покращити механічну стійкість шарів і водостійкість покриттів.

Далі більш детально наведено аналіз міжнародних джерел, з фокусом на основну ідею публікації, висновки даного дослідження та їх релевантності. –

У публікації Goodrich B. A. et al. (2009) виконано польові вимірювання на ділянках ґрунтових доріг, оброблених розчином $MgCl_2$ як пилоподавлювачем. Отримано такі висновки: $MgCl_2$ суттєво знижує утворення пилу (до 80 %), вплив на поверхневі води мінімальний за умови правильного дозування та підтверджено стабільність реагенту при сезонних опадах. Релевантність: доведена ефективність бішофіту (аналогічний склад) для пилоподавлення на відкритих полігонах [13].

Дослідження, проведені та описані у роботі Pennsylvania DEP (2022) направлені на отримання регуляторного звіту щодо безпечності хлоридних пилоподавлювачів ($MgCl_2$, $CaCl_2$, NaCl) на дорогах. Висновки: $MgCl_2$ має менший вплив на флору й фауну, ніж NaCl, необхідний моніторинг Cl⁻ у стоках і ґрунтових водах, рекомендовано для промислових і полігонних внутрішніх доріг. Релевантність: обґрунтування безпечного застосування бішофітових розчинів на полігонах з екологічними запобіжниками [14].

Chen L. et al. (2021) – досліджено комбінацію цементу з фосфатами для стабілізації Pb у золі ТПВ. Зроблено висновки, що Mg^{2+} -системи ($MgHPO_4$, $MgCl_2$) підсилюють іммобілізацію Pb через утворення нерозчинних солей, зменшення лужності сприяє фіксації металів. Релевантність: $MgCl_2$ (бішофіт) може бути ефективним компонентом для зв'язування важких металів у шарах рекультивативі [3].

У публікації Fan C. et al. (2018) проведено огляд методів S/S (stabilization/solidification) для золи спалювання ТПВ, зроблено наступні висновки: Mg-біндери (МОС, Mg-фосфатні цементи) показують високу ефективність іммобілізації Pb, Zn, Cd; $MgCl_2$ використовується як ключовий реагент у МОС-цементях. Релевантність: підтверджує наукову основу використання бішофіту в технологіях S/S для зольних матеріалів [2].

Bernasconi D. et al. (2023) – дослідження реактивності золи ТПВ у магній-калій-фосфатному цементі (МКРС), висновки: Mg^{2+} бере участь у формуванні фосфатних гідратів, що фіксують Pb і Cd; $MgCl_2$ як джерело магнію підвищує щільність структури. Отже $MgCl_2$ є активною складовою при формуванні стабільних фосфатних фаз у зольних матрицях [4].

Wang X. et al. (2023) – S/S золи ТПВ за допомогою зв'язувальної системи на основі промислових відходів (включно з Mg-сульфатами/хлоридами). Висновки: Mg-іони нейтралізують надлишкову лужність, підвищуючи адгезію; композитні цементи з $MgCl_2$ демонструють найменший лічінг важких металів. Релевантність: потенційна добавка бішофіту до зольних в'язучих систем [5].

Zhan X. et al. (2018) – спільна стабілізація золи ТПВ та марганцевих залишків. Висновки: Mg-система знижує винос Pb, Zn, Cd у 2–5 разів, а також формуються оксихлоридні фази магнію, що «замикають» метали. Що підтверджує роль $MgCl_2$ як каталізатора іммобілізації важких металів [7].

Nowak V. & Liu J. (2019) – термообробка золи з використанням різних хлоридів ($NaCl$, KCl , $MgCl_2$, $CaCl_2$). Виявлено, що $MgCl_2$ ефективніший для видалення легких металів (Pb, Cd), а при високих температурах формуються стабільні магнієві силікати. Релевантність: $MgCl_2$ корисний у хімічній активації та знесоленні золи перед рекультивативі [11].

Pu L. et al. (2024) – покращення водостійкості магnezіального оксихлоридного цементу (МОС). Висновки: додавання полімерів і зменшення надлишку $MgCl_2$ підвищує стійкість, МОС придатний для стабілізації золи в умовах змінної вологості. Релевантність: удосконалення МОС, у якому бішофіт може бути джерелом $MgCl_2$ [8].

Namada H. M. & Yamamoto T. (2025) – огляд сучасних методів підвищення водостійкості МОС. Висновки: контроль співвідношення $MgO:MgCl_2$ критичний для довговічності і рекомендовано змішування з зольними/шлаковими добавками.

Релевантність: бішофіт як сировинне джерело $MgCl_2$ у стійких МОС-композиціях [12].

Li C. et al. (2025) – модифікація МОС полімером для створення надміцних водостійких матеріалів. Висновки: $MgCl_2$ необхідний для кристалізації міцних фаз $5Mg(OH)_2 \cdot MgCl_2 \cdot 8H_2O$, а отримані композиції можуть використовуватись у гідротехнічних і полігонних шарах. Релевантність: $MgCl_2$ – ключовий функціональний компонент у стійких МОС для рекультивативі [21].

У роботі Vaitkus A. et al. (2023) проведено польовий експеримент у Литві – дорога з нижніми шарами з суміші золи ТПВ. Отримані висновки демонструють, що додавання солей магнію та кальцію зменшує вологопоглинання, а матеріал стає стабільним після циклів заморожування/відтавання. Релевантність: демонструє застосування Mg-компонентів (аналог бішофіту) у дорожніх шарах [22].

Дослідження потенціалу використання золи ТПВ як заповнювача для доріг Vaitkus A. & Sernas O. (2018) доводять, що Mg-добавки зменшують лужність і покращують міцність; матеріали придатні для основи полігонних доріг. Релевантність: підтверджує користь магнієвих солей для стабілізації золи [23].

Dutka V. et al. (2024) – вплив «вистоювання» золи ТПВ на структуру й придатність до повторного використання. Висновки: Mg-мінерали утворюють щільні плівки, що зменшують лічінг Pb, Zn; «старіння» золи за участі $MgCl_2$ покращує її стабільність. Релевантність: $MgCl_2$ сприяє природній стабілізації важких металів у золі перед рекультивативі [24].

У роботі Wang L. et al. (2025) досліджено використання реактивної магnezії (MgO) для активації хлоридів і сульфатів золи ТПВ. Визначено, що Mg^{2+} та Cl^- утворюють стабільні оксихлоридні фази, що фіксують Pb, Zn, Cd, а також зменшується розчинність і рухливість НМ у 5–10 разів. Релевантність: наукове підтвердження принципу використання бішофіту як $MgCl_2$ -реагенту для зв'язування забруднювачів [6].

Дослідження Домнічев М. В. (2017) проведені з метою оцінювання ефективності розчину природного бішофіту для закріплення пилячих поверхонь промислових майданчиків. Визначено, що використання розсолу $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ дозволяє знизити запиленість на 60–80 %; оптимальні концентрації – 10–15 %. Підтверджено ефективність для внутрішніх доріг полігонів і промислових територій [19].

Робота, проведена у Львівському державному університеті безпеки життєдіяльності (2018) сфокусована на розробці рекомендацій щодо використання бішофіту як пилоподавлювача на кар'єрних дорогах. Де показано покращення стану покриття, зменшення викидів пилу, відсутність негативного впливу на рослинність. Що відповідає європейським практикам екологічного пилоподавлення [20].

Бердник В. П., Кравченко О. І. (2019) провели аналіз фізико-хімічних властивостей полтавського бішофіту для промислового використання.

І визначили: вміст Mg^{2+} до 95 г/л, густина розсолу ~ 1280 кг/м³, наявність К, Na, Са, Вг, І. тим самим підтвердили придатність розсолу для технологічних і рекультиваційних потреб [9].

ТОВ «Фірма «Мінерал»» (2020), де безпосередньо видобувають бішофіт оприлюднила паспортні дані та технологічні умови видобутку і використання бішофіту Затуринського родовища. Де зазначено наступне: $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ – до 93–96 %; мінералізація 350–450 г/л; застосування для дорожніх і ґрунтозміцнюючих робіт. Також підтверджує промислову готовність матеріалу до використання у рекультиваційних шарах [10].

Розвиток тематики спостерігається переважно в Азії (Китай, Японія) та Центральній Європі (Польща, Литва), що може слугувати орієнтиром для адаптації технологій в Україні.

В Україні, де розташовані унікальні родовища бішофіту, насамперед Полтавське (Затуринське),

поступово формується власна база прикладних досліджень. Вона охоплює напрями пилоподавлення, дорожнє будівництво, стабілізацію зольних залишків і рекультивацію полігонів, однак поки що знаходиться на етапі наукового обґрунтування та пілотних випробувань.

Українські джерела підтверджують значний потенціал природного бішофіту для застосування у пилоподавленні, зміцненні ґрунтів і формуванні шарів рекультивації. Полтавське родовище забезпечує стабільну сировинну базу з високою чистотою $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ (до 96 %). Рекомендовано розширення досліджень щодо використання бішофіту у складі МОС-в'язучих для стабілізації золи та шлаків полігонів.

Далі наведено результати порівняння міжнародного та українського досвіду застосування бішофіту ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$) у формі таблиці 2.

Таблиця 2

Порівняння міжнародного та українського досвіду застосування бішофіту ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$)

Напрямок застосування	Міжнародний досвід (країни, ключові висновки)	Український досвід (джерела, ключові висновки)
Пилоподавлення на ґрунтових/кар'єрних дорогах, внутрішні дороги полігонів	США, Канада, ЄС: $MgCl_2$ забезпечує стаке зниження пилу до ~ 50 – 80 %; за належного дозування вплив на поверхневі води невеликий; потрібен контроль стоків і узбіч. Польові кейси та регуляторні огляди підтверджують доцільність	Україна (Харків, Львів, промислові майданчики): розчини бішофіту (10–15 %) дають зниження пилу на 60–80 %, покращують стан покриття; рекомендовано локальний моніторинг якості вод і рослинності
Стабілізація/ зв'язування (S/S) золи ТПВ фосфатами та Мгсистемами (МКРС, МОС/MOSC)	Китай, Італія, Японія, міжнародні огляди: Mg^{2+} знижує лужність, утворює фази оксихлоридів/фосфатів, іммобілізуючи Pb, Zn, Cd (зменшення лічінгу у 2–10 разів); полімерні/мінеральні модифікації підвищують водостійкість	Україна: є аналітичні огляди і сировинні дані щодо бішофіту; практичні S/Sкейси з Мгбіндерами публічно висвітлені обмежено; перспективним є пілотне впровадження МОС/МКРС зі золовими/шлаковими потоками на полігонах.
Дорожні шари з MSWI bottom ash (BA) та добавками Мгсолей	Литва, Польща: тестові дороги з ВА; покращення ущільнення, морозостійкості; комбінування з Мг/Саосолями та цементом; контроль вилуговування.	Україна: прямі публічні кейси ВА + $MgCl_2$ у дорожніх шарах не задокументовані; наявні дані підтримують технічну можливість і доцільність пілотів на полігонних дорогах
Термо-/хемообробка золи хлоридними солями (у т.ч. $MgCl_2$) перед S/S/депонуванням	Польща/Китай: $MgCl_2$ ефективний для знесолення/перерозподілу легких металів (Pb, Cd) під час термообробки; формуються більш стабільні магнієві фази	В Україні публічних кейсів мало; потенціал для адаптації технологій на ТЕС/МСWІзолах, потребує лабораторних випробувань і ТЕО
Регуляторні рамки та екооцінки застосування хлоридних реагентів	США (DEP, EPA) та окремі округи ЄС: рекомендації з дозування, моніторингу Cl^- у стоках, управління дренажем; визнання $MgCl_2$ як прийняттого пилоподавлювача за умов контролю	Україна: локальні методрекомендації (ЛДУБЖД), звіти ОВД Полтавської ОДА щодо бішофіту; потреба у стандартизованих настановах для полігонів (دوزи, моніторинг, WAC/EN 12 457 для використаних матеріалів)
Сировинна база та якість реагенту	Міжнародно: комерційні $MgCl_2$ (у т.ч. розчини) з різною часткою домішок; вимоги до паспортів якості.	Полтавське родовище: бішофіт 93–96 % (за паспортами), мінералізація 350–450 г/л; наявні паспорти якості виробника; варіабельність складу між свердловинами вимагає партійного контролю
Рекультиваційні технічні шари (МОСмоноліти, зміцнені ґрунти)	Огляди 2024–2025: МОС/MOSC з оптимізованим співвідношенням $MgO:MgCl_2$ та модифікаторами досягають високої водостійкості; придатні для технічних шарів та S/S	В Україні – на етапі концепту/планування; доцільні пілотні ділянки на полігонах з протоколами лічінгу (EN 12457, монолітні тести), контролем інфільтрату та довговічності

Міжнародні публікації вже демонструють зрілі технології $MgCl_2$ у пилоподавленні та S/S MSWI-зол; українська база підтверджує сировинний потенціал і ефективність пилоподавлення, але потребує розширення публічних пілотів у S/S та дорожніх конструкціях.

Для масштабування в Україні потрібні: (1) паспорти якості бішофіту на рівні партій; (2) типові регламенти застосування на полігонах (доза, дренаж, моніторинг); (3) програма пілотних проєктів із незалежною оцінкою результатів (лічінг, довговічність, економіка).

Головні висновки. Проведений аналіз показав, що природний бішофіт ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$) може бути ефективним реагентом для стабілізації золи та шлаків полігонів, зменшення лужності середовища й іммобілізації важких металів (Pb, Zn, Cd, Cu). За результатами проведеного аналізу міжнародних та вітчизняних публікацій визначено, що магнієві системи, на відміну від традиційних цементних забезпечують екологічно безпечну фіксацію токсичних компонентів у полігонних масивах і, відповідно мають нижчий вуглецевий слід.

Український досвід демонструє готовність до впровадження технологій на основі бішофіту: Полтавське

родовище забезпечує високоякісну сировину (до 96 % $MgCl_2 \cdot 6H_2O$, мінералізація 350–450 г/л).

Використання бішофіту відповідає принципам циркулярної економіки, сприяє ресурсозбереженню та зменшенню екологічного навантаження на довкілля, а також узгоджується з положеннями Національної стратегії управління відходами до 2030 року.

За результатами проведеного аналізу в даній роботі можна виділити перспективні напрями використання результатів дослідження:

- Розробка національних технічних регламентів та методичних рекомендацій щодо використання бішофіту в стабілізаційних і рекультивувальних технологіях.
- Розроблення та впровадження пілотних проєктів на полігонах Полтавської, Харківської та Львівської областей із залученням наукових установ та органів місцевого самоврядування.
- Використання результатів для подальших досліджень у створенні МОС- і МКРС-в'язучих систем з української сировини – як альтернативи цементним матеріалам у низьковуглецевому будівництві.
- Використання даних дослідження у підготовці проєктів міжнародної технічної допомоги (наприклад, Horizon Europe, LIFE) у сфері поводження з відходами та відновлення екосистем.

Література

1. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Національна стратегія управління відходами до 2030 року. Київ, 2023. <https://mepr.gov.ua>
2. Fan C., Zhang J., Zhao Y. Review on cement stabilization/solidification of municipal solid waste incineration fly ash. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018. Vol. 25(36). P. 36415–36433. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3577-8>
3. Chen L., Li X., Xu Q. Treatment of lead in MSWI fly ash by combined cement solidification and phosphate stabilization. *Journal of Environmental Management*. 2021. Vol. 293. P. 112865. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112865>
4. Bernasconi D., Pera G., Franchi M. Reactivity of MSWI fly ash in magnesium potassium phosphate cement (МКРС). *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 387. P. 131744. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131744>
5. Wang X., Li Y., Zhang W., & Chen L. Study on mechanism of MSWI fly ash solidified by multiple solid waste-based cementitious material. *Processes*. 2023. Vol. 11(8). P. 2311. <https://doi.org/10.3390/pr11082311>
6. Wang L., Jiang Y., Li H. Introducing reactive magnesia to activate chloride/sulfate in MSWI fly ash for immobilization of Pb, Zn, Cd. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2025. Vol. 13(7). P. 3510–3522. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.4c08763>
7. Zhan X., Li Y., Zhang W. Co-disposal of MSWI fly ash and electrolytic manganese residue: Heavy metal immobilization and leaching behavior. *Waste Management*. 2018. Vol. 78. P. 583–592. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.06.012>
8. Pu L., Wang D., Li F. Enhancing water resistance of magnesium oxychloride cement (МОС). *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 415. P. 133104. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.133104>
9. Бердник В. П., Кравченко О. І. Дослідження фізико-хімічних властивостей полтавського бішофіту для промислового використання. Збірник наукових праць Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка. 2019. № 97. С. 45–49.
10. ТОВ «Фірма «Мінерал»». Технічні характеристики природного бішофіту Полтавського родовища. Полтава, 2020. <https://mineral.poltava.ua>
11. Nowak B., Liu J. Thermal treatment of MSWI fly ash: Influence of chloride type ($NaCl$, KCl , $MgCl_2$, $CaCl_2$) on heavy metal removal. *Waste Management*. 2019. Vol. 92. P. 106–116. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.05.036>
12. Hamada H. M., Yamamoto T. Research progress on improving the water resistance of magnesium oxychloride cement. *Materials*. 2025. Vol. 18(3). P. 1225. <https://doi.org/10.3390/ma18031225>
13. Goodrich B. A., Koski R. D., Jacobi W. R. Monitoring surface water chemistry near magnesium chloride dust-suppressant-treated roads. *Journal of Environmental Quality*. 2009. Vol. 38(6). P. 2372–2381. <https://doi.org/10.2134/jeq2008.0473>
14. Pennsylvania Department of Environmental Protection. Evaluation of environmental impacts from dust suppressants and road stabilizers. *Bureau of Waterways Engineering and Wetlands*. 2022. <https://files.dep.state.pa.us>
15. Полтавська обласна державна адміністрація. Звіт з оцінки впливу на довкілля: експлуатація свердловин бішофіту (Затуринське родовище). Полтава, 2022. <https://eko.adm-pl.gov.ua>
16. Полтавська обласна державна адміністрація. «Восьме поле...» (технологічний опис видобування): густина 1270–1290 кг/м³. Електронний ресурс. Доступ: https://eko.adm-pl.gov.ua/Zor_Polt_37_new.pdf
17. ДУ «Укрпрофздравниця». Природні лікувальні ресурси: довідник користувача (розділ про бішофіт; до ~95 г/л Mg). Електронний ресурс. Доступ: https://kurort.gov.ua/wp-content/uploads/2016/11/dovidnyk_plr_sajt.pdf

18. United States Geological Survey (USGS). Geology and Undiscovered Resource Assessment of the Phanerozoic Basins of the World: Summary of the Geochemistry and Variability of Evaporite Brines. 2015. Scientific Investigations Report 2010–5090–BB. Електронний ресурс. Доступ: <https://pubs.usgs.gov/sir/2010/5090/bb/sir20105090bb.pdf>
19. Домнічев М. В. Обґрунтування використання розчину природного бішофіту для закріплення пилячих поверхонь промислових майданчиків. Харків: НТУ «ХП», 2017. 120 с.
20. ЛДУБЖД (Львівський державний університет безпеки життєдіяльності). Розробка рекомендацій з використання бішофіту як пилоподавлювача при експлуатації кар'єрних доріг. Львів, 2018. 45 с.
21. Li C., Zhang L., Zhao X. Створення надміцних водостійких композитів на основі МОС: роль полімерної модифікації. *Cement and Concrete Composites*. 2025. Vol. 155. P. 106911. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2025.106911>
22. Vaitkus A., Skulteckė J., Sernas O. Польові дослідження застосування MSWI bottom ash як заповнювача в незв'язних шарах дорожнього одягу. *Buildings*. 2023. Vol. 13(5). P. 1173. <https://doi.org/10.3390/buildings13051173>
23. Vaitkus A., Sernas O. Потенціал золи після спалювання ТПВ для використання як заповнювача в дорожніх матеріалах. *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. 2018. Vol. 13(4). P. 420–431. <https://doi.org/10.7250/bjrbe.2018-13.420>
24. Dutka B., Smol M., Kulczycka J. Структурні й текстурні характеристики золи після спалювання ТПВ після витримки. *Sustainability*. 2024. Vol. 16(2). P. 789. <https://doi.org/10.3390/su16020789>

Дата першого надходження рукопису до видання: 28.11.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 30.12.2025

Дата публікації: 31.12.2025