

УДК 549:550.4:504.05(477.8)

**Василь Дяків¹, Ельвіра Джумеля², Мирослав Ковальчук³,
Володимир Мокрий⁴, Ігор Петрушка⁵**

¹Львівський національний університет імені Івана Франка,
вул. Грушевського, 4, Львів, Україна, 79005
dyakivw@yahoo.com

<https://orcid.org/0000-0001-8045-4595>

^{2,4,5}Національний університет “Львівська Політехніка”,
вул. Бандери, 12, Львів, Україна, 79000

²<https://orcid.org/0000-0003-3146-8725>

⁴<https://orcid.org/0000-0002-5814-5160>

⁵<https://orcid.org/0000-0003-3344-4196>

³ТЗoB “Інститут гірничо-хімічної промисловості” (“ГІРХІМПРОМ”),
вул. Стрийська, 98, Львів, Україна, 79026

МІНЕРАЛЬНИЙ СКЛАД, ГЕОХІМІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ І ВПЛИВ НА ДОВКІЛЛЯ ВІДВАЛУ ФОСФОГІПСУ НОВОРОЗДІЛЬСЬКОГО ЗАВОДУ СКЛАДНИХ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРИВ (ЛЬВІВСЬКА ОБЛ.)

Фосфогіпс Новороздільського заводу складних мінеральних добрив – типове техногенне мінеральне новоутворення, побічний продукт виробництва мінеральних добрив, який утворюється в процесі отримання фосфорної кислоти внаслідок хімічної взаємодії фосфоровмісних руд (апатитового чи фосфоритового концентрату) з сірчаною кислотою. У мінеральному складі фосфогіпсу домінують сульфати кальцію з різним вмістом кристалізаційної води – гіпс (85–95 %) і басаніт (5–10 %), до 2–3 % становить нерозчинений апатит, також є слідові кількості мінералів, які первинно були в апатитовому концентраті.

Відвал фосфогіпсу є джерелом формування кислих інфільтратів, які в процесі стікання в рудничний канал суттєво погіршують якість води в ньому. Води висомінералізовані, з підвищеним вмістом сульфатів, фосфатів і фтору. Інфільтрація атмосферних опадів з відвалу фосфогіпсу в дренажну траншею й оз. Центральне (Кисле), а звідти – у рудничний канал призводить до зниження якості води й у разі несприятливих метеорологічних умов може бути причиною забруднення транскордонної річки Дністер. Для запобігання потенційному забрудненню рекомендовано облаштувати каскад фільтрувальних дамб із місцевих карбонатних матеріалів.

Ключові слова: фосфогіпс, техногенне мінералоутворення, апатит, кислі інфільтрати, забруднення, охорона довкілля, Дністер.

Стан проблеми. Екологічна ситуація в зоні впливу Роздільського ДГХП “Сірка” і Новороздільського заводу складних мінеральних добрив у м. Новий Розділ зумовлена специфічним поєднанням природних, інженерних і соціально-економічних чинників [2, 10]. Після припинення видобутку сірки за умов, коли нема сировини, значних енерговитрат і неконкурентоспроможності 1995 р. завод припинив роботу. Його діяльність приводила до побічного утворення значних об’ємів специфічних промислових відходів – фосфогіпсу й кислих вод – продуктів хімічної реакції між апатитовим концентратом і сірчаною кислотою. За два десятки років нагромаджено 4,5 млн т фосфогіпсу, а також кислі мінералізовані води у відстійнику, об’єм яких постійно зростає завдяки надходженню інфільтратів в озеро-відстійник кислих вод [2].

Припинення використання вод оз. Центральне як відстійника оборотних вод заводу складних мінеральних добрив і постійне акумулювання інфільтрату спричинило низку екологічних проблем. Зокрема, наслідком перепоповнення озера є поверхневий стік забруднених вод у русло транскордонної річки Дністер, яка протікає на відстані 2 км від озера [7].

Саме цим зумовлена **актуальність** пропонованої праці. Крім того, нині саме якість водних ресурсів, а не їхня кількість, є обмежувальним чинником водокористування. Для ефективного дослідження потенційного впливу на довкілля надзвичайно актуальним є вивчення мінерального складу й геохімічних особливостей у процесі як утворення фосфогіпсу, так і тривалого його зберігання.

Виклад основного матеріалу. Новороздільський завод складних мінеральних добрив побудували в межах промислового майданчика Роздільського ДГХП “Сірка” [9] на широких надзаплавних терасах р. Дністер у межиріччі лівих його приток – річок Барвінок і Колодниця (рис. 1). Поряд облаштували місця для зберігання промислових відходів – відвал фосфогіпсу й відстійник кислих вод – нині оз. Центральне (Кисле).

Відкрите й розвідане в повоєнні роки Роздільське сірчане родовище почали розробляти Південним, а згодом – Центральним кар’єром, на відстані 300–400 м від Дністра, де сірчані руди виходили майже на денну поверхню. У 1960-ті роки запаси руд Південного кар’єру, а в 70-ті – Центрального були цілком вичерпані [9]. Виймки, що утворилися на місці обох кар’єрів, частково заклали розкривними породами Північного кар’єру. Решту виробленого простору залишили для облаштування ложа техногенних водойм – збірника інфільтратів з відвалу фосфогіпсу та гідровідвалу № 4; після розмивання перемички вони стали єдиним озером, яке назвали Центральним (рис. 2).

Перед відсипанням територію, відведену під відвал, разом з огорожувальною дамбою екранували шаром глини завтовшки 1 м і додатково – поліетиленовою плівкою. На плівку поклали захисний шар суглинку (0,7 м) і дренальний шар із прошарків гравію (0,3 м) й піску (0,2 м). Цей дренажний шар повинен був перехоплювати кислі інфільтрати, що їх у період функціонування підприємства направляли на станцію нейтралізації, а після припинення його роботи їх акумулювали у відстійнику – озері Центральному. Відсипання відвалу фосфогіпсу виконували вивозом самоскидами з плануванням поверхні бульдозером у вигляді зрізаного конуса з кутом схилу до 18°. Загалом на відвалі нагромаджено 4,5 млн т фосфогіпсу.

Вихідною сировиною для виробництва добрив на заводі була сірчана кислота (рис. 3), яку отримували з сірчаних руд Роздільського ДГХП “Сірка”, фосфорний (апатитовий) концентрат з Хібінського родовища (Кольський півострів) і, менше, фосфоритовий концентрат із осадових фосфоритів [1].

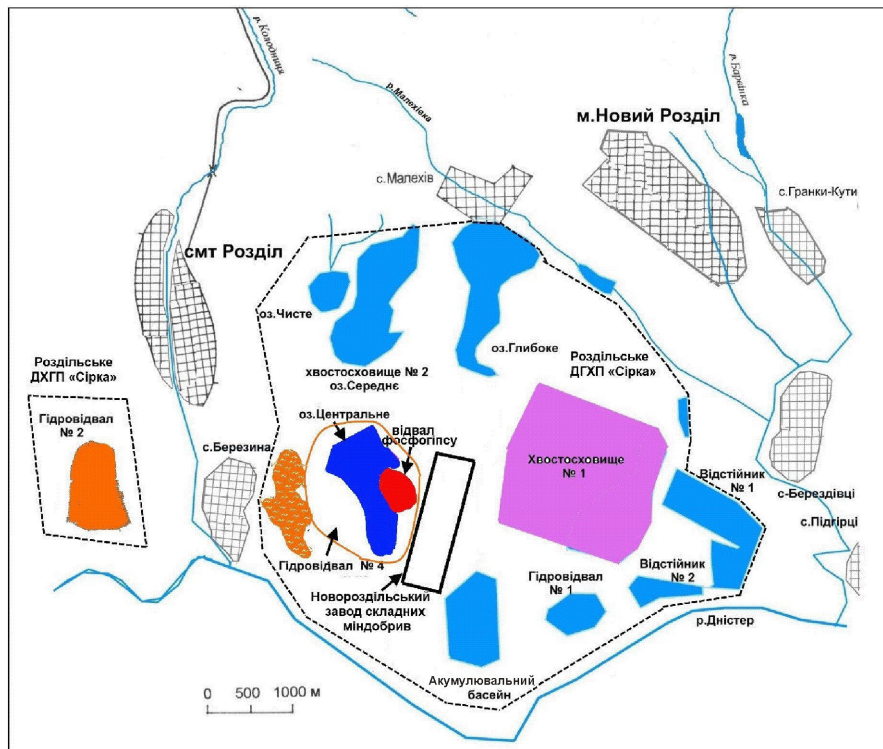
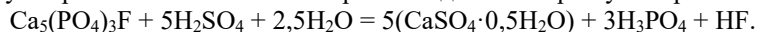


Рис. 1. Принципова схема розташування Новороздільського заводу складних мінеральних добрив, відвалу фосфогіпсу й відстійника кислих вод – оз. Центральне в межах промислового майданчика Роздільського ДГХП «Сірка».

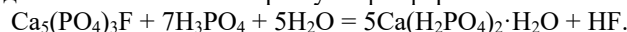
Хібінські апатитові руди з формації нефелінових сієнітів складені флюоро-апатитом з домішками піроксенів, польових шпатів, слюд, титаномагнетиту, нефеліну та ін. Специфічною особливістю такого апатитового концентрату є підвищений вміст фтору.

Найпоширенішим первинним мінералом апатитового концентрату був власне кальцієвий флюоро-апатит $\text{Ca}_5\text{F}[\text{PO}_4]_3$. Склад хімічно чистого мінералу такий, мас. %: P_2O_5 – 42,23, CaO – 55,64, F – 3,77; чистий природний мінерал містить у середньому 40,7 % P_2O_5 і 2,8–3,4 % F . В апатитовому концентраті в незначній кількості наявні нефелін, піроксени, титаномагнетит, ільменіт, титаніт, польові шпати, біотит, евідаліт.

Фосфогіпс є побічним продуктом виробництва мінеральних добрив у процесі отримання фосфорної кислоти внаслідок хімічної взаємодії апатитового чи фосфоритового концентрату з сірчаною кислотою. На першій стадії апатит реагує з сірчаною кислотою:



На другій стадії залишковий апатит реагує з фосфорною кислотою:



Крім апатиту, розкладаються також нефелін та інші мінерали концентрату. Як наслідок – у розчин переходять фосфати заліза, натрію й алюмінію. Плавикова кислота HF розчиняє силікати й переходить у кремнієфторводневу кислоту H_2SiF_6 . Тверді продукти реакції, які складаються, головню, з гіпсу, називають фосфогіпсом.

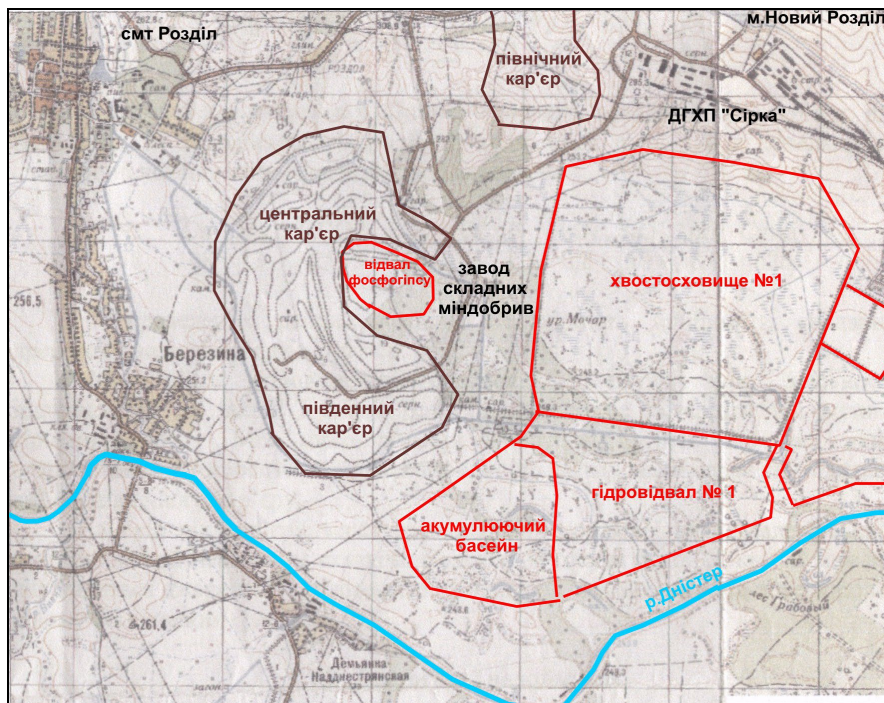


Рис. 2. Топографічна карта лівого берега р. Дністер у районі с. Березина, смт Розділ та м. Новий Розділ (кінець 1950-х років, початкові стадії гірничо-видобувних робіт). Червоними лініями окреслено майбутні об'єкти гірничо-хімічної промисловості (хвостосховища, відвали, басейни, підприємства).



Рис. 3. Цистерни для зберігання сірчаної кислоти.

Отже, фосфогіпс – це техногенне мінеральне новоутворення, яке має специфічний мінеральний склад з домінуванням гіпсу у вигляді безбарвних голчастих і пластинчастих кристалів та мізерною кількістю домішок інших мінералів, що утворюються внаслідок взаємодії сірчаної кислоти з апатитом [3–5]. Формула фосфогіпсу $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{--}2,0\text{H}_2\text{O}$ (вміст PO_4 – до 5 %), молекулярна маса – 172,17, густина – 2,32 г/см³, розчинність у воді становить 0,206 г/100 г. Розрізняють такі морфологічні відміни фосфогіпсу,

як суцільна дрібнозерниста основна маса, мікрокристаліки у вигляді окремих зерен, видовжено-призматичні кристали, голочки і зростки різної форми завдовжки 0,1–0,4 мм (рис. 4).

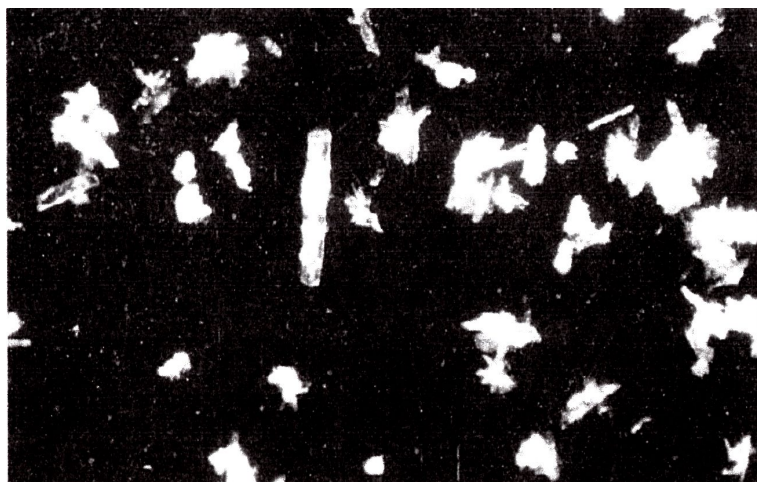


Рис. 4. Морфологічні відміни фосфогіпсу: основна маса (чорне), мікрокристаліки у вигляді окремих зерен, видовжено-призматичні кристали, голочки, зростки різної форми завдовжки 0,1–0,4 мм.

Гранулометричний склад фосфогіпсу наведено в табл. 1 та показано на рис. 5. З них випливає, що більшість частинок має розмір від 0,01 до 0,10 мм. Тому заскладований фосфогіпс швидко злежується і стає щільним. По поверхні відвалу вільно їздять самоскиди. Під навантаженням фосфогіпс ущільнюється практично пропорційно до навантаження й досягає максимальної щільності за тиску 5–6 кг/см².

Однак, на відміну від зв'язаних ґрунтів, фосфогіпс у діапазоні навантажень до 10 кг/см² не виявляє пластичних властивостей. Коефіцієнт фільтрації фосфогіпсу достатньо великий: 0,46–1,40 м/добу, у зоні активного водообміну він зростає внаслідок часткового розчинення фосфогіпсу, а в зоні цементації знижується. Максимальна молекулярна вологоємність становить 15–16 %, гравітаційна водовіддача – 7–8 %.

Таблиця 1

Гранулометричний склад сухого фосфогіпсу

Розмір сит, мм	1,6	1,0	0,63	0,40	0,10	0,05	< 0,05
Залишок, %	0,76	0,35	0,35	0,35	42,90	37,90	22,70

Дифрактограма взірця фосфогіпсу, відібраного з відвалу на глибині 2 м (рис. 6), засвідчує, що в його складі домінує гіпс (90–95 %) – дифракційні максимуми 0,76, 0,43, 0,381, 0,306 нм; наявні релікти апатиту (до 5 %) – 0,26 та 0,27 нм.

За даними санітарної лабораторії Роздільського ДГХП "Сірка" (табл. 2), у хімічному складі фосфогіпсу зафіксовано незначну мінливість вмісту кальцію, сульфатів і кристалізаційної води. Це свідчить про наявність мінералів сульфату кальцію, що містять різну кількість кристалізаційної води, практично постійну наявність водорозчинних і нерозчинних у воді сполук фосфору (перерахованих на P₂O₅). Виявлено оксиди алюмінію й заліза, SiO₂, змінну кількість вільної сірки, оксидів калію й натрію, а також фтор.

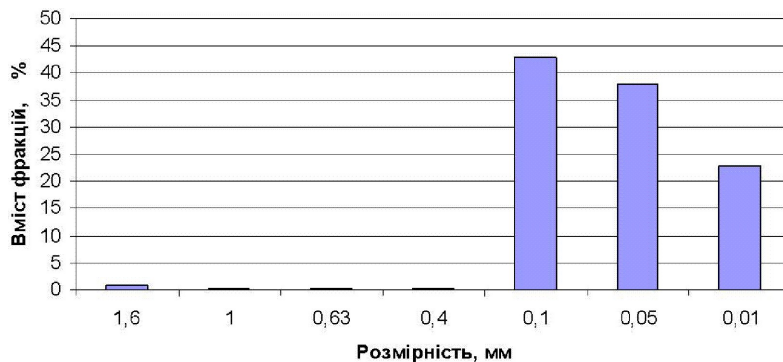


Рис. 5. Гранулометричний склад сухого фосфогіпсу.

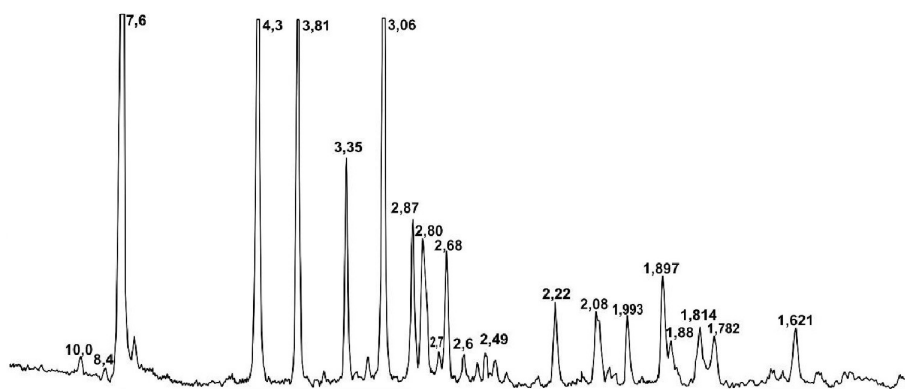


Рис. 6. Дифрактограма фосфогіпсу, відібраного з відвалу на глибині 2 м, Å.

Таблиця 2

Хімічний склад фосфогіпсу Новороздільського заводу складних мінеральних добрив

Компонент	Номер проби				
	1	2	3	4	5
S _{вільн}	0,22	–	–	–	–
P ₂ O _{5заг}	1,56	1,14	1,41	1,67	1,36
P ₂ O _{5розч}	1,20	0,75	0,41	0,70	0,78
CaO	26,10	22,20	25,80	24,10	25,50
K ₂ O	0,12	0,09	0,06	–	–
Na ₂ O	0,34	0,18	0,17	–	–
Fe ₂ O ₃	0,27	0,18	0,37	0,37	–
Al ₂ O ₃	0,68	0,97	0,82	0,56	0,70
SO ₃	55,00	55,10	53,00	53,90	53,8
SiO ₂	0,40	0,10	0,20	0,37	0,17
F	–	–	–	–	0,28
H ₂ O _{крис}	13,60	19,10	17,40	18,30	17,30
Сума	99,49	99,71	99,64	99,97	99,89

За результатами рентгенодифракційного й хімічного аналізу визначено, що у складі фосфогіпсу домінують гіпс (85–95 %) і басаніт $\text{Ca}[\text{SO}_4] \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ (5–10 %), є також 2–3 % нерозчиненого апатиту і сліди мінералів, які були в концентраті, – кварцу, нефеліну, піроксенів, егірину, польових шпатів, біотиту та ін. [6].

Для складування фосфогіпсу на заводі побудовано відкритий склад (відвал) – це була підготовлена територія площею 14,2 га з гідроізолюваною поверхнею, обвалована дамбою заввишки 3 м і облаштована стоком інфільтратів в озеро Центральне (Кисле) (рис. 7). Загальний вигляд відвалу фосфогіпсу в 2005 р., коли він ще не заріс деревною рослинністю, показано на рис. 8.



Рис. 7. Просторове положення відвалу фосфогіпсу щодо озера й заводу складних мінеральних добрив на космоснімку.



Рис. 8. Загальний вигляд відвалу фосфогіпсу (2005 р.).

Спостереження за цим відвалом протягом понад 15 років засвідчили таке. Завдяки фільтраційним властивостям фосфогіпсу, що сприяють нагромадженню води й вимиванню із зони активного водообміну фітотоксичних сполук, особливо на схилах, а також через наявність досить значного вмісту фосфатів поверхня відвалу є фітофільним техногенним субстратом, який активно заростає деревною рослинністю – осикою, обліпихою, менше – березою. У 2021 р. зафіксовано, що схили відвалу фосфогіпсу заросли густим осиково-обліпиховим лісом; висота дерев сягає 10 м, діаметр стовбурів – 10–20 см, а іноді й більше (рис. 9).



Рис. 9. Осиково-обліпиховий ліс на схилі відвалу фосфогіпсу (2021 р.).

Після того, як припинили використовувати (як оборотні) води Центрального відстійника, а інфільтрат постійно нагромаджувався, з'явилася низка екологічних проблем. Зокрема, наслідком переповнення озера став поверхневий стік забруднених вод у русло транскордонної річки Дністер, яка тече на відстані 2 км від технічної водойми.

Для оцінки потенційного впливу кислих інфільтратів на стан Дністра й ризиків забруднення ми виконали опробування вод (рис. 10). Результати хімічного аналізу відібраних проб води наведено в табл. 3. Як бачимо з таблиці, води оз. Центральне (Кисле), у яке стікають інфільтрати з відвалу фосфогіпсу, – це сульфатно-фосфатні натрієво-магнієво-кальцієві води з підвищеним вмістом фтору. Потрапляючи в рудничний канал і змішуючись з водами, що витікають із каскаду озер Чисте, Середнє, Глибоке, такі води можуть бути потенційним джерелом забруднення Дністра. Про це свідчать результати хімічного аналізу води з рудничного каналу (проба 2). Після першого змішування у воді зафіксовано перевищення вмісту нормованих щодо якості води компонентів у два з половиною–три рази.

Перед впадінням у Дністер води рудничного каналу змішуються з чистими водами його правої притоки – дренажного каналу з водозбірної площі геохімічно інертних відвалів розкривних порід, у якому дебіт води в три–чотири рази більший. Тому перед впадінням у Дністер (проба 3) хімічний склад вод загалом відповідає нормативному за сольовим складом і основними забруднювачами, однак тут зафіксовано дещо вищий вміст окремих компонентів, ніж у воді Дністра.

Водночас наявні суттєві екологічні ризики погіршення якості вод рудничного каналу і, як наслідок, – забруднення Дністра у випадку тривалої посухи чи зменшення дебету дренажного каналу.

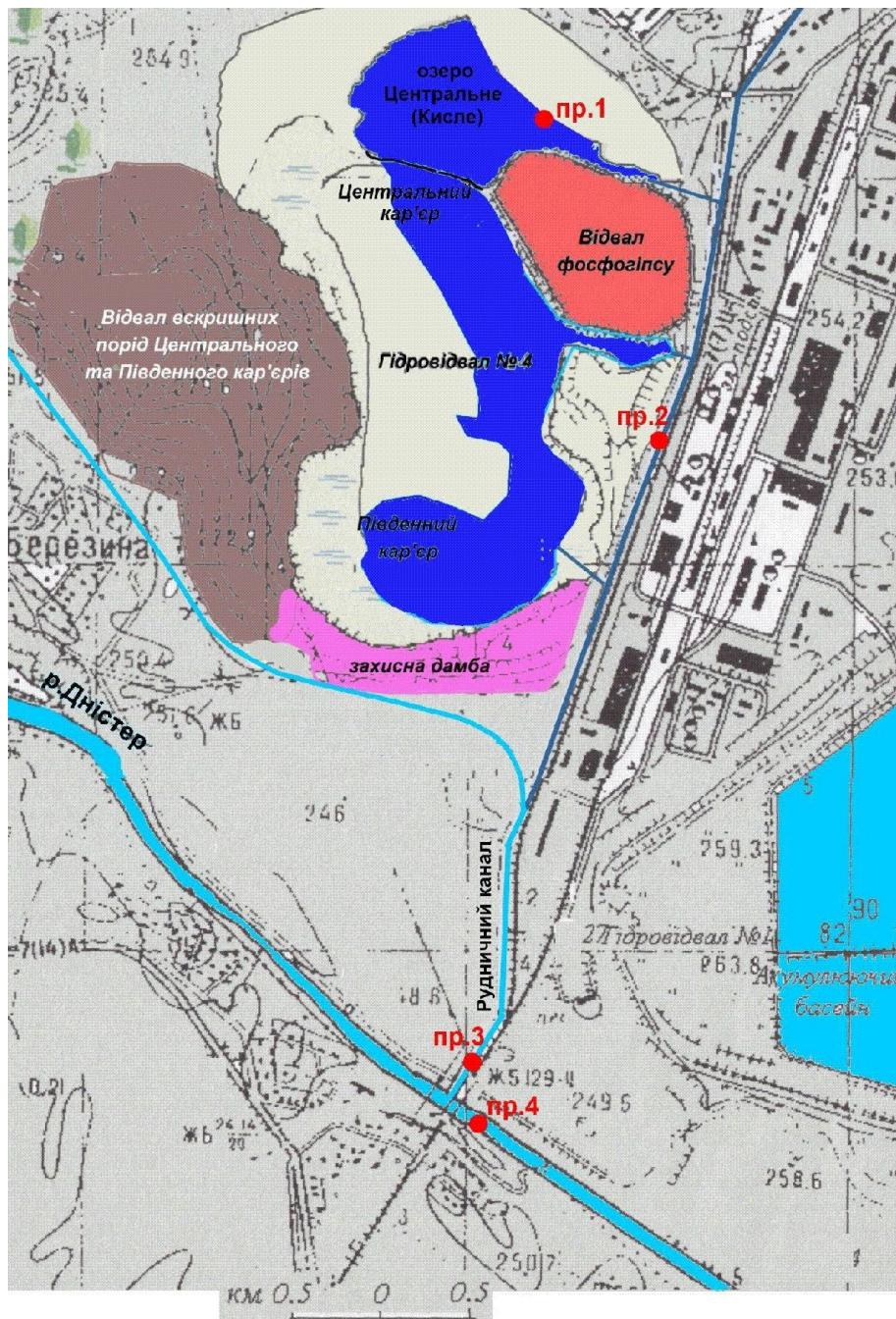


Рис. 10. Карта-схема відбору проб води в зоні впливу відвалу фосфогіпсу і відстійника кислих інфільтратів на екологічний стан Дністра.

Таблиця 3

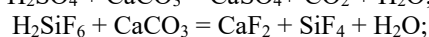
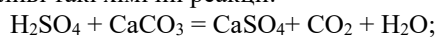
Результати хімічного аналізу проб води, відібраних у зоні впливу відвалу фосфогіпсу й відстійника кислих інфільтратів, мг/дм³

Компонент	Номер проби*			
	1	2	3	4
HCO ₃ ⁻	48,8	144,0	329,5	329,5
Ca ²⁺	100,2	454,9	130,3	122,2
Mg ²⁺	200,1	54,7	48,6	53,5
Cl ⁻	99,1	99,1	24,1	47,4
SO ₄ ²⁻	1 063,1	1 371,3	140,6	84,9
Na	165,0	162,0	130,0	61,0
K	41,0	17,0	8,2	20,3
NO ₃	7,7	5,9	19,5	19,5
NO ₂	0,052	0,044	0,140	0,140
P ₂ O ₅	721,4	9,2	6,4	6,1
PO ₄	482,6	6,2	4,3	4,1
NH ₄	1,8	2,2	1,4	1,4
F	0,60	0,46	0,10	0,05
Мінералізація	2 931,6	2 327,2	843,5	750,5
Сухий залишок	2 670	2 340	430	360
pH	5,15	6,90	8,20	8,10
ХСК	12,0	8,0	4,0	4,0
Fe _{заг}	0,185	0,180	0,425	0,425
Fe ²⁺	0,065	0,040	0,025	0,050
Fe ³⁺	0,250	0,220	0,400	0,375
Електропровідність, мСм	2,47	2,46	0,78	0,74
Впп	1,22	1,28	0,39	0,38
Твердість загальна, мг-екв/л	20,0	27,2	10,5	10,5
Запах	Немає			
Колір	Вода прозора			
Зміни в процесі стояння	Немає			

*1 – оз. Центральне (Кисле); 2 – рудничний канал, 500 м від відвалу фосфогіпсу та 1 500 м від р. Дністер; 3 – рудничний канал перед скидом у Дністер; 4 – р. Дністер, 50 м нижче від скиду рудничного каналу.

Щоб мінімізувати негативний вплив на довкілля відвалу фосфогіпсу, потрібно в найкоротший термін розробити й реалізувати проєкт, який дасть змогу зменшити ризики негативного впливу. Ідеться про облаштування каскаду фільтрувальних дамб, які б запобігали потраплянню кислих вод з центрального відстійника в рудничний канал і Дністер. Принципову схему каскаду фільтрувальних дамб показано на рис. 11.

Дамби доцільно будувати з карбонатних матеріалів – скельних ратинських і мелених сірковмісних вапняків. Карбонатні відходи, які можна використати для облаштування дамб, мають здатність до нейтралізації кислих вод, їм притаманна висока водопроникність (для відсіпання дренажних шарів) і наявність сірки, що зумовлює зв'язування важких металів у нерозчинні сполуки [8]. У разі взаємодії карбонатів з кислими інфільтратами теоретично можливі такі хімічні реакції:



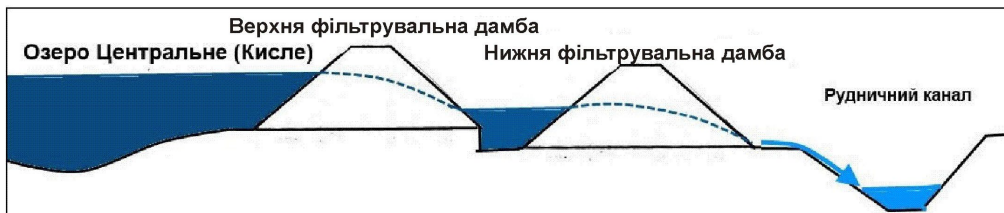
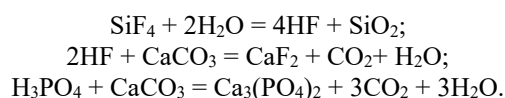


Рис. 11. Принципова схема пропонуваного каскаду фільтрувальних дамб.



Продукти реакцій – фосфати кальцію і фторид кальцію (флюорит) слабо розчиняються у воді, що сприяє її очищенню від фтору й фосфору. Крім того, продукти реакції зв'язують воду, яка входить у кристалічну ґратку опалу, гіпсу й дифосфату кальцію $\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$. Формування гідратів зумовлює зменшення вологості суміші фосфогіпсу з хвостами флотажі, порівняно з початковою.

На наш погляд, реалізація запропонованого проекту дасть змогу мінімізувати чи взагалі усунути ризики погіршення якості транскордонної річки Дністер у разі несприятливих метеорологічних умов за наявності постійного джерела забруднення та відновити порушену господарською діяльністю екологічну рівновагу.

Висновки. Фосфогіпс Новороздільського заводу складних мінеральних добрив є типовим техногенним мінеральним новоутворенням – побічним продуктом виробництва мінеральних добрив. Нині завод не працює, однак на його території нагромаджено 4,5 млн т фосфогіпсу, а також кислі мінералізовані води в озері-відстійнику.

У мінеральному складі фосфогіпсу домінують гіпс (85–95 %) і басаніт (5–10 %), наявні також нерозчинений апатит (до 2–3 %) і слідові кількості мінералів, які первинно були в апатитовому концентраті (кварц, нефелін, піроксени, егірин, польові шпати, біотит та ін.).

Завдяки фільтраційним властивостям фосфогіпсу, які сприяють нагромадженню води й вимиванню із зони активного водообміну фітотоксичних сполук, а також наявності значної кількості фосфатів поверхня фосфогіпсового відвалу є фітофільним техногенним субстратом, який активно заростає деревною рослинністю. Нині на схилах відвалу росте густий осиково-обліпиховий ліс.

У процесі інфільтрації атмосферних опадів крізь товщу відвалу фосфогіпсу утворюються кислі інфільтрати, які нагромаджуються в оз. Центральне (Кисле). За хімічним складом це сульфатно-фосфатні натрієво-магнієво-кальцієві води з підвищеним вмістом фтору й мінералізацією $2\,931,6 \text{ мг/дм}^3$.

Припинення використання вод озера як відстійника оборотних вод заводу і постійне акумулювання інфільтрату зумовило низку екологічних проблем. Кислі інфільтрати стікають у рудничний канал і суттєво погіршують якість води в ньому. Тільки завдяки розведенню інфільтратів чистими водами дренажного каналу (з дебітом у три–чотири рази більшим) перед впадінням у транскордонну р. Дністер гідрохімічний склад вод відповідає нормативним значенням за сольовим складом та основними забруднювачами. Передбачають погіршення якості вод рудничного каналу і, як наслідок, забруднення Дністра в разі тривалої посухи або зменшення дебету дренажного каналу.

Для мінімізації негативного впливу на довкілля відвалу фосфогіпсу запропоновано проєкт будівництва каскаду фільтрувальних дамб з місцевих карбонатних матеріалів. Вапняки мають здатність до нейтралізації кислих вод, вони висоководопроникні й містять сірку, що зумовлює зв'язування важких металів у нерозчинні сполуки. Унаслідок взаємодії карбонатів з кислими інфільтратами утворюються малорозчинні в воді фосфати кальцію і фторид кальцію, що сприяє очищенню води від F й P, а новоутворені гідрати зумовлюють зменшення вологості суміші фосфогіпсу з хвостами флотації. Пропонований підхід дасть змогу контролювати постійне джерело забруднення й відновити порушену господарською діяльністю екологічну рівновагу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бахішев, Г. Н. (2006). Фосфогіпс як екологічний чинник створення соціальних проблем. *Безпека життєдіяльності*, 2, 30–32.
2. Гайдін, А. М., Дяків, В. О., Зозуля, І. І. (2017). Відходи Роздільського ДГХП “Сірка”: вплив на стан довкілля та оцінка потенціалу як перспективних техногенних родовищ. У кн. *Матеріали Четвертої міжнар. наук.-практ. конф. “Надрокористування в Україні. Перспективи інвестування”*, т. 2. Київ: ДКЗ, 170–177.
3. ДСТУ Б В.2.7-1-93. Фосфогіпс рядовий. Технічні умови. (1993).
4. ДСТУ Б В.2.7-2-93. Фосфогіпс кондиційний для виробництва гіпсового в’язучого та штучного гіпсового каменя. Технічні умови. (1993).
5. ДСТУ Б В.2.7-3-93. Камінь гіпсовий штучний із фосфогіпсу. Технічні умови. (1993).
6. Жантасов, К. Т., Зият, А. Ж., Лавров, Б. А., Жантасов, М. К. (2021). Минералогический и химический состав фосфогипса – отхода производства экстракционной фосфорной кислоты. *Scientific Heritage*, 78, 24–29.
7. Жарких, М. І. (ред.). (1998). *Дослідження Дністра : 10 років громадської екологічної експедиції “Дністер”*. Київ: Політична думка.
8. Івасик, Я. (1997). *Технології попередження забруднення довкілля*. Львів.
9. Кутепов, В. М., Цюрупа, П. В. (1969). Инженерно-геологическая карта Роздольского месторождения. В кн. *Геология месторождений серы*. Москва: Недра, 158–167.
10. Стахів, Т. М. (1997). *Карта розміщення джерел забруднення поверхневих і підземних вод Львівської області. Масштаб 1:200 000*. Львів.

REFERENCES

1. Bakhishev, H. N. (2006). Phosphogypsum as an environmental factor in creating social problems. *Life Safety*, 2, 30–32. (in Ukrainian)
2. Haidin, A. M., Diakiv, V. O., & Zozulia, I. I. (2017). Wastes of Rozdil SMCE “Sirka”: impact on the environment and assessment of potential as promising man-made deposits. In *Materials of the 4th Intern. scientific-practical conf. “Subsoil Use in Ukraine. Investment Prospects”*, vol. 2. Kyiv: State Commission of Ukraine for Mineral Resources, 170–172. (in Ukrainian)
3. State standard of Ukraine Б В.2.7-1-93. Phosphogypsum ordinary. Specifications. (1993). (in Ukrainian)
4. State standard of Ukraine Б В.2.7-2-93. Conditional phosphogypsum for the production of gypsum binder and artificial gypsum stone. Specifications. (1993). (in Ukrainian)

5. State standard of Ukraine Б В.2.7-3-93. Artificial gypsum stone from phosphogypsum. Specifications. (1993). (in Ukrainian)
6. Zhantasov, K. T., Ziat, A. Zh., Lavrov, B. A., & Zhantasov, M. K. (2021). Mineralogical and chemical composition of phosphogypsum – a waste product of extraction phosphoric acid. *Scientific Heritage*, 78, 24–29. (in russian)
7. Zharkyh, M. I. (Ed.). (1998). *Research of the Dniester: 10 years of the public ecological expedition "Dniester"*. Kyiv: Political Thought. (in Ukrainian)
8. Ivasyk, Ya. (1997). *Technologies for pollution prevention*. Lviv. (in Ukrainian)
9. Kutepov, V. M., & Tsiurupa, P. V. (1969). Engineering-geological map of the Rozdol deposit. In *Geology of sulphur deposits*. Moscow: Nedra, 158–167. (in russian)
10. Stakhiv, T. M. (1997). Map of location of surface and groundwater pollution sources in Lviv region. Scale 1: 200,000. Lviv. (in Ukrainian)

Стаття: надійшла до редакції 02.06.2022
прийнята до друку 29.08.2022

**Vasyl Diakiv¹, Elvira Dzhumelia², Myroslav Kovalchuk³,
Volodymyr Mokryi², Ihor Petrushka²**

¹Ivan Franko National University of Lviv,
4, Hrushevskoho St., Lviv, Ukraine, 79005,
dyakivw@yahoo.com

²Lviv Polytechnic National University,
12, Bandery St., Lviv, Ukraine, 79000

³LLC "Institute of Mining and Chemical Industry" ("GIRHIMPROM"),
98, Stryiska St., Lviv, Ukraine, 79026

**MINERAL COMPOSITION, GEOCHEMICAL FEATURES
AND ENVIRONMENTAL IMPACT OF THE PHOSPHOGYPSUM
DUMP (NOVOROZDILSKYI PLANT OF COMPLEX MINERAL
FERTILIZERS, LVIV REGION)**

Phosphogypsum of Novorozdilsky Plant of Complex Mineral Fertilizers (Lviv region) is a typical artificial neogenic mineral formation, solid waste by-product generated when sulphuric acid reacts with the phosphorus-containing ores (apatite or phosphorite concentrates) during manufacturing of phosphoric acid.

The raw materials for fertilizer production at the plant were sulphuric acid, which was obtained from the sulphur ores of Rozdilske SMCE "Sirka", apatite concentrate from the Khibiny deposit (Kola Peninsula) and, to a lesser extent, phosphorite concentrate from sedimentary phosphorites. The plant has not been operating since 1995, but 4.5 million tons of phosphogypsum and also acidic mineralized water in the settling lake have accumulated on its territory since then.

Gypsum (85–95 %) and bassanite (5–10 %) dominate in the mineral composition of phosphogypsum, there are also undissolved apatite (up to 2–3 %) and trace amounts of minerals that were originally in apatite concentrate (quartz, nepheline, pyroxene, aegirine, feldspar, biotite, etc.).

The surface of the phosphogypsum heap is a phytophilous man-made substrate that is actively overgrown with woody vegetation. This is due to the filtration properties of phosphogypsum

(they promote water accumulation and leaching of phytotoxic compounds from the zone of active water exchange) and the presence of a significant amount of phosphates. Currently, a dense aspen-sea buckthorn forest grows on the slopes of the dump.

Acidic infiltrates are formed in the process of infiltration of precipitation through the thickness of the phosphogypsum dump, they are accumulated in the settling lake (Central/Acid Lake). In terms of chemical composition, it is sulphate-phosphate sodium-magnesium-calcium water with high fluorine content and mineralization of 2931.6 mg/dm³.

The cessation of the use of the lake (as a settling tank for the plant's circulating waters) and the constant accumulation of infiltrate have led to a number of environmental problems. Acidic infiltrates flow into the mine canal and significantly impair the quality of water in it. Only due to the dilution of infiltrates with clean water of the drainage channel (with a flow rate of three to four times higher) before flowing into the transboundary Dniester River hydrochemical composition of water meets the normative values of salt composition and content of major pollutants.

Deterioration of the water quality of the mine canal and, as a consequence, pollution of the Dniester in case of prolonged drought or reduction of the debit of the drainage canal are envisaged. To minimize the negative impact of the phosphogypsum dump on the environment, a project to build a cascade of filter dams from local carbonate materials has been proposed. Limestones have the ability to neutralize acidic waters; they are highly permeable and contain sulphur, which causes the binding of heavy metals to insoluble compounds. Due to the interaction of carbonates with acidic infiltrates, water-insoluble calcium phosphates and calcium fluoride (fluorite) are formed, which helps to purify water from F and P, and newly formed hydrates reduce the moisture content of the phosphogypsum mixture with flotation tails.

The proposed approach will make it possible to control a constant source of pollution and restore the ecological balance disturbed by economic activities.

Key words: phosphogypsum, technogenic mineral formation, apatite, acid infiltrates, pollution, environmental protection, Dniester.