

© К.М. Колчев¹¹ Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ГІРНИЧОПРОМИСЛОВІ ВІДХОДИ ЯК ОСНОВА ФОРМУВАННЯ ТЕХНОГЕННИХ МІНЕРАЛІВ

© К. Kolchev¹¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

MINING WASTE AS A BASE FOR THE FORMATION OF TECHNOGENIC MINERALS

Мета. На основі відкритих джерел інформації виконати огляд сучасного стану та складування відходів видобутку, первинної (збагачення) та вторинної переробки мінеральної сировини. Надати діючу систему існування та перетворення гірничопромислових відходів стосовно розряду перспективних розробок, як основи для формування та дослідження мінералого-геохімічних особливостей освіти або процесу утворення техногенних мінералів. Передбачити варіацію геолого-економічної оцінки масиву як новоствореного родовища

Методика. В роботі використано загальнонаукові методи дослідження – емпіричні та теоретичні (аналіз, узагальнення, пояснення).

Результати. Проведено попередній огляд існуючих типів гірничопромислових відходів промислових галузей, де здійснюється видобуток і первинна (збагачення) та вторинна переробка мінеральної сировини, як основи сучасного мінералоутворення техногенних (технічних) мінералів. Надана загальна сучасна структурна схема системи мінеральної сировини та гірничопромислових відходів.

Наукова новизна. Розкрито потенціал існування техногенних мінералів. Показано, що на даний час техногенна сировина – це конкурентоспроможний, перспективний мінеральний ресурс, використання якого за інноваційними технологіями забезпечує не лише значний техніко-економічний ефект, але і попутно, досягається екологічний ефект як природний наслідок нового рівня вимог сучасного виробництва. Крім того, це дозволяє знизити негативний вплив на довкілля, зменшити площі відчужуваних земель для потреб гірничодобувного виробництва, а також частково вирішує завдання ресурсозбереження.

Практична значимість. Результат огляду може бути використаний для планування та здійснення подальшого науково-методологічного дослідження мінералого-геохімічних особливостей відходів видобутку і первинної (збагачення) та вторинної переробки корисних копалин, гіпергенних процесів, які протікають у техногенних масивах, розширення та поглиблення мінералогічних досліджень у галузі екологічної мінералогії у зв'язці з технологічною мінералогією.

Ключові слова: гірничопромислові відходи, техногенні мінерали, гіпергенні процеси.

Вступ. Виробнича діяльність, пов'язана з експлуатацією природних мінеральних ресурсів підприємствами різних галузей промисловості, призвела до неминучого утворення та накопичення сотень мільйонів тон відходів цих видів економічної діяльності. Ця ситуація характерна не тільки для України, але і для багатьох країн світу [1].

Сформовано значну кількість мінеральних утворень, дуже різноманітних за походженням, за галузевою належністю, за тривалістю зберігання, за обсягами накопичення і за запасами цінних компонентів, що в них містяться. Запаси цінних компонентів у цих мінеральних освітах не оцінені, і частково не виявлено [2].

Гірничопромислові відходи є цінною техногенною сировиною для промисловості [3, 4], які, як правило, характеризується складним хімічним, мінералогічним і петрографічним складом, оскільки в процесі тривалого зберігання у відвалах, хвостових та шламосховищах відбуваються гіпергенні перетворення, в результаті яких склад компонентів змінюється, утворюються техногенні мінерали [4].

Система сировина і гірничопромислові відходи. Мінеральна сировина та гірничопромислові відходи становлять єдину природно-господарську систему. Виділяють мінеральну сировину для галузей, що належать до розряду гірничодобувних: паливно-енергетична і хімічна, для чорної та кольоровій металургії, гірничо-хімічна сировина, для технологічного та будівельного виробництва.

Для кожного типу мінеральної сировини визначено відповідні гірничопромислові відходи (рис. 1–6). Загальний поділ гірничопромислових відходів передбачає їх розташування у сховищах відходів видобутку та відходів переробки корисних копалин.

Сховища відрізняються тим, що їх гірська складова маса має різний мінералогічний та гранулометричний склад.

Відходи видобутку являють собою, як правило, розкривні та вміщуючі породи. У гранулометричному складі маси порід переважають фракції, крупність яких становить десятки сантиметрів. Вміст корисних компонентів у них низький.

Відходи первинної (збагачення) та вторинної переробки корисних копалин виражені частинками, крупність яких коливається від міліметра до кількох міліметрів. Оскільки вони утворюються в результаті переділу мінеральної маси, вони можуть включати корисні побічні компоненти.

За морфологічними ознаками гірничопромислові відходи поділяються на два типи:

1) насипні техногенні ресурси, що являють собою відвали та терикони, до них відносяться:

- терикони вугільних шахт та відвали вугільних розрізів;
- відвали рудників та кар'єрів руд кольорових, чорних та рідкісних металів, складені дезінтегрованими розкривними та вміщувальними породами та позабалансовими рудами;
- техногенні розсипи, що утворюються при розробці розсипних родовищ та з відходів золоторудних збагачувальних фабрик;
- шлаковідвали кольорової та чорної металургії;

2) наливні техногенні ресурси, що утворюються під час заповнення западин земної поверхні, до них відносяться:

- відходи збагачення руд (шламо- та хвостосховища гірничозбагачувальних фабрик);
- шламовідвали кольорової та чорної металургії;
- золо- та шламовідвали енергетичного комплексу, що виникають при гідравлічному видаленні золи та шлаків з теплоелектростанцій;
- шламовідвали хімічного виробництва.



Рис. 1. Структурна схема системи «Паливо-енергетична і хімічна сировина – гірничопромислові відходи»

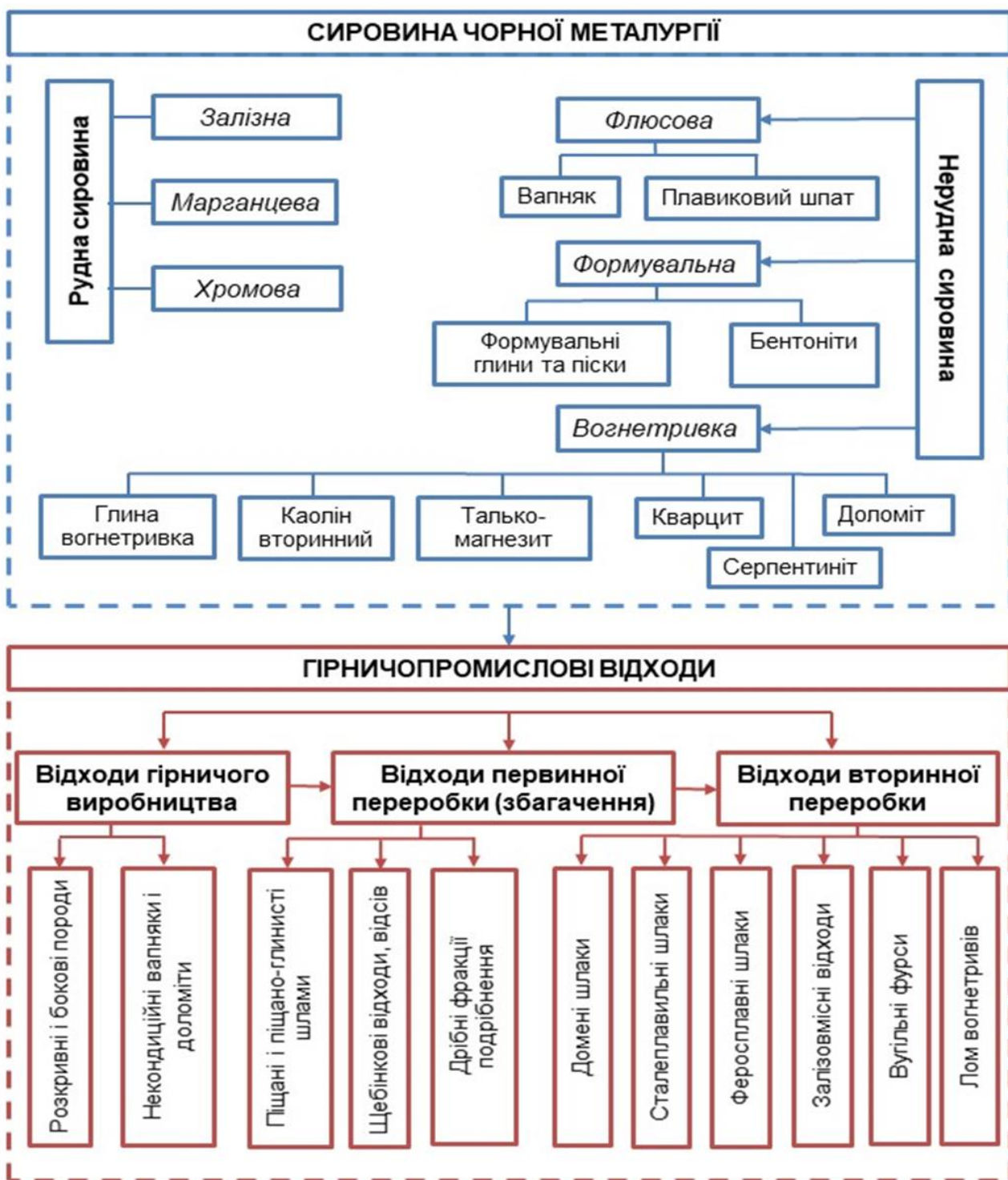


Рис. 2. Структурна схема системи «Сировина чорної металургії – гірничопромислові відходи»

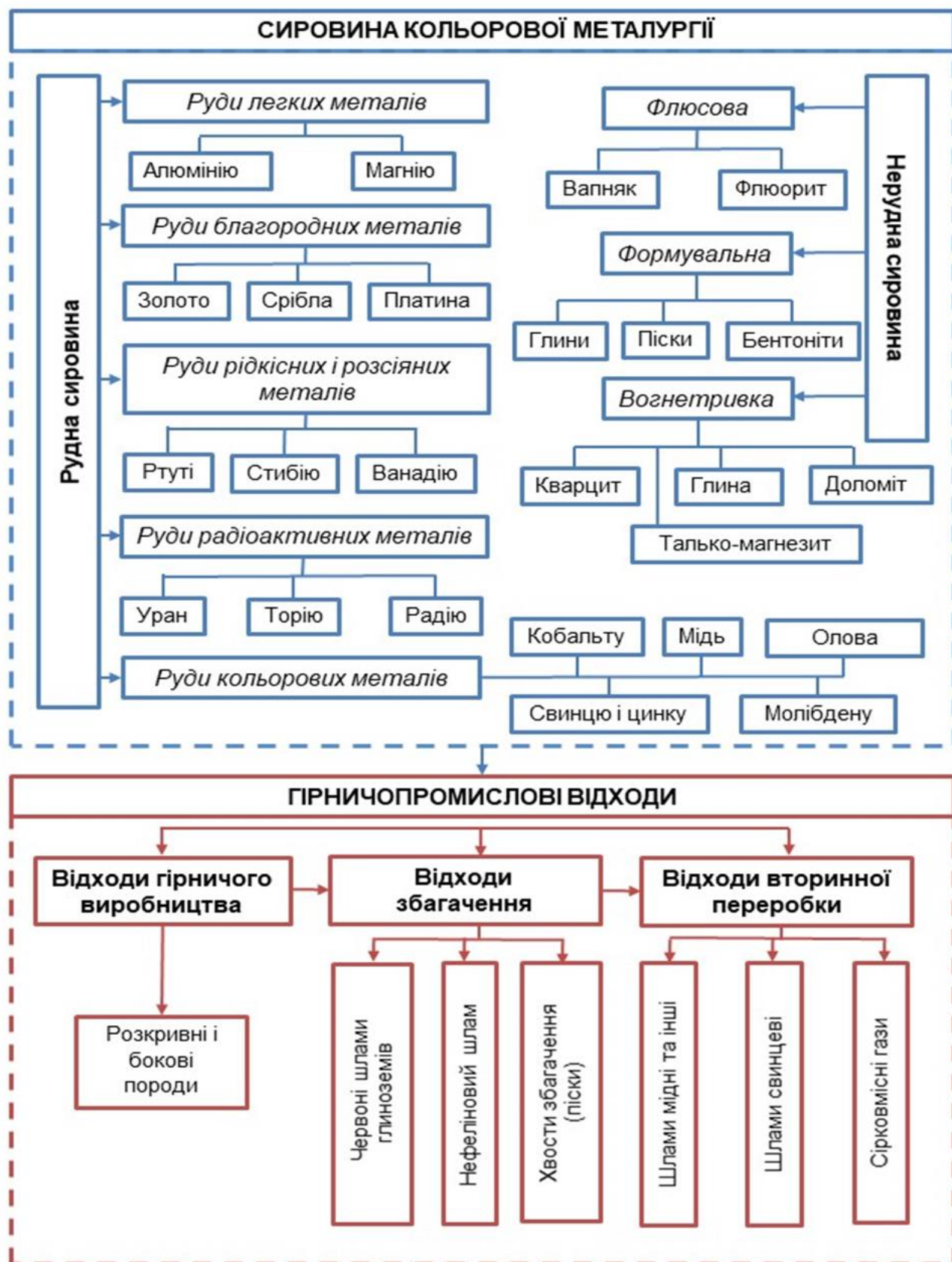


Рис. 3. Структурна схема системи «Сировина кольорової металургії – гірничопромислові відходи»

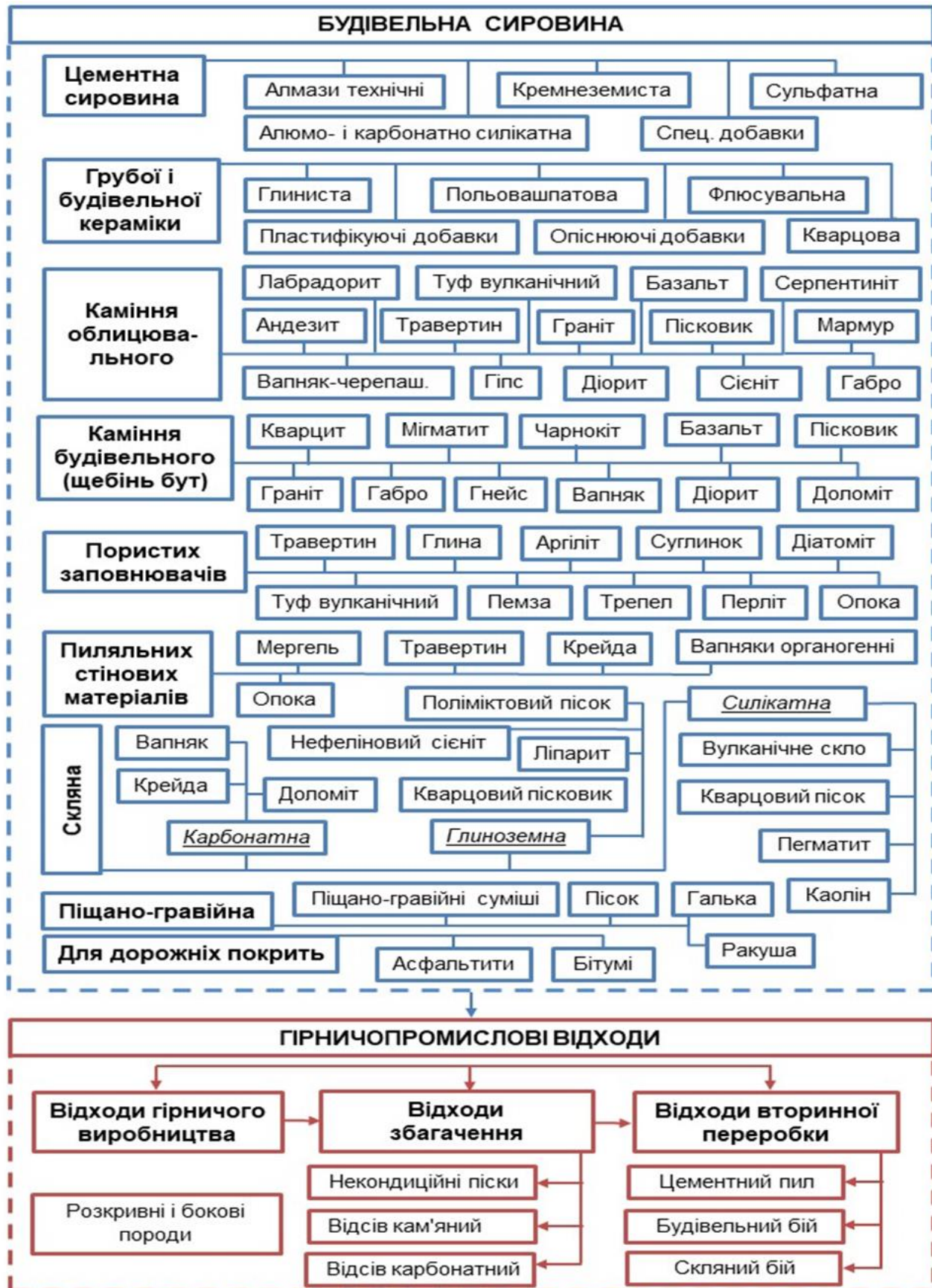


Рис. 4. Структурна схема системи «Будівельна сировина – гірничопромислові відходи»

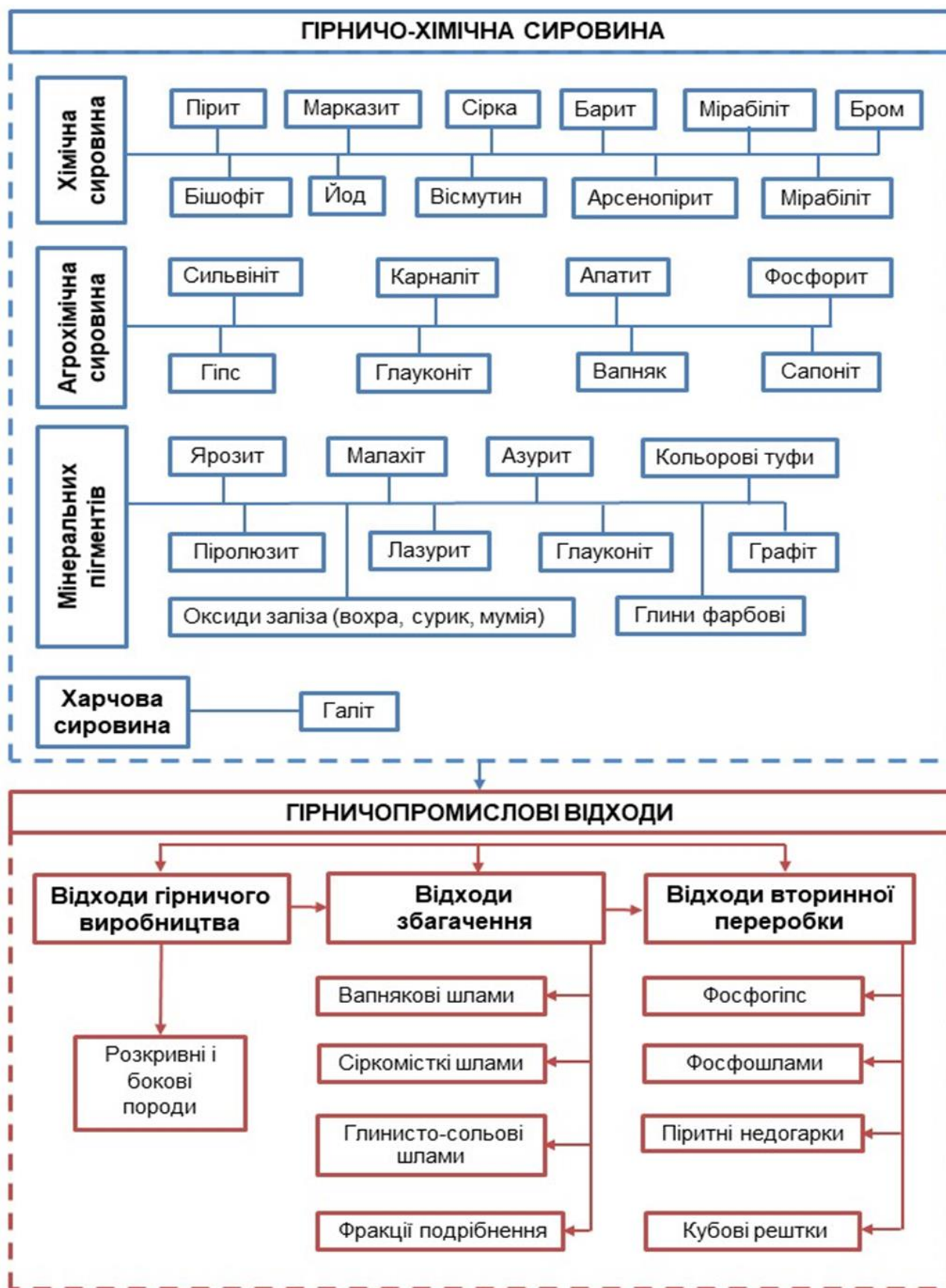


Рис. 5. Структурна схема системи «Гірничо-хімічна сировина – гірничопромислові відходи»

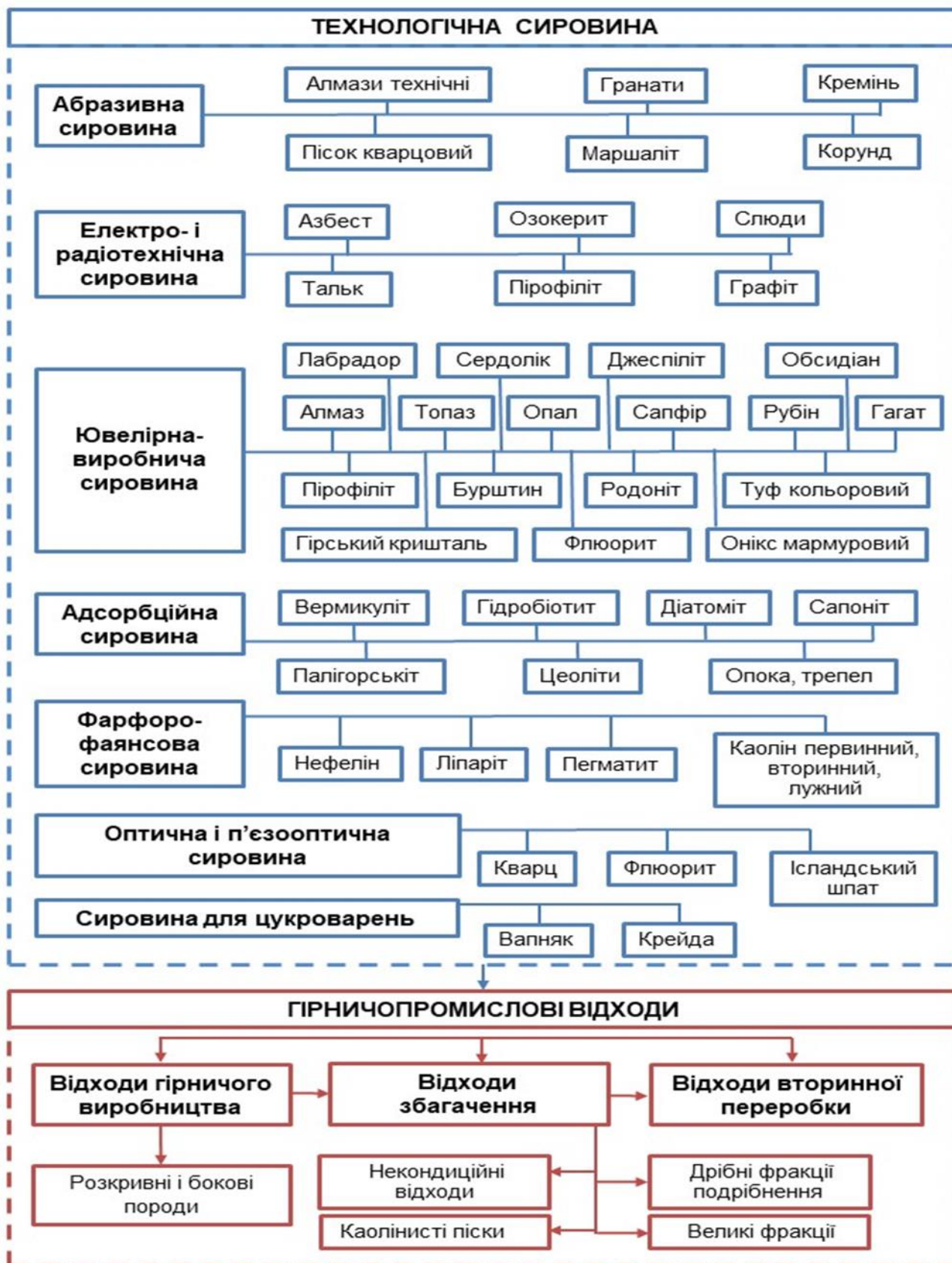


Рис. 6. Структурна схема системи «Технологічна сировина – гірничопромислові відходи»

Техногенні мінерали. На даний час сховища гірничопромислових відходів необхідно розглядати не як відходи, а як родовища утворення техногенних (технічних) мінералів, як перспективну сировину для одержання цінних компонентів. [5–7]

Фізичну основу техногенної мінеральної сировини становлять властивості окремих мінералів, мінеральних фаз та мінеральних асоціацій на макро-, мікро- та нанорівнях, а також зміни цих властивостей при первинних технологічних та вторинних гіпергенних впливах.

Сховища розкритих та вміщуючи порід за складом та властивостями певною мірою можна зіставляти з природними аналогами і дослідження як правило керується методами вивчення природної мінеральної сировини.

Сховища первинної (збагачення) та вторинної переробки корисних копалин істотно відрізняються від природної сировини, тому частково використовується теоретичний метод дослідження цих об'єктів.

В.Д. Євтехов виділив п'ять основних пріоритетних напрямів подальших робіт у технологічній (техногенній) мінералогії [8]:

1) активізація досліджень, які забезпечують більш ефективне використання природного потенціалу добувних і збагачуваних корисних копалин;

2) мінералогічне обґрунтування залучення у відпрацювання видів, класів, типів традиційної для гірничодобувних підприємств мінеральної сировини, яку не використовували дотепер;

3) мінералогічне обґрунтування технологій, що забезпечують максимальну утилізацію корисних копалин, які видобувають побіжно;

4) мінералогічне дослідження відходів видобутку та збагачення корисних копалин і обґрунтування раціональних технологій вторинної переробки;

5) мінералогічне вивчення відходів металургійного, машинобудівного, хімічного й інших виробництв, обґрунтування можливості їх утилізації.

Дослідження техногенних мінералів в гірничопромислових відходах набуває особливої актуальності в силу особливостей їх утворення [9].

Будь-яке природне родовище є локальною аномалією концентрації окремих елементів або мінеральних утворень, яка сформувалася і зберігається в природних умовах сотні мільйонів років, не завдаючи жодної шкоди навколишньому середовищу.

Інша справа техногенні масиви, які сформувалися з урахуванням певних технологічних факторів, піддаються інтенсивному впливу атмосферних агентів, що в залежності від кліматичних умов і тривалості зберігання розвиває потужні окислювальні процеси, трансформує первинний мінеральний склад та дуже суттєво змінює їх властивості.

Великотоннажними виробниками гірничопромислових відходів є паливо-енергетична галузь, металургійні та хімічні виробництва [9].

Серед лідируючих за обсягами та площами займають відвали вугільних, металургічних відходів, відвали ТЕС та хвостосховища [9, 10]. Тому останнім часом ці об'єкти становлять практичний інтерес для досліджень на Україні [11–13] і в усьому світі [14–17].

Породні відвали складаються з уламків аргіліту, пісковика, вапняку із включенням вугілля. Вони виникає особлива фізико-хімічна обстановка внаслідок спільного знаходження вуглистої речовини і піриту. Переміщення порід на земну поверхню із зони кисневого дефіциту, розвантаження їх від гірського тиску активізують гіпергенні процеси: фізичне вивітрювання, окислення, розчинення, гідроліз, гідратацію, метасоматоз та ін. Встановлені мінерали: сірка, карбід (муасаніт), сульфід (пірит, оксиди та гідроксиди (кварц, корунд, гематит, магнетит, лимоніт та ін.), карбонати (кальцит, арагоніт, сидерит), сульфати (ярозит, алуніт, гіпс, барит, мелантерит та ін.), силікати (каолін, муліт, серицит, ілліт, хлорит, польові шпати та ін.). Виділено природні та техногенні мінерали: пірит, марказит, ярозит, алуніт, гіпс та ін. Концентрація сірки сульфідів у різновікових відвалах змінюється від 3 до 8 %. Реакція порід сильноокисла, рН водної суспензії дорівнює 1,9-2,6, а відвалах 50-річного віку – 3,2. У складі поверхневого стоку з території шахт встановлені завислі речовини, алюміній, залізо. Виявлено також нікель, мідь, свинець, кобальт

Горілі відвали вугледобувних підприємств складаються з порід, вилучених із шахт, представлені шлакозольними утвореннями, продуктами згоряння та видобутку вугілля. Характерна реакція - окислення піриту з утворенням сульфатів та сірчаної кислоти. Сірчана кислота розкладає силікати та алюмосилікати. У кислому середовищі (рН = 2–3) стають рухливими багато катіоногенних елементів. Розчини збагачуються залізом, алюмінієм, магнієм, натрієм, калієм. Реакції окислення супроводжуються виділенням тепла та самозайманням відвалів. У місцях горіння, де температура перевищує 1000° С, розвиваються процеси, близькі до ендегенних. Горіння відвалів продовжується протягом кількох років. У процесі плавлення породи з'являються нові мінерали (сульфіди, хлориди, плагіоклаз, піроксен, олівін).

У відвалах металургійної галузі, крім металургійних відходів основного виробництва (шлаки, золи, сплави та інших.), є багато попутні компоненти (залізо, ванадій, мідь, алюміній, скандій, рідкісноземельні елементи та ін.), і навіть продукти вторинного мінералоутворення.

Мінеральний склад порід відвалів характеризується переважанням оксидів дво- та тривалентного заліза в мінеральних формах (%): юстит (19.6), гематит (38.8) та магнетиту (59.4); значною кількістю оксидів, гідрооксидів та карбонатів Са та Mg (%): портландиту (до 84.6), периклазу (до 56.7), бруситу (до 3.4), кальциту (до 11.3), арагоніту (до 3.1), доломіту (до 1.7), магнезиту (до 0.3), брейнериту (до 1.3). Крім того, встановлено такі мінеральні асоціації (%): гематит (13)-магнетит (13)-кварцова (47); кальцит (11)-портландитова (85); гематит (10)-юстит (20)-магнетитова (60); периклаз (33)-гематитова (39); геленіт (10)-кварц (13)-периклазова (57). Типові шлакові мінерали представлені (%): геленітом (до 10.3), тридимітом (до 4.8), кристобалітом (до 7.9), мулітом (до 7.6).

За хімічним складом у шлаках переважають: SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , FeO , MnO , CaO , MgO ; мікроелементи (г/кг): Cu – до 5.7, Zn – до 1.83, Cr – до 1.7, Mn – до 2.5.

Для кольорової металургії хімічний склад відходів характеризується кислими силікатними та алюмінієвими складовими. Розкриті породи та хвости

збагачення можуть містити: 45–88 % SiO_2 , 5–25 % Al_2O_3 , 1–15 % оксидів заліза, іноді – 10% Cu, Zn, Pb та ін.

Відвали ТЕЦ містять цілу низку цінних компонентів - германій, галій, скандій, рідкісноземельні метали.

Хвостосховища відносяться до техногенно-освічених відходів, які сформовані з речовин, що зустрічаються в земній корі або з домішкою таких. Хвости збагачення являють собою пульпу, що складається з суміші твердої та рідкої фаз.

Тверда фаза представлена сумішшю мінеральних частинок різного розміру (від частки мікрона до 3 мм). Рідка фаза пульпи – суміш води та залишкових реагентів, які застосовуються при флотації в циклі збагачення фабрик.

Хвости сухої магнітної сепарації відрізняються підвищеною крупністю (20...70 мм), зниженим вмістом металів. Хвости мокрої магнітної сепарації утворюються під час переробки багатьох руд чорних металів. Хвости мокрої магнітної сепарації надходять у хвостосховища у вигляді пульпи, тверда складова якої представлена дрібно-і тонкоуламковим матеріалом (-0,14 мм).

Хвости флотації є тонкодисперсну масу з вмістом фракції 0,074 мм - 40...80 %, фракції 0,15 мм - 50...80 %, при середній густині 1,3...2,9 г/см³. Найбільшого поширення флотація знаходить при збагаченні комплексних руд кольорових металів, де збагачують понад 90% обсягу руд. В результаті процесів гравітаційної диференціації в лежачих хвостах з часом відбувається утворення досить великих збагачених металом техногенних покладів, а в нижній частині складованого відвалу позабалансових руд під впливом окислювальних процесів та сегрегації матеріалу можуть формуватися поклади, подібні до зон вторинного збагачення.

Склад і внутрішню будову багатьох цих та інших об'єктів, крім умов складування, залежить також від тривалості їх зберігання. Через спільне складування різних за складом та фізико-механічними властивостями порід, змін у часі якості відходів, що грають, гравітаційної диференціації та сегрегації складованих відходів (особливо це стосується хвостосховищ), їх переміщення, окислення, вилуговування, міграції та перерозподілу компонентів, а також інших гіпергенних процесів первісна якість матеріалу може суттєво змінюватися. Ступінь цієї зміни залежить від тривалості зберігання. За цією ознакою доцільно виділити статичні об'єкти складування та зберігання відходів.

Розміщення відходів просто неба доступне всім факторам гіпергенезу. Внаслідок впливу геологічних (різні види ерозії, розмив, розвіювання, вплив атмосферних опадів, що включають кислотні дощі, що містять оксиди сірки та азоту, інфільтрація) та мінералого-геохімічних (окислення, гідратація, водна міграція іонних та колоїдних розчинів) факторів відбувається повільне, але суттєве перетворення відходів.

Відходи піддаються інтенсивному впливу атмосферних агентів, тому в залежності від кліматичних умов і тривалості зберігання в них розвиваються потужні окислювальні процеси, що трансформують первинний мінеральний склад, що дуже суттєво змінює їх властивості. На швидкість та інтенсивність вказаних процесів впливає збільшення поверхневого контакту тонкоподрібнених відходів агентами

вивітрювання у шарах сховищ гірничопромислових відходів, що призводить до активізації гіпергенних процесів, які потім переходять у техногенну стадію.

Відбувається інтенсивне сучасне мінералоутворення, що певною мірою відіграє роль самоочищення високомінералізованих відходів.

Висновок. У якості висновків зазначимо, що проведений попередній огляд існування гірничопромислових відходів свідчить про можливість використання їх як поновлюваних мінеральних ресурсів.

Дослідження мінералого-геохімічних особливостей гірничопромислових відходів видобутку та переробки мінеральної сировини дозволить розробити методологію сучасних процесів мінералоутворення, гіпергенних перетворень та парагенезисів техногенних мінералів.

Методологічно нові вивчення гіпергенних змін у гірничопромислових відходах, вкрай різноманітних за своїми якісними та кількісними характеристиками, повинні мати властивість універсальності, а для цього повинні мати якийсь загальний організований алгоритм формування. Так, початкове гіпотетичне чи експериментальне виявлення певної закономірності чи відношення властивостей мінералів передбачає наступний аналіз цих видозмін у різних умовах. Це стає підставою для підтвердження нових зв'язків властивостей мінералу, що дозволяє встановити їх взаємодії, кореляцію різноманіття властивостей мінеральних компонентів.

Розвиток науково-методологічних засад визначення та використання техногенних мінералів може вирішити питання:

- скорочення темпів накопичення гірничопромислових відходів;
- запровадження комплексного освоєння родовищ корисних копалин;
- збільшення запасів мінеральної сировини за рахунок залучення до практичного використання заскладованих на поверхні різного роду відходів;
- уникнення забруднення навколишнього середовища.

Перелік посилань

1. Helser, J. (2022). *(Re)mining mined waste a new business?* <https://re-mine.eu/wp-content/uploads/2022/05/ReMining.pdf>
2. Blengini, G., Mathieux, F., Mancini, L., Nyberg, M., & Viegas, H. (Eds.) (2019). *Recovery of critical and other raw materials from mining waste and landfills – State of play of existing practices, JRC Science for Policy Report*. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2760/174367>
3. Nazarbek, U., Abdurazova, P., Nazarbekova, S., Raiymbekov, Y., & Kambatyrov, M. (2023). Processing of Phosphoric Solid Waste by Humic Acid Leaching Method. *Inorganics*, 11(3), 90. <https://doi.org/10.3390/inorganics11030090>
4. Kolesnikov, A. S., Zhakipbaev, B. Y., Zhanikulov, N. N., Kolesnikova, O. G., Akhmetova, E. K., Kuraev, R. M., & Shal, A. L. (2021). Review of technogenic waste and methods of its processing for the purpose of complex utilization of tailings from the enrichment of non-ferrous metal ores as a component of the raw material mixture in the production of cement clinker. *Rasayan Journal of Chemistry*, 14(02), 997–1005. <https://doi.org/10.31788/rjc.2021.1426229>
5. Міщенко, В.С. (Ред.) (2000). *Методичні рекомендації щодо комплексного вивчення промислових відходів як техногенних родовищ корисних копалин*. РВПС НАН України.

6. Міщенко, В.С. (2007). Поводження з техногенними родовищами корисних копалин. *Екологія і промисловість*, 3, 52–55. http://nbuv.gov.ua/UJRN/ekolprom_2007_3_14
7. Копач, П., Якубенко, Л., Романенко, В., Шматков, Г., Чихрадзе, Н., Хомерики, С., Михельсон, Р., & Матарадзе, Е. (2013). Перспективи залучення до експлуатації техногенних родовищ (на прикладі України і Грузії). *Екологія і природокористування*, 16, 210–218.
8. Євтехов, В.Д. (2005). Віхи технологічної мінералогії. *Зап. Укр. мінералог. товариства*, 2, 32–37.
9. Suppes, R., & Heuss-Aßbichler, S. (2021). How to Identify Potentials and Barriers of Raw Materials Recovery from Tailings? Part II: A Practical UNFC-Compliant Approach to Assess Project Sustainability with On-Site Exploration Data. *Resources*, 10(11), 110. <https://doi.org/10.3390/resources10110110>
10. *Global Tailings Review (International Council on Mining and Metals [ICMM], United Nations Environment Programme [UNEP], Principles for Responsible Investment [PRI]). Global Industry Standard on Tailings Management.* (2020). <https://globaltailingsreview.org>
11. Чоботько, І. (2023). Перспективи використання відходів вуглевидобутку як ресурс техногенних родовищ.
12. Тарасова, Т. В., Губіна, В. Г., Кващук, Л. П., Горлицький, Б. О., & Єременко, М. В. (2011). *Промислові відходи України. Проблеми та шляхи їх вирішення.* Логос.
13. Светкина, О., Тарасова, А., Нетяга, О., Єгоров, П. (2015). *Переробка відходів ТЕС, працюючих на вугіллі.*
14. Golev, A., Gallagher, L., Vander-Velpen, A., Lynggaard, J., Friot, D., Stringer, M., Chuah, S., Arbelaez-Ruiz, D., Mazzinghy, D., Moura, L., Peduzzi, P., & Franks, D. (2022). Ore-sand: A potential new solution to the mine tailings and global sand sustainability crises. Final Report. *The University of Queensland & University of Geneva.* <https://www.researchgate.net/publication/359893861>
15. Martins, N. P., Srivastava, S., Simão, F. V., Niu, H., Perumal, P., Snellings, R., Illikainen, M., Chambart, H., & Habert, G. (2021). Exploring the Potential for Utilization of Medium and Highly Sulfidic Mine Tailings in Construction Materials: A Review. *Sustainability*, 13(21), 12150. <https://doi.org/10.3390/su132112150>
16. Uberman, R. (2023). Procedures leading to acquirement of mineral raw materials from anthropogenic deposits. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management*, 37(3), 101–110. <https://doi.org/10.24425/gsm.2021.138661>
17. *Near-zero-waste recycling of low-grade sulphidic mining waste for critical-metal, mineral and construction raw-material production in a circular economy.* (2020). <https://h2020-nemo.eu/project-2/>

ABSTRACT

Purpose. Based on open sources of information, review the current state and storage of waste from mining, primary (concentration) and secondary processing of mineral raw materials. To provide a current system for the existence and transformation of mining waste in relation to the category of promising developments as the basis for the formation and study of the mineralogical and geochemical features of the formation or process of formation of technogenic minerals. Predict the variation in the geological and economic assessment of the massif as a newly created deposit.

The methods. The work uses general scientific research methods – empirical and theoretical (analysis, generalization, explanation).

Findings. A preliminary review of the existing types of waste from industrial sectors where mining and processing of minerals is carried out is carried out as the basis for modern mineral formation of technogenic (technical) minerals. A general modern structural diagram of the system of mineral raw materials and mining waste is presented.

The originality. The potential of the existence of technogenic minerals has been revealed. It is shown that at present, technogenic raw materials are a competitive, promising mineral resource, the use of which using innovative technologies provides not only a significant technical and economic effect, but also, along the way, an environmental effect is achieved as a natural consequence of the new level of requirements of modern production. In addition, this makes it possible to reduce the negative impact on the environment, reduce the area of alienated land for the needs of mining production, and also partly solves the problem of resource conservation.

Practical implementation. The result of the review can be used for planning and carrying out further scientific and methodological research of the mineralogical and geochemical characteristics of waste from mining and processing of minerals, supergene processes occurring in technogenic massifs, expanding and deepening mineralogical research in the field of environmental mineralogy in connection with technological.

Keywords: *mining waste, man-made minerals, hypergenic processes.*