

<https://doi.org/10.15407/mineraljournal.45.01.059>
УДК 550.4:622.7

В.Г. Губіна, канд. геол.-мін. наук, пров. наук. співроб.

E-mail: gvg131619@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-7486-5451>

В.В. Покалюк, д-р геол. наук, пров. наук. співроб.

E-mail: pvskan@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0002-9282-0246>

В.Г. Верховцев, д-р геол. наук, зав. відділом

E-mail: verkhovtsev@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0002-1015-6725>

В.Г. Яценко, канд. геол.-мін. наук, зав. лаб.

E-mail: vgyatsenko@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-3498-3466>

В.С. Заборовський, наук. співроб.

E-mail: zaborovskyv@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0002-5845-7535>

Державна установа "Інститут геохімії навколишнього середовища
Національної академії наук України"

03142, м. Київ, пр-т Акад. Палладіна, 34-а

ХІМІЧНИЙ СКЛАД ПОТОЧНИХ ХВОСТІВ ЗБАГАЧЕННЯ МАГНЕТИТОВИХ КВАРЦИТІВ КРИВОРІЗЬКОГО БАСЕЙНУ

Досліджено хімічний склад поточних хвостів криворізьких гірничо-збагачувальних комбінатів (Інгулецького, АрселорМіттал Кривий Ріг, Центрального). Підтверджено тісний зв'язок між складом поточних хвостів та вихідних руд, які підлягають збагаченню; визначено головні тенденції техногеохімічних змін продуктів переробки в процесі збагачення. Означено розбіжності у складі поточних хвостів між різними гірничо-збагачувальними комбінатами Кривбасу: хвости Інгулецького комбінату більш залізисті (їхня залізистість складає 23,7 %, і є майже удвічі вищою за залізистість Центрального і АрселорМіттал Кривий Ріг). Хвости комбінату АрселорМіттал Кривий Ріг — більш карбонатисті і глиноземисті, з низьким вмістом заліза і кремнію. Хвости Центрального комбінату — більш кремнеземисті, з мінімальним вмістом глинозему і карбонатів і з середніми параметрами залізистості. Поточні хвости по відношенню до вихідних руд за макрокомпонентами загалом збагачені на кремній, алюміній, марганець, магній, кальцій, натрій, калій, фосфор, сірку, та збіднені на залізо і титан; за мікрокомпонентами вони збагачені на деякі літофільні (зокрема рідкісноземельні) елементи — Sr, Y, Sc, Li, частково Zr, та збіднені на елементи, що концентруються у магнетиті — Ni, Th, U, Ge. Халькофільні елементи Cu, Pb, Zn, Ag характеризуються нерівномірним і непостійним розподілом, вони можуть як збагачуватись, так і збіднюватись у хвостах; значущим серед них є Zn, який може утворювати у хвостах значні концентрації (до 230 г/т). Отримані результати можуть бути застосовані для визначення напрямів утилізації хвостів і прогнозування впливу хвостосховищ на навколишнє середовище.

Ключові слова: магнетитові кварцити, відходи збагачення, поточні та лежалі хвости, хімічний склад, мікроелементи.

Цитування: Губіна В.Г., Покалюк В.В., Верховцев В.Г., Яценко В.Г., Заборовський В.С. Хімічний склад поточних хвостів збагачення магнетитових кварцитів Криворізького басейну. *Мінерал. журн.* 2023. 45, № 1. С. 59—71. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.45.01.059>

© Видавець ВД "Академперіодика" НАН України, 2023. Стаття опублікована на умовах відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Вступ. Основою чорної металургії України є залізні руди, головним чином, магнетитові кварцити Криворізького басейну, які розробляють сім гірничозбагачувальних комбінатів (ГЗК): Інгулецький, Південний, АрселорМіттал Кривий Ріг (АМКР), Центральний, Північний, Полтавський, Єристівський. У процесі збагачення залізистих кварцитів на залізрудних ГЗК України щорічно виробляють 50—70 млн т залізрудного концентрату [1]. Водночас виникає приблизно така ж кількість дрібнодисперсних відходів збагачення, так званих хвостів [14]. Хвости, що утворюються на рудозбагачувальних фабриках (РЗФ) у процесі переробки залізистих кварцитів, називають поточними, а ті, що за тривалий час накопичені у хвостосховищах — лежалими. За офіційними даними Державної служби статистики України, станом на 2017 р. у хвостосховищах Кривбасу накопичено понад 4 млрд т відходів збагачення. Хвостосховища займають площу більше 5 тис. га [12]. За підрахунками науковців, їх накопичено у 2—2,5 раза більше. Різниця в розрахунках пояснюється тим, що державним органам надається інформація про щорічні обсяги утворених відходів лише від діючих підприємств. Закриті підприємства не звітують.

Хвостосховища негативно впливають на екологічний стан регіону: істотно забруднюють атмосферу, водойми й сільськогосподарські угіддя прилеглих територій. Вони є потенційно небезпечними об'єктами з можливістю виникнення техногенних катастроф. Проте, одночасно з негативним екологічним впливом, хвостосховища мають високу ресурсну цінність. По суті це — техногенні мінерально-сировинні родовища, особливістю яких є легкодоступність і невеликі витрати на переробку внаслідок розташування на денній поверхні та існування у вигляді вже дезінтегрованої маси уламкових часток мінералів (найенергетичніші витрати в процесі добування і збагачення припадають саме на подрібнення мінеральної сировини). Підраховано, що запаси техногенного заліза, накопиченого в хвостосховищах Кривбасу, складають майже 400 млн т, що є зрівняним із запасами багатих залізних руд у проектних контурах видобувних підприємств [4]. На

Центральному ГЗК з 2004 до 2015 р. лежали відходи збагачення залізистих кварцитів переробляли на залізрудний концентрат. Практичний досвід цього підприємства показав, що масова частка заліза в концентраті, отриманого з хвостів, трохи нижча, ніж із кондиційних залізистих кварцитів, але собівартість такого концентрату на 40 % менша. Окрім заліза відходи збагачення залізистих кварцитів містять багато цінних компонентів, придатних до використання у різних сферах господарювання. На сьогодні виконано наукові дослідження щодо використання лежалих хвостів для виробництва піску, бетону, цементу, скла, склокристалічних матеріалів, оздоблювальної плитки тощо [2, 10, 11]. Огляд наукових досліджень і досвід практичного застосування відходів збагачення криворізьких ГЗК у будівельній галузі наведено у роботі [13]. Тонкозерниста фракція відходів збагачення залізистих кварцитів, збагачена фосфором, марганцем, рідкісноземельними елементами і збіднена на залізо може бути корисним компонентом комплексних мікродобрив [5]. Більшість хвостосховищ залізрудних комбінатів України експлуатуються вже понад 50 років і вичерпують терміни своєї дії.

Утилізація відходів збагачення залізних руд у країнах, які видобувають і переробляють залізисті кварцити, подібні до криворізьких (Австралія, Бразилія, Індія, Канада, Швеція та ін.), є важливим завданням у зв'язку з великим обсягом утворення відходів і економічними чинниками їхньої переробки. Попри значну кількість пропозицій щодо шляхів утилізації хвостів збагачення, компанії, що видобувають і переробляють бідні залізні руди, економічно не зацікавлені в утилізації відходів [16—18]. Проблема стоїть гостро у зв'язку небезпечністю хвостосховищ як гідротехнічних споруд. Так у 2015 і 2019 рр. у Бразилії сталися техногенні катастрофи у зв'язку з проривом дамб хвостосховищ, де накопичувались хвости збагачення гематитових руд. Селевий потік, утворивши грязьові хвилі заввишки 10 м, зніс сотні будівель, загинуло багато людей [19, 20]. Ці екологічні катастрофи завдали незворотної шкоди навколишньому середовищу. Тому важливим є дослідження речовинного складу хвостів за-

лізородних підприємств задля визначення напрямів їх утилізації та використання в різних галузях економічної діяльності.

Мета досліджень. Визначити головні тенденції техногеохімічних змін у процесі збагачення магнетитових кварцитів на основі дослідження хімічного складу поточних хвостів і вихідних руд криворізьких ГЗК, з метою пошуку напрямів подальшого використання хвостів і оцінювання їх екологічного впливу на навколишнє середовище.

Об'єктом досліджень у цій роботі є поточні хвости трьох криворізьких ГЗК — Інгuleцького (ІнГЗК), АрселорМіттал Кривий Ріг (АМКР), Центрального (ЦГЗК). *Предмет досліджень* — хімічний склад хвостів різних стадій магнітної сепарації та їх порівняння зі складом вихідної руди.

Аналіз попередніх досліджень. За наявності незначної кількості робіт щодо відходів збагачення криворізьких ГЗК, вивченість їх натеper носить фрагментарний характер. Досліджено гранулометричний, хімічний і мінералогічний склад лежалих хвостів деяких ГЗК, накопичених у хвостосховищах [2, 3, 6—9, 15]. Відомі лише поодинокі неповні дані щодо хімічного складу поточних хвостів [5], а також їхнього мінерального складу [9].

Встановлено, що поточні хвости відрізняються від лежалих за гранулометричним складом, розподілом мінералів і хімічних елементів по фракціях, що пов'язано з гравітаційною і фаціальною диференціацією лежалих хвостів у хвостосховищах. На придамбових ділянках (безпосередньо біля хвостозливних труб) звичайно накопичується великозернистий матеріал (від 3—4 до 0,2—0,3 мм) та дрібні мономінеральні частки магнетиту і гематиту, зростки магнетиту та гематиту з нерудними мінералами. У цих частинах хвостосховищ фіксується підвищена масова частка заліза.

Цілком очевидно, що хімічний склад поточних хвостів криворізьких ГЗК потребує глибшого вивчення, встановлення закономірностей зміни їхнього складу і техногеохімічної поведінки елементів у процесі збагачення вихідної руди. У цій публікації такі питання розглянуто вперше в аспекті порівняння складу поточних хвостів зі складом вихідної руди для різних ГЗК.

Методи дослідження. Досліджено вихідні магнетитові кварцити і поточні хвости трьох гірничозбагачувальних комбінатів Кривбасу — ІнГЗК, ГЗК АМКР, ЦГЗК. Проби хвостів і вихідної руди відібрано у кожній рудозбагачувальній фабриці впродовж одного технологічного циклу/загрузки, а також за рудопотоками з різних кар'єрів. Проби хвостів відібрано з отворів хвостозливників різних (II—IV) стадій мокрої магнітної сепарації (ММС) на рудозбагачувальних фабриках та із загальних хвостозливників технологічних рудовипробувальних лабораторій (РВЛ) комбінатів; після відстоювання і зливу рідини їх висушено у печах. Як вихідна руда відібрана: 1) подрібнена руда (<0,3 см) РВЛ комбінатів; 2) злив класифікатора рудопотоків РЗФ та РВЛ. Вага усереднених і відквартованих проб складала 1,0—1,5 кг.

Вміст головних пороодоутворювальних хімічних макрокомпонентів у пробах визначено за допомогою рентгенівського багатоканального спектрометра СРМ-25 (лабораторія ННІ "Інститут геології" Київського національного університету (КНУ) імені Тараса Шевченка). Загалом проаналізовано 15 проб руди і 15 проб хвостів. Вміст мікроелементів визначено: 1) за допомогою рентгенофлуоресцентного спектрометра СЕР-01 (*ElvaX Mini*) у лабораторії ННІ "Інститут геології" КНУ — по чотири проби руди і хвостів для Інгuleцького ГЗК і по п'ять проб руди і хвостів для Центрального ГЗК; 2) методом емісійної спектрометрії в лабораторії Інституту геохімії, мінералогії та рудоутворення імені М.П. Семененка НАН України — 18 проб руди і 14 проб хвостів для ГЗК АМКР.

Результати та їх обговорення. *Макрокомпоненти.* Поточні хвости рудозбагачення гірничозбагачувальних комбінатів Криворізького басейну за хімічним складом можуть бути віднесені до Fe—Si систем. Оксиди кремнію і заліза становлять ~85 % (77—95 %) складу хвостів. Головним компонентом є оксид кремнію. На другому місці — оксиди заліза. Сумарний вміст оксидів заліза коливається в межах 6—29 %, в основному 11—21 %. У невеликій кількості також присутні оксид алюмінію і оксиди лужноземельних металів (до перших відсотків). Ще менше у хвостах лужних металів, титану, фосфору.

Таблиця 1. Хімічний склад поточних хвостів і вихідних руд (магнетитових кварцитів) рудопотоків Інгулецького, АМКР і Центрального ГЗК Кривбасу, %

Table 1. Chemical composition of current tailings and source ores (magnetite quartzite) of ore streams of Inguletsky, AMKR and Central Mining and Processing Plants of Kryvyi Rih basin, %

Номер з/п	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ *	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	S	LOI	Σ	H ₂ O ⁻
<i>Інгулецький ГЗК</i>														
1	50,87	0,06	1,15	39,53	0,09	2,77	2,03	0,15	0,29	0,28	0,12	2,64	100	0,13
2	66,76	0,05	1,65	20,96	0,13	3,56	2,54	0,16	0,34	0,39	0,08	3,36	100	0,10
3	48,86	0,05	0,47	43,12	0,08	3,03	1,86	0,08	0,12	0,17	0,05	2,09	100	0,13
4	66,81	0,04	0,46	25,47	0,09	2,48	1,75	0,07	0,08	0,20	0,07	2,42	100	0,05
5	48,81	0,08	1,68	40,93	0,12	3,46	1,83	0,20	0,36	0,26	0,10	2,12	100	0,11
6	55,98	0,06	1,67	28,95	0,18	4,91	2,10	0,41	0,33	0,35	0,18	4,72	100	0,44
7	47,37	0,06	1,10	40,44	0,14	4,11	2,48	0,15	0,27	0,22	0,10	3,51	100	0,19
8	63,00	0,06	1,66	19,44	0,22	5,13	3,30	0,13	0,44	0,33	0,16	6,03	100	0,27
9	48,98	0,06	1,10	41,00	0,11	3,34	2,05	0,14	0,26	0,23	0,09	2,59	100	0,14
10	63,13	0,05	1,36	23,71	0,16	4,02	2,42	0,19	0,30	0,32	0,12	4,13	100	0,21
<i>АМКР</i>														
11	42,54	0,09	3,49	42,88	0,17	2,48	1,52	0,14	0,72	0,36	0,05	5,51	100	0,15
12	54,06	0,10	4,25	25,01	0,24	2,80	2,38	0,24	0,96	0,55	0,02	9,30	100	0,53
13	43,93	0,06	2,28	44,00	0,15	3,31	1,64	0,22	0,50	0,25	0,02	3,62	100	0,16
14	69,25	0,06	3,20	10,49	0,26	4,18	3,07	0,29	0,84	0,50	0,02	7,80	100	0,38
15	50,25	0,05	1,54	38,95	0,13	2,85	1,45	0,12	0,42	0,22	0,02	3,96	100	0,35
16	71,99	0,05	2,08	12,76	0,20	3,65	2,49	0,14	0,67	0,39	0,03	5,50	100	0,13
17	48,35	0,03	0,47	42,50	0,12	4,32	0,98	0,06	0,06	0,16	0,03	2,86	100	0,14
18	77,43	0,02	0,71	7,02	0,18	5,81	1,90	0,05	0,11	0,31	0,04	6,37	100	0,46
19	45,92	0,03	0,46	38,11	0,12	5,52	2,48	0,11	0,08	0,12	0,21	6,80	100	0,20
20	65,56	0,02	0,69	11,57	0,19	6,68	3,84	0,15	0,14	0,20	0,20	10,72	100	0,34
21	47,71	0,03	0,51	44,22	0,10	3,35	1,04	0,06	0,07	0,14	0,03	2,69	100	0,06
22	73,05	0,02	0,71	12,98	0,17	4,83	2,09	0,04	0,12	0,27	0,04	5,63	100	0,08
23	46,45	0,05	1,46	41,78	0,13	3,64	1,52	0,12	0,31	0,21	0,06	4,24	100	0,18
24	68,56	0,04	1,94	13,31	0,20	4,66	2,63	0,15	0,47	0,37	0,06	7,55	100	0,32
<i>Центральний ГЗК</i>														
25	61,81	0,03	0,24	35,95	0,04	0,62	0,72	0,08	0,07	0,12	0,12	0,14	100	0,18
26	89,07	0,02	0,66	6,10	0,04	1,07	1,72	0,09	0,11	0,23	0,09	0,77	100	0,18
27	53,06	0,06	0,97	41,01	0,11	1,90	1,95	0,13	0,18	0,30	0,09	0,21	100	0,31
28	71,88	0,03	1,28	19,48	0,14	2,52	2,86	0,28	0,20	0,40	0,16	0,70	100	0,47
29	54,38	0,04	0,63	36,43	0,11	1,78	1,26	0,02	0,10	0,20	0,07	4,93	100	0,13
30	73,64	0,03	0,90	12,20	0,15	2,58	1,84	0,05	0,14	0,28	0,08	8,08	100	0,19
31	53,59	0,04	0,48	37,61	0,06	1,74	1,06	0,59	0,53	0,14	0,06	4,06	100	0,08
32	72,11	0,03	0,79	13,93	0,08	2,59	1,65	0,81	0,53	0,21	0,08	7,14	100	0,26
33	54,27	0,07	2,41	34,75	0,09	2,25	1,51	0,14	0,33	0,17	0,14	3,85	100	0,09
34	75,85	0,05	1,51	14,82	0,08	2,12	1,67	0,20	0,28	0,16	0,14	3,05	100	0,08
35	55,42	0,05	0,95	37,15	0,08	1,66	1,30	0,19	0,24	0,19	0,10	2,64	100	0,16
36	76,51	0,03	1,03	13,31	0,10	2,18	1,95	0,29	0,25	0,25	0,11	3,95	100	0,24

Примітка. Fe₂O₃* — сумарне залізо, перераховане на Fe₂O₃; LOI — втрати при прожарюванні; H₂O⁻ — вологість проби. Місця відбору проб: 1, 2 — РЗФ-1 (рудопотік); 3, 4 — РЗФ-2 (рудопотік); 5, 6 — РЗФ-1 (РВЛ); 7, 8 — РЗФ-2 (РВЛ); 11, 12 — кар'єр 2-Біс, гор. 150 (РВЛ); 13, 14 — кар'єр 2-Біс, гор. 165 (РВЛ); 15, 16 — кар'єр 2-Біс, суміш (РВЛ); 17, 18 — кар'єр 3, гор. 285 (РВЛ); 19, 20 — кар'єр 3, гор. 270 (РВЛ); 21, 22 — кар'єр 3, суміш (РВЛ); 25, 26 — кар'єр Петрівський (РВЛ); 27, 28 — кар'єр Артемівський (РВЛ); 29, 30 — кар'єр Глеюватський (РВЛ); 31, 32 — шахта ім. Орджонікідзе (РВЛ); 33, 34 — рудопотік на РЗФ ЦГЗК. Характеристика проб: 1, 3, 5, 7 — злив класифікатора; 2 — хвости II стадії ММС; 4 — хвости III стадії ММС; 6 — хвости V стадії ММС; 8 — хвости III стадії ММС; 9 — злив класифікатора (середнє по ІНГЗК);

Хімічний склад поточних хвостів і вихідних магнетитових кварцитів наведено в табл. 1.

Розділення вихідної руди на магнітні продукти (концентрат) і хвости у процесі збагачення складається з поступового вилучення з подрібненої диспергованої рудної маси магнітних мінералів і, відповідно, збагачення хвостів усіма іншими немагнітними і слабомагнітними мінералами, насамперед, літофільними — кварцом, алюмосилікатами і карбонатами. Хімічний склад хвостів є відображенням їхнього мінерального складу, який залежить від мінерального складу вихідних магнетитових кварцитів, що підлягають диспергуванню і магнітній сепарації. Оскільки склад магнетитового концентрату, що отримується, є досить сталим (регламентований Держстандартом), то розбіжності в хімічному складі хвостів майже повністю залежать від розбіжностей у вихідному складі руд, а також від ступеня вилучення магнетиту з руди, що, в свою чергу, залежить від величини зерен магнетиту і характеру його зростків із іншими мінералами. Технологічні особливості процесу збагачення для різних ГЗК тут справляють менший вплив. Вміст компонентів, не пов'язаних із магнетитом так чи інакше, зростає у хвостах. Характер цих змін і тісний зв'язок між хімічним складом вихідних руд і поточних хвостів збагачення добре проілюстровано серією бінарних діаграм (рис. 1). Цей зв'язок проявлений на діаграмах витриманістю напрямів і довжин векторів змін хімічного складу від вихідних руд до хвостів.

Отже, отримані дані підтверджують тісний зв'язок між складом поточних хвостів і вихідних руд, що підлягають збагаченню. Цей зв'язок можна використовувати для петрохімічних розрахунків ступеня вилучення заліза із руд.

Як видно з діаграм, у хвостах, порівняно з вихідною рудою, насамперед зменшується вміст загального заліза і збільшується вміст кремнезему, тобто між SiO_2 і $\text{Fe}_{\text{заг}}$ у хвостах, так само як і у вихідних рудах, існує чітка зворотна кореляція. Ця залежність дуже виразна, що дає змогу нам використовувати відношення загального заліза до кремнію для класифікаційних цілей як літохімічний модуль (рис. 1). У вихідних рудах $\text{Fe}_{\text{заг}}/\text{SiO}_2$ становить $>0,55$, у хвостах — $<0,55$. Подібно до заліза поводить себе титан. Між титаном і залізом спостерігається пряма залежність. Вміст титану, загалом, у хвостах зменшується. Ця тенденція непогано виражена, хоча вихідний вміст титану в рудах дуже малий, а області коливань у рудах і хвостах майже однакові. Зменшення вмісту титану свідчить, що він пов'язаний, головним чином, саме з магнетитом (входить до його складу), і вилучається з подрібненої руди разом з магнетитом під час магнітної сепарації. Вміст решти компонентів — Al_2O_3 , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , P_2O_5 , S , LOI — збільшується у хвостах різною мірою. Тенденція збільшення виразніше проявлена для MgO , CaO , LOI , MnO (тих компонентів, що входять до складу карбонатів), а також для P_2O_5 ; менш виразно —

10 — хвости (середнє по ІнгЗК); 11, 13, 15, 17, 19, 21 — дроблена руда (<3 мм); 12, 14, 16, 18, 20, 22 — хвости; 23 — дроблена руда (середнє по АМКР); 24 — хвости (середнє по АМКР); 25, 27, 29, 31 — дроблена руда (<1 мм); 26, 28, 30, 32 — хвости; 33 — злив класифікатора; 34 — хвости IV стадії ММС; 35 — дроблена руда, злив класифікатора (середнє по ЦГЗК); 36 — хвости (середнє по ЦГЗК).

Note. Fe_2O_3^* — total iron count to Fe_2O_3 ; LOI — loss on ignition; H_2O^- — sample's moisture. *Sampling sites:* 1, 2 — ore processing plant (OPP)-1 (ore flow); 3, 4 — OPP-2 (ore flow); 5, 6 — OPP-1 (ore testing laboratory (OTL)); 7, 8 — OPP-2 (OTL); 11, 12 — quarry 2-Bis, hor. 150 m (OTL); 13, 14 — quarry 2-Bis, horizon 165 m (OTL); 15, 16 — quarry 2-Bis, mixture (OTL); 17, 18 — quarry 3, hor. 285 m (OTL); 19, 20 — quarry 3, hor. 270 m (OTL); 21, 22 — кар'єр 3, mixture (OTL); 25, 26 — Petrivskyi quarry (OTL); 27, 28 — Artemivskyi quarry (OTL); 29, 30 — Gleyuvatskyi quarry (OTL); 31, 32 — mine Ordzhonikidze (OTL); 33, 34 — ore flow to Central plant. *Sample characteristics:* 1, 3, 5, 7 — draining the classifier; 2 — tails of the II stage of wet magnetic separation (WMS); 4 — tails of the III stage of WMS; 6 — tails of the V stage of WMS; 8 — tails of the III stage of WMS; 9 — classifier drain (average according to Inguletskyi Mining and Processing Plant (MPP)); 10 — tails (average according to Inguletskyi MPP); 11, 13, 15, 17, 19, 21 — crushed ore (<3 mm); 12, 14, 16, 18, 20, 22 — tails; 23 — crushed ore (average according to ArcelorMittal Kryvyi Rih Plant (AMKR)); 24 — tails (average according to AMKR); 25, 27, 29, 31 — crushed ore (<1 mm); 26, 28, 30, 32 — tails; 33 — draining the classifier; 34 — tails of the IV stage of WMS; 35 — crushed ore, draining the classifier average according to Central MMP); 36 — tails (average according to Central MMP).

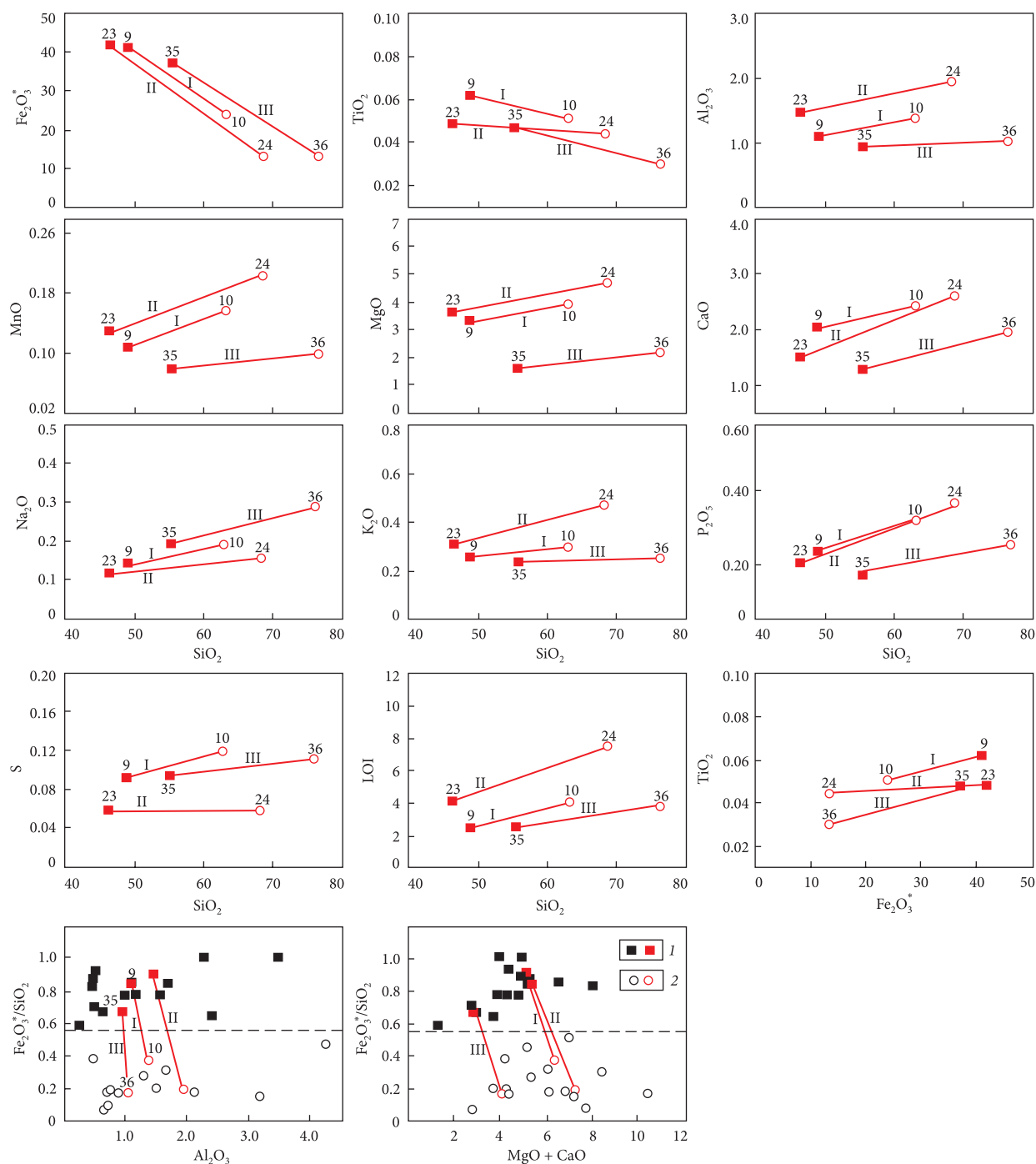


Рис. 1. Бінарні діаграми, що ілюструють зміни хімічного складу від вихідних руд (магнетитових кварцитів) до поточних хвостів у технологічному процесі на різних ГЗК Кривбасу: 1 — вихідні руди; 2 — хвости; червоним кольором позначені середні значення вихідних руд і хвостів для різних ГЗК. Номери фігуративних точок відповідають наведеним у табл. 1. Римські цифри позначають середні тренди для різних ГЗК: I — ІнГЗК, II — АМКР, III — ЦГЗК. Штрих-пунктирна лінія $\text{Fe}_2\text{O}_3^* = 0,55$ розмежовує поля вихідних руд і поточних хвостів (Fe_2O_3^* — див. Примітка до табл. 1)

Fig. 1. Binary diagrams illustrating changes in the chemical composition from the original ores (magnetite quartzite) to the current tailings in the technological process at various mining and processing plants of the Kryvyi Rih Basin: 1 — initial ores; 2 — tailings; average values of initial ores and tailings for different mining and processing plants are indicated in red. The numbers of figurative points correspond to those shown in Table 1. Roman numerals indicate average trends for different mining processing plants: I — Inguletsky, II — AMKR, III — Central. The dash-dotted line $\text{Fe}_2\text{O}_3^* = 0.55$ (Fe_2O_3^* see the Notes to the Table 1) delimits the fields of initial ores and current tailings

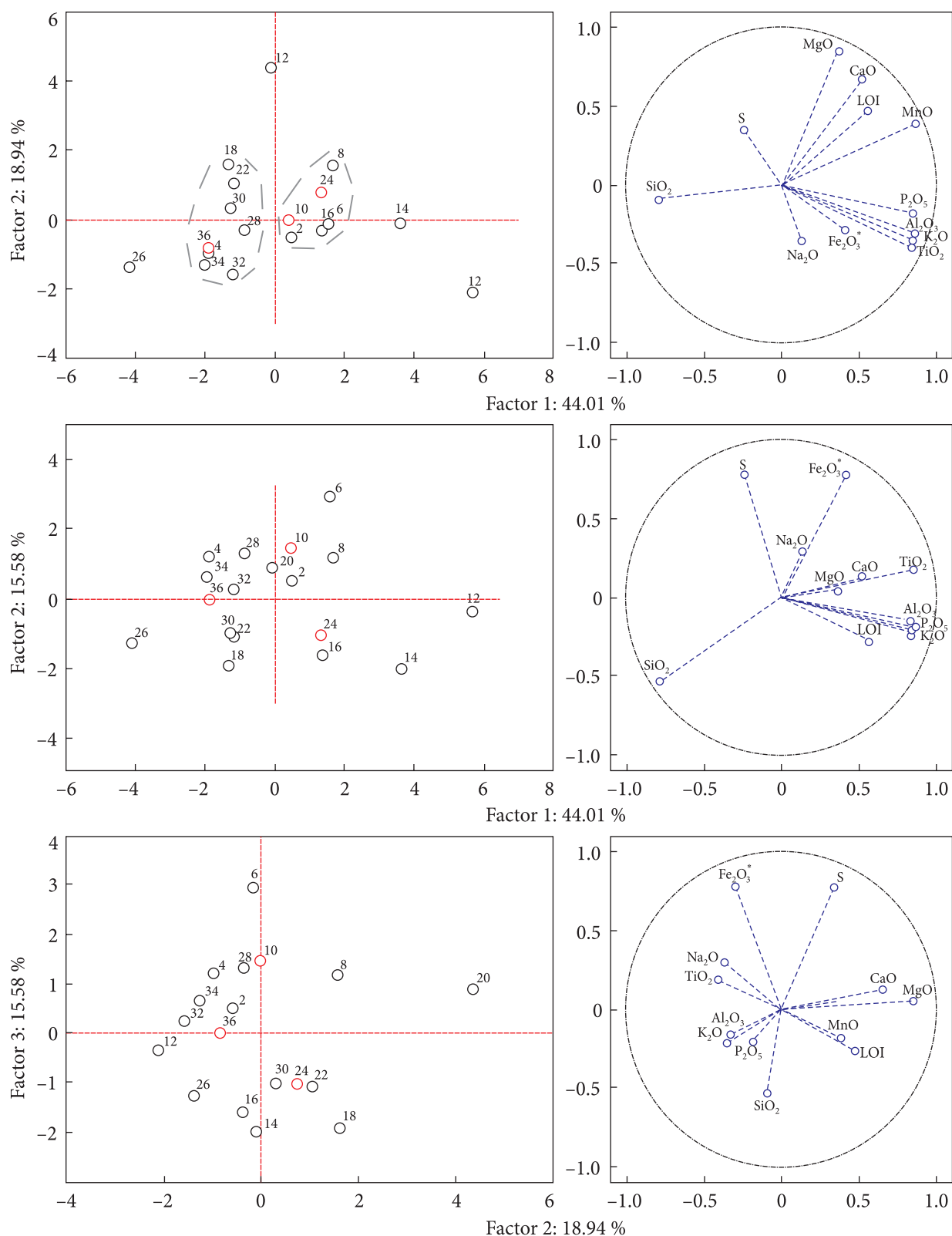


Рис. 2. Фактор-плани фігуративних точок проб хвостів (ліворуч) і хімічних компонентів (праворуч), що ілюструють розбіжність хімічного складу вибірки хвостів. Умовні позначення див. на рис. 1

Fig. 2. Factor plots of figurative points of tailings samples (left) and factor plots of chemical components (right), illustrating the discrepancy in the chemical composition of the tailings sample. See Fig. 1 for symbols

для Al_2O_3 , K_2O , Na_2O (компонентів, що входять до складу алюмосилікатів), а також для S. Важливо відмітити, що вихідна корисна копалина і хвости збагачення утворюють на діаграмах самостійні (окремі) поля, які не перекриваються, тобто вони якісно різні за хімічним складом, але тісно пов'язані.

Базові описові статистики для всієї вибірки хвостів наведено в табл. 2. Вибірку проаналізовано факторним аналізом за 12 компонентами: SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , $Fe_2O_3^*$, MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , P_2O_5 , S, LOI. Перші три фактори відповідають за 78,5 % мінливості

вибірки, відповідно, перший — 44,0, другий — 18,9, третій — 15,6 %. Перший, головний фактор мінливості вибірки, показує диференціацію між кількістю кремнезему і кількістю всіх інших компонентів, насамперед глинозему, між якими існує зворотна кореляція. Другий відповідає за карбонатистість, передусім за вміст MgO і CaO . Третій фактор пов'язаний із вмістом заліза.

Розподіл фігуративних точок хвостів на фактор-планах і трикутній діаграмі (рис. 2, 3) виявляє серед них дві слабо диференційовані підмножини, які поділяються за вмістом

Таблиця 2. Описова статистика хімічного складу вибірки поточних хвостів (загалом для ГЗК: Інгулецького, АрселорМіттал Кривий Ріг, Центрального), кількість проб — 15

Table 2. Descriptive statistics of the chemical composition of current tailings (in general for mining processing plants: Inguletsky, ArcelorMittal Kryvyi Rih, Tsentralny), Valid 15

Компонент	Середнє значення	Довірчий інтервал -95 %	Довірчий інтервал +95 %	Медіанне значення	Мінімальне значення	Максимальне значення	Стандартне відхилення
SiO_2	69,76	65,02	74,51	71,88	54,06	89,07	8,57
TiO_2	0,04	0,03	0,05	0,04	0,02	0,1	0,02
Al_2O_3	1,48	0,9	2,06	1,28	0,46	4,25	1,05
$Fe_2O_3^*$	16,08	12,29	19,87	13,93	6,1	28,95	6,84
MnO	0,16	0,12	0,19	0,17	0,04	0,26	0,06
MgO	3,66	2,8	4,52	3,56	1,06	6,68	1,56
CaO	2,35	1,98	2,72	2,1	1,65	3,84	0,67
Na_2O	0,21	0,1	0,31	0,15	0,04	0,81	0,2
K_2O	0,35	0,2	0,51	0,28	0,08	0,96	0,28
P_2O_5	0,32	0,25	0,38	0,31	0,16	0,55	0,11
S	0,09	0,06	0,13	0,08	0,02	0,2	0,06
LOI	5,44	3,79	7,08	5,63	0,7	10,72	2,97

Таблиця 3. Середній мікроелементний склад вихідних руд (магнетитових кварцитів) і поточних хвостів збагачення Інгулецького і Центрального ГЗК Кривбасу (метод рентгенофлуоресцентної спектроскопії), г/т

Table 3. Average microelement composition of initial ores (magnetite quartzite) and current tailings of enrichment of the Inguletsky and Central mining processing plants of Kryvyi Rih Basin (X-ray fluorescence spectrometry method), g/t

Характеристика	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Br	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Pb	Th	U
<i>Інгулецький ГЗК</i>																
Злив класифікатора (середнє)	84,5	<15	51,3	<10	6,0	<5	<5	13,8	8,8	7,0	<7,6	<5	<5	<5	23,3	15,3
Хвости (середнє)	67,0	<15	168,5	<10	8,5	<5	<5	15,3	16,3	12,5	12,0	<5	<5	5,8	16,8	9,7
<i>Центральний ГЗК</i>																
Дроблена руда, злив класифікатора (середнє)	85,6	<15	56,4	<10	<5	<5	<5	18,0	11,6	8,2	<7	<5	<5	<5	23,8	20,0
Хвости (середнє)	45,0	<15	156,8	<10	<5	<5	<5	12,0	21,2	10,4	<6,4	<5	<5	5,8	6,0	7,0
Межа визначення, г/т	20	15	15	10	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

заліза та кремнезему, а також декілька периферійних фігуративних точок, які збагачені, відповідно: 1) $\text{Fe}_{\text{заг}}$; 2) SiO_2 ; 3) $(\text{MnO} + \text{MgO} + \text{CaO} + \text{LOI})$; 4) $(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{P}_2\text{O}_5)$. Ці периферійні точки відповідають мінералогічним відмінам, які збагачені, відповідно: 1) магнетитом і гематитом; 2) кварцом; 3) карбонатами; 4) алюмосилкатами.

Склад хвостів для різних ГЗК за макрокомпонентами загалом подібний, їхні поля перекриваються, але середні значення дещо різні. Так, хвости Інгулецького ГЗК — більш залізисті, а за кремнеземистістю, карбонатистістю, глиноземистістю відповідають середнім значенням для всієї вибірки. Їхня залізистість (23,7 %) майже удвічі вища, ніж для АМКР і Центрального ГЗК. Хвости АМКР — більш карбонатисті і глиноземисті за низького вмісту заліза і кремнію.

Загальний вміст у них $(\text{MnO} + \text{MgO} + \text{CaO} + \text{LOI})$ у середньому становить 15 %, тоді як для Інгулецького ГЗК — 10,7, а для Центрального ГЗК — 8,1 %. Хвости Центрального ГЗК більш кремнеземисті за мінімального вмісту глинозему і карбонатів і за середніми параметрами залізистості.

Якщо звернути увагу на периферійні точки вибірки хвостів, то максимальний вміст SiO_2 (89,0 %) за мінімального вмісту Fe_2O_3^* (6,1 %) визначається для хвостів, які отримано з руди Петрівського кар'єру Центрального ГЗК. Це свідчить про найліпше вилучення магнетиту з цих руд. Навпаки, максимальний вміст Fe_2O_3^* (28,9 %) за вмістом SiO_2 , близьким до мінімального, визначається для хвостів РЗФ-1 Інгулецького ГЗК, що свідчить про набагато гірше вилучення магнетиту із цих руд. Максимальний вміст Al_2O_3 (4,25 %) і тісно пов'язаного з ним K_2O (0,96), які відображають кількість мінералів-алюмосилкатів (слюд, амфіболів), за мінімального значення SiO_2 (54,0 %), характерний для хвостів із руди Новокриворізького кар'єру 2-Біс АМКР. Максимальна карбонатистість хвостів $(\text{MnO} + \text{MgO} + \text{CaO} + \text{LOI} = 21,4 \%)$ визначена для хвостів із руди Валявкинського кар'єру цього ж ГЗК.

Мікроелементи. Середній мікроелементний склад поточних хвостів і вихідних руд для різних ГЗК наведено в табл. 3, 4. Оскільки визначення здійснили за допомогою декіль-

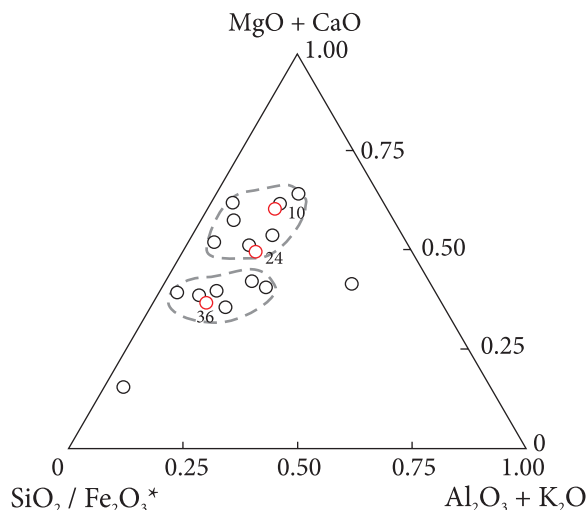


Рис. 3. Положення фігуративних точок поточних хвостів на трикутній діаграмі $(\text{SiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3^*)$ — $(\text{MgO} + \text{CaO})$ — $(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O})$. Умовні позначення див. на рис. 1

Fig. 3. The position of the figurative points of the current tailings on the triangular diagram $(\text{SiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3^*)$ — $(\text{MgO} + \text{CaO})$ — $(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O})$. See Fig. 1 for symbols

кох методів і на різну кількість елементів (для Інгулецького та Центрального ГЗК — за допомогою рентгенофлуоресцентного спектрометра СЕР-01, для АМКР — методом емісійної спектрометрії), опис результатів за цими методами наведено окремо.

Для Інгулецького і Центрального ГЗК вміст і характер поведінки досліджуваних елементів у технологічному процесі збагачення майже однаковий (табл. 3); за цими особливостями їх розділено на три групи:

До першої групи належать елементи, вміст яких по відношенню до вихідних продуктів суттєво зменшується у хвостах. Така поведінка дуже виразно проявлена для Ni, Th, U. Вона вказує на те, що ці елементи можуть бути пов'язані з магнетитом і вилучатись разом з ним під час магнітної сепарації.

До другої групи належать елементи, вміст яких по відношенню до вихідних продуктів зростає в хвостах. Така поведінка характерна для Sr, Y, частково для Zr, однак особливо виразно — для Zn. Вміст останнього зростає в хвостах майже утричі. Якщо Sr, Y, Zr пов'язані, вочевидь, із немагнітними мінералами (карбонатами і силкатами), які накопичуються у хвостах, то цинк пов'язаний із сульфідами, які унаслідок слабких магнітних

властивостей теж більшою мірою надходять у хвости.

До *третьої групи* відносяться елементи Cu, Ga, As, Se, Br, Nb, Mo, Pb, вміст яких близький до межі визначення, унаслідок чого характер їхньої поведінки достеменно не визначається.

Для проб комбінату АМКР отримано результати за більшим переліком елементів (табл. 4); поведінка їх частково збігається з даними для Інгулецького і Центрального ГЗК, але для Zn фіксується зворотна картина; елементи поділяються також на три групи.

До *першої групи* елементів, вміст яких помітно зменшується у хвостах, віднесено Ni, Ge, Cu, Pb, Zn, Sn. Якщо зменшення вмісту Ni та Ge цілком закономірне і зрозуміле, адже вони входять до складу магнетиту і вилучаються разом із ним під час магнітної сепарації, то зменшення Cu, Pb, Zn, Sn викликає

питання. Вочевидь, ця халькофільна асоціація Cu, Pb, Zn пов'язана з сульфідами. Зменшення її вмісту може бути викликано частковим вилученням у концентрат унаслідок зростання з магнетитом, однак для Інгулецького і Центрального ГЗК ми спостерігаємо зворотній процес — накопичення Zn у хвостах.

До *другої групи* елементів, вміст яких помітно збільшується у хвостах, належать Cr, Ag, Sc, Y, Li. Особливо виразно тенденція збільшення проявлена для Sc. Вміст розсіяних літофільних елементів, до яких належать Sc, Y, Li збільшується унаслідок їх концентрування у силікатах. Привертає увагу також зростання у хвостах вмісту Ag, але воно вкрай нерівномірне.

Для *реши елементів* (Co, V, Mo, Bi, Ga, Be, Yb) якихось чітких тенденцій не спостерігається унаслідок дуже малих концентрацій і значної дисперсії.

Підсумовуючи результати досліджень за мікроелементами загалом для всіх ГЗК, можна дійти висновку, що поточні хвости по відношенню до вихідних руд здебільшого збагачені на літофільні зокрема та рідкісноземельні елементи — Sr, Y, Sc, Li, частково Zr, і збіднені на елементи, що концентруються у магнетиті — Ni, Th, U, Ge. Халькофільні елементи Cu, Pb, Zn, Ag характеризуються нерівномірним і непостійним розподілом, вони можуть як збагачуватись, так і збіднюватись у хвостах; найзначущим серед них є Zn, який може утворювати у поточних хвостах значні концентрації (до 230 г/т).

Висновки. 1. Підтверджено тісний зв'язок між складом поточних хвостів і вихідних руд, які підлягають збагаченню. Визначено, що хімічний склад поточних хвостів залежить, насамперед, від складу вихідних збагачуваних руд і від ступеня вилучення з них магнетиту, що, в свою чергу, залежить від кристалічності зерен магнетиту і характеру зростків його з іншими мінералами. Технологічні особливості процесів збагачення різних ГЗК мають тут другорядний вплив.

2. Головні тенденції техногеохімічних змін продуктів переробки від вихідної руди до хвостів у технологічному процесі на ГЗК Кривбасу полягають у такому: 1) поточні хвости по відношенню до вихідних руд за макрокомпонентами загалом збагачені на

Таблиця 4. Середній мікроелементний склад вихідних руд (магнетитових кварцитів) і поточних хвостів збагачення комбінату АМКР (метод емісійної спектроскопії), г/т

Table 4. Average microelement composition of initial ores (magnetite quartzite) and current tailings of AMKR plant (method of emission spectrometry), g/t

Елемент	Дроблена руда, злив класифікатора (середнє з 5—18 проб)		Хвости (середнє з 5—14 проб)	
	Середнє	Стандартне відхилення	Середнє	Стандартне відхилення
Ni	17,3	26,2	13,6	10,9
Co	4,4	1,1	3,1	2,8
V	6,9	3,5	6,8	1,7
Cr	17,4	16,9	32,0	31,5
Mo	1,1	0,3	1,2	0,4
Zr	20,0	12,2	22,9	23,7
Cu	70,6	126,2	23,6	20,2
Pb	34,2	80,5	6,4	5,0
Ag	1	0	29,9	49,3
Bi	2,1	0,2	2,0	0
Zn	111,3	152,4	60,0	11,5
Sn	9,2	10,8	5,3	1,0
Ge	13,3	7,9	6,5	2,2
Ga	6,9	5,2	7,8	2,0
Be	1,2	0,5	1,6	1,1
Sc	3,2	2,6	30,1	45,6
Y	20,4	15,1	35,7	10,2
Yb	3,3	1,6	4,3	1,0
Li	20,0	10,0	27,3	13,5

SiO_2 , Al_2O_3 , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , P_2O_5 , LOI , S та збіднені на Fe_2O_3^* , TiO_2 ; 2) поточні хвости по відношенню до вихідних руд за мікрокомпонентами, здебільшого збагачені на літофільні та рідкісноземельні елементи — Sr, Y, Sc, Li, частково Zr, та збіднені на елементи, що концентруються у магнетиті — Ni, Th, U, Ge. Халькофільні елементи Cu, Pb, Zn, Ag характеризуються нерівномірним та непостійним розподілом, вони можуть як збагачуватись, так і збіднюватись у хвостах; найбільш значущим серед них є Zn, який може накопичуватись у хвостах у значній концентрації (до 230 г/т).

3. Означено розбіжності у складі поточних хвостів між різними гірничозбагачувальними комбінатами Кривбасу: хвости Інгулецького ГЗК більш залізисті, а за кремнеземистістю, карбонатистістю, глиноземистістю відповідають середнім значенням. Залізистість їхня (23,7 %) майже вдвічі вища ніж для АМКР і ЦГЗК. Хвости АМКР — більш карбонатисті і глиноземисті, з низьким вмістом заліза і кремнію. Хвости Центрального ГЗК більш кремнеземисті за мінімальним

вмістом глинозему і карбонатів і за середніми параметрами залізистості.

4. У поточних хвостах виявлено різновиди, збагачені залізом, кремнеземом, глиноземом, карбонатами, рідкісноземельними елементами.

В аспекті подальших досліджень необхідно вивчати поведінку елементів, мінеральний і гранулометричний склад у послідовних стадіях поточних хвостів. У зв'язку з виявленням у поточних хвостах різновидів, збагачених на різні цінні компоненти (залізо, рідкісноземельні елементи, деякі благородні і кольорові метали), слід здійснити різнопланове мінералого-геохімічне картування хвостосховищ з метою визначення характеру перерозподілу елементів у процесах гравітаційної і фаціальної диференціації поточних хвостів у тілах хвостосховищ, а також виявлення ділянок, збагачених різними видами необхідної мінеральної сировини.

Автори висловлюють щиру подяку керівництву і співробітникам Інгулецького, АрселорМіттал Кривий Ріг, Центрального ГЗК, які сприяли відбору проб і виконанню досліджень.

ЛІТЕРАТУРА

1. Виробництво промислової продукції за видами. Державна служба статистики України: вебсайт. URL: <https://ukrstat.gov.ua/> (дата звернення: 19.08.2022).
2. Губін Г.В., Олійник Т.А., Кушнірук Н.В., Шестакова К.М. Можливості зниження негативного впливу техногенних родовищ на екологічний стан навколишнього середовища за рахунок введення їх до виробництва. *Збагачення корисних копалин*. 2010. Вип. 41(82)—42(83). URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/168413211.pdf> (дата звернення: 19.08.2022).
3. Губина В.Г. Распределение железа в техногенном месторождении Центрального ГОКа по данным математического моделирования. *Сб. науч. тр. Механобрчермет "Новое в технологии, технике и экономике переработки минерального сырья"*. Ч. 2. Кривой Рог, 1998. С. 87—97.
4. Губіна В.Г., Горлицький Б.О. Залізовмісні відходи України: стан та перспективи використання. Київ: Логос, 2010. 200 с.
5. Губіна В.Г., Заборовський В.С. Особливості речовинного складу відходів збагачення залізистих кварцитів Кривбасу. *Геохімія та рудоутворення*. 2015. Вип. 35. С. 56—62. <https://doi.org/10.15407/gof.2015.35.056>
6. Губіна В.Г., Кадошніков В.М. Фізико-хімічні перетворення відходів збагачення залізистих кварцитів. *Геохімія та екологія*. 2004. Вип. 10. С. 78—81.
7. Долгова Т.І., Сметана Н.А. До вирішення проблеми переробки лежалих хвостів хвостосховищ Кривбасу. *Наук. вісник НГУ*. 2010. № 7—8. С. 92—96.
8. Евтехов В.Д., Грицай Е.Ю., Паранько И.С., Ковальчук Л.Н., Евтехов Е.В., Матыс В.Б. Минералогические особенности и обогатимость лежалых хвостов Ингулецкого горнообогатительного комбината. *Геол.-мінерал. вісник*. 2004. № 2. С. 74—77.
9. Евтехов В.Д., Федорова И.А. Топоминералогия отходов обогащения бедных железных руд Кривбасса как техногенного железорудного сырья. *Геол.-мінерал. вісник*. 2001. № 2. С. 81—87.
10. Кушнірук Н.В., Мацишина І.О. Розробка технології дозбагачення лежалих хвостів хвостосховища ПАТ "Північний ГЗК". *Збагачення корисних копалин*. 2015. Вип. 60 (101). URL: <https://zzkk.nmu.org.ua/pdf/2015-60-101/06.pdf> (дата звернення: 19.08.2022).

11. Племянніков М.М., Жданюк Н.В. Феросилікатні склокристалічні матеріали на основі відходів рудозбагачення. *Питання хімії і хімічної технології*. 2021. №. 2. С. 95—103. <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2021-135-2-95-103>
12. Реєстр місць видалення відходів в Дніпропетровській області. *Дніпропетровська обласна державна адміністрація*: вебсайт. URL: <https://adm.dp.gov.ua/storage/app/media/EKOLOGIA/MVV-REESTR-20-08-2021.pdf> (дата звернення 19.08.2022).
13. Тарасова Т.В., Губіна В.Г., Квашук Л.П., Горлицький Б.О., Еременко М.М. Промислові відходи України. Проблеми та шляхи їх вирішення. Київ: Логос, 2011. 200 с.
14. Утворення відходів за класифікаційними угрупованнями Державного класифікатора відходів. *Державна служба статистики України*. вебсайт. URL: <https://ukrstat.gov.ua/> (дата звернення 19.08.2022).
15. Федорова И.А., Евтехов В.Д. Гранулометрический состав отходов обогащения Северного горнообогатительного комбината Криворожского бассейна. *Геол.-минерал. вісник*. 2001. № 1. С. 38—45.
16. Francis Atta Kuranchie, Sanjay Kumar Shukla, Daryoush Habibi, Alireza Mohyeddin. Utilisation of iron ore tailings as aggregates in concrete. *Cogent Engineering*. 2015. 2, Iss. 1. 1083137. <https://doi.org/10.1080/23311916.2015.1083137>
17. Francis A. Kuranchie, Sanjay K. Shukla, Daryoush Habibi. Utilisation of iron ore mine tailings for the production of geopolymer bricks. *Int. J. Mining, Reclamation and Environment*. 2016. 30, Iss. 2. P. 92—114. <https://doi.org/10.1080/17480930.2014.993834>
18. Ottávio R. Carmignano, Sara S. Vieira, Ana Paula C. Teixeira, Fernando S. Lameiras, Paulo Roberto G. Brandão and Rochel M. Lago. Iron Ore Tailings: Characterization and Applications. *J. Braz. Chem. Soc.* 2021. 32, No. 10. pp. 1895—1911. <https://doi.org/10.21577/0103-5053.20210100>
19. Flávio Fonseca do Carmo, Luciana Hiromi Yoshino Kamino, Rogério Tobias Junior, Iara Christinade Campos, Felipe Fonseca do Carmo, Guilherme Silvino, Kenedy Junio da Silva Xavier de Castro, Mateus Leite Mauro, Nelson Uchoa Alonso Rodrigues, Marcos Paulo de Souza Miranda, Carlos Eduardo Ferreira Pinto. Fundão tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context. *Perspectives in Ecology and Conservation*. 2017. 15, Iss. 3. pp. 145—151. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2017.06.002>
20. Luiz Henrique Silva Rotta, Enner Alcântara, Edward Park, Rogério Galante Negri, Yunung Nina Lin, Nariane Bernardo, Tatiana Sussel Gonçalves Mendes, Carlos Roberto Souza Filho. The 2019 Brumadinho tailings dam collapse: Possible cause and impacts of the worst human and environmental disaster in Brazil. *Int. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2020. 90. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102119>

Надійшла 19.08.2022

REFERENCES

1. (2022) *Production of industrial products by types*. State Statistics Service of Ukraine: website [in Ukrainian]. URL: <https://www.ukrstat.gov.ua/> (Last accessed: 12.08.2022).
2. Hubin, H.V., Oliynyk, T.A., Kushniruk N.V. and Shestakova, K.M. (2010), *Enrichment of minerals*, Vol. 41(82)-42(83), Dnipro, UA [in Ukrainian]. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/168413211.pdf> (Last accessed: 12.08.2022).
3. Hubina, V.H. (1998), *Coll. sci. pap. Mekhanobrchermet "News in technology, technique and economics of processing of mineral raw materials"*, Pt 2, Kryvyi Rih, UA, pp. 87-97 [in Russian].
4. Hubina, V.H. and Horlytskyi, B.O. (2010), *Iron-containing waste of Ukraine: state and prospects of use*, Logos, Kyiv, UA, 200 p. [in Ukrainian].
5. Hubina, V.H. and Zaborovsky, V.S. (2015), *Geochemistry and ore formation*, Vol. 35, Kyiv, UA, pp. 56-62 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/gof.2015.35.056>
6. Hubina, V.H. and Kadoshnikov, V.M. (2004), *Geochemistry and ecology*, Vol. 10, Kyiv, UA, pp. 78-81 [in Ukrainian].
7. Dolgova, T.I. and Smetana, N.A. (2010), *Sci. Bull. Nat. Mining University*, No. 7-8, Dnipro, UA, pp. 92-96 [in Ukrainian].
8. Evtekhov, V.D., Gritsay, E.Yu., Paran'ko, I.S., Kovalchuk, L.N., Evtekhov, E.V. and Matys, V.B. (2004), *Geology and Mineral. Bull.*, No. 2, Kryvyi Rih, UA, pp. 74-77 [in Russian].
9. Evtekhov, V.D. and Fedorova, I.A. (2001), *Geology and Mineral. Bull.*, No. 2, Kryvyi Rih, UA, pp. 81-87 [in Russian].
10. Kushniruk, N.V. and Matsyshina, I.O. (2015), *Enrichment of minerals*, Vol. 60 (101), URL: <https://zzkk.nmu.org.ua/pdf/2015-60-101/06.pdf> (Last accessed: 12.08.2022).
11. Plemynnikov, M.M. and Zhdaniuk, N.V. (2021), *Questions of Chemistry and Chemical Technology*, No. 2, Kyiv, UA, pp. 95-103 [in Ukrainian]. <http://dx.doi.org/10.32434/0321-4095-2021-135-2-95-103>
12. (2021) *Register of waste disposal sites in the Dnipropetrovsk region*. Kyiv, UA, 121 p. URL: <https://adm.dp.gov.ua/storage/app/media/EKOLOGIA/MVV-REESTR-20-08-2021.pdf> (Last accessed: 12.08.2022).
13. Tarasova, T.V., Hubina, V.H., Kvashuk, L.P., Horlytskyi, B.O. and Eremenko, M.M. (2011), *Industrial waste of Ukraine. Problems and solutions*, Logos, Kyiv, UA, 200 p. [in Ukrainian].

14. (2021) *Generation of waste according to the classification groups of the State Classifier of Waste*, Kyiv, UA, URL: <https://www.ukrstat.gov.ua/> (Last accessed: 12.08.2022).
15. Fedorova, I.A. and Evtekhov, V.D. (2001), *Geology and Mineral. Bull.*, No. 1, Kryvyi Rih, UA, pp. 38-45 [in Russian].
16. Francis Atta Kuranchie, Sanjay Kumar Shukla, Daryoush Habibi and Alireza Mohyeddin (2015), *Cogent Engineering*, Vol. 2, Iss. 1, 1083137. <https://doi.org/10.1080/23311916.2015.1083137>
17. Francis A. Kuranchie, Sanjay K. Shukla and Daryoush Habibi (2016), *Int. J. Mining, Reclamation and Environment*, Vol. 30, Iss. 2, pp. 92-114. <https://doi.org/10.1080/17480930.2014.993834>
18. Ottávio R. Carmignano, Sara S. Vieira, Ana Paula C. Teixeira, Fernando S. Lameiras, Paulo Roberto G. Brandão and Rochel M. Lago (2021), *J. Braz. Chem. Soc.*, Vol. 32, No. 10, pp. 1895-1911. <https://doi.org/10.21577/0103-5053.20210100>
19. Flávio Fonseca do Carmo, Luciana Hiromi Yoshino Kamino, Rogério Tobias Junior, Iara Christina de Campos, Felipe Fonseca do Carmo, Guilherme Silvino, Kenedy Junio da Silva Xavier de Castro, Mateus Leite Mauro, Nelson Uchoa Alonso Rodrigues, Marcos Paulo de Souza Miranda, Carlos Eduardo Ferreira Pinto (2017), *Perspectives in Ecology and Conservation*, Vol. 15, Iss. 3, pp. 145-151. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2017.06.002>
20. Luiz Henrique Silva Rotta, Enner Alcântara, Edward Park, Rogério Galante Negri, Yunung Nina Lin, Nariane Bernardo, Tatiana Sussel Gonçalves Mendes, Carlos Roberto Souza Filho (2020), *Int. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol. 90. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102119>

Received 19.08.2022

V.H. Hubina, PhD (Geology), Leading Researcher

E-mail: gvg131619@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-7486-5451>

V.V. Pokalyuk, DrSc (Geology), Leading Researcher

E-mail: pvskan@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0002-9282-0246>

V.G. Verkhovtsev, DrSc (Geology), Head of Department

E-mail: verkhovtsev@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0002-1015-6725>

V.G. Yatsenko, PhD (Geology), Head of Laboratory

E-mail: vgyatsenko@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-3498-3466>

V.S. Zaborovskiy, Researcher

E-mail: zaborovskiy@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0002-5845-7535>

State Institution "The Institute of Environmental Geochemistry
of National Academy of Sciences of Ukraine"

34-a, Acad. Palladin Ave., Kyiv, Ukraine, 03142

CHEMICAL COMPOSITION OF TAILINGS ENRICHMENT OF MAGNETITE QUARTZITES OF THE KRYVYI RIH BASIN

The major and minor element compositions of the tailings at the Kryvyi Rih processing plants (i.e., Inguletsky, ArcelorMittal Kryvyi Rih, and Central) were studied. A good relationship between the composition of the tailings and the mined ore, which was to be enriched, was confirmed. The main trends in the technogeochemical changes in the process of enrichment were determined. Differences were measured of the tailings composition between various processing plants of the Kryvyi Rih basin. That is, the tailings from the Ingulets plant are more ferruginous with an iron content of 23.7 wt % and are almost twice as high compared to those of the Central and ArcelorMittal Kryvyi Rih plants. Tailings from ArcelorMittal Kryvyi Rih are more carbonaceous and aluminous and have low iron and silicon contents. Tailings of the Central plant are more siliceous and have minimum of alumina and carbonates and have the average iron content. In terms of the major elements, the tailings are generally enriched in silicon, aluminum, manganese, magnesium, calcium, sodium, potassium, phosphorus, sulfur, and depleted in iron and titanium, compared to the original ore. In terms of minor elements, the tailings are generally enriched in the some lithophile (including rare earth) elements Sr, Y, Sc, Li, and partially Zr, and depleted in elements that are concentrated in magnetite, Ni, Th, U, and Ge, compared to the original ore. The chalcophile elements Cu, Pb, Zn, Ag are characterized by an inhomogeneous and variable distribution. The most significant among them is Zn, which can have significant concentrations (up to 230 g/t in the tailings). These results can be used to determine the directions of tailing using and to assess the impact of tailings on the environment.

Keywords: magnetite quartzite, current and lying tailings, chemical composition, microelements.