УДК 550.832.5

О. Камілова, мол. наук. співроб., В. Кулик, канд. фіз.-мат. наук,
М. Бондаренко, канд. геол. наук, А. Кетов, канд. геол. наук,
С. Дейнеко, канд. геол. наук,
Інститут Геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОГЕННИХ ЗАЛІЗОВМІСНИХ ПОРІД КОМПЛЕКСОМ РАДІОАКТИВНОГО КАРОТАЖУ (НА ПРИКЛАДІ ХВОСТОСХОВИЩА ПІВНІЧНОГО ГЗК)

(Рекомендовано членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. О.М. Карпенком)

За допомогою комплексу радіоактивного каротажу (РК) у складі нейтрон-нейтронного, гамма-гамма і гамма-каротажу виконано дослідження порід на території хвостосховища Північного гірничо-збагачувального комбінату. На основі об'єктно-адаптаційної методології РК (як сукупності відповідних методів і методик) визначено ряд петрофізичних параметрів техногенних і природних порід та оцінено вміст заліза. Показано високу ефективність та інформативність комплексу РК і його інтерпретаційно-методичного забезпечення.

Постановка задачі. Впродовж 50-ти років у Криворізькому басейні видобувають і збагачують бідні залізні руди – магнетитові кварцити [4]. Утворені при збагаченні руд відходи (хвости) складуються у спеціальні гідротехнічні споруди – хвостосховища. Вони займають великі площі (до 7,6 тис га [6]), які стають непридатними для іншої господарської діяльності людини та джерелом забруднення довкілля. Процес інфільтрації технічних вод із хвостосховищ та ставків-накопичувачів призводить до підвищення хлоридної і сульфатної мінералізації підземних вод. Крім того, щорічно навесні зі хвостосховищ скидають води в поверхневі водні об'єкти. Також відбувається забруднення повітря в результаті пилопереносу з поверхонь зневоднених площ вздовж дамб обвалування (до 2–5 т пилу за добу з 1 га поверхні) [7].

Одним зі шляхів зменшення негативного впливу на довкілля є комплексне використання відходів збагачення. Обсяг цих відходів в Кривбасі, за різними оцінками, складає від 3 до 7 млрд т і щорічно до них додається 280 млн т [4, 7]. Вони містять понад 30 цінних компонентів (у т.ч. золото і рідкісноземельні елементи) [7] і при застосуванні відповідних технологій можуть бути сировиною для подальшої переробки.

Хвостосховище Північного гірничо-збагачувального комбінату (ПГЗК, м. Кривий Ріг) є одним з найбільших в Кривбасі (площа ~1300 га, загальний обсяг ~1 млрд т [12]). Відходи збагачення, так звані "текучі хвости", надходять до хвостосховища у вигляді пульпи, яка складається з мінеральної речовини (4–6 % ваг.) і води (решта). Розмір мінеральних частинок коливається від ~0,001 мм до ~3,0 мм, середня густина сухої породи хвостів 1,6 г/см^3 [12], пористість, з урахуванням мінеральної густини скелету (див. табл.), складає ~55 %. Після скидання текучих хвостів у хвостосховищі відбувається перероз-

© Камілова О., Кулик В., Бондаренко М., Кетов А., Дейнеко С., 2013

поділ мінеральних частинок в процесі їх осаду відповідно до їх розміру і густини. Це спричиняє накопичення у лежалих хвостах магнетиту (до 12–15 % об. – в 3-5 разів вище його вмісту в текучих хвостах) і гематиту (до 15–20 % об. – в 2-4 рази вище). Такий вміст залізорудних мінералів співмірний з середнім їх вмістом у кондиційних залізних рудах Кривбасу. Хвости придамбової зони хвостосховища можна розглядати як високоякісну залізорудну сировину, готову до повторного збагачення [2]. Вміст заліза у відходах ПГЗК досягає ~20 % ваг. [7].

У таблиці наведено типовий мінеральний склад лежалих хвостів ПГЗК, визначений за допомогою мікроскопічного методу [3]. Результати доповнені нами даними про густину компонентів [5].

Таблиця 1

Мінеральний склад і густина компонентів лежалих хвостів Північного ГЗК

	кварц	магнетит	гематит	гетит	гранат	куммінгтоніт	рібекіт	егірин	біотит	міннесотаіт	селадоніт	стільпномелан	хлорит	карбонати	пірит	піротин	інші мінерали	Σ
Вміст, % об.	56,19	20,43	9,70	0,11	1,25	5,02	3,03	0,72	1,27	0,15	0,18	0,20	0,29	0,18	0,46	0,10	0,72	100
Густина, г/см^3	2,65	5,18	5,26	4,20	3,85	3,40	3,44	3,55	3,00	2,85	3,00	2,90	3,30	3,50	5,05	4,59	2,65	3,53

Через тривалу експлуатацію хвостосховища ПГЗК його заповнення досягло критичного рівня. Для розв'язання цієї проблеми нарощують дамбу хвостосховища [13] та розширюють його площу. Це вимагає оцінки інженерно-геологічних та інших параметрів хвостосховища і природного ґрунту, який служить його основою.

Частину хвостосховища ПГЗК раніше було рекультивовано, лежалі хвости закриті шаром поросłого травою ґрунту. Однак зараз на цій ділянці для збільшення об'єму хвостосховища заплановано спорудження нової дамби. Саме тут нами були виконані дослідження інженерно-геологічних та інших параметрів за допомогою комплексу радіоактивного каротажу (РК) у складі одно- і двозондового нейтрон-нейтронного (1ННК і 2ННК), гамма-гамма (ГГК) і гамма-каротажу (ГК).

Методи РК, при відповідному інтерпретаційно-методичному забезпеченні, можуть бути використані також і для оцінки вмісту деяких цінних компонентів у техногенних гірських породах, які складають хвостосховище, зокрема, заліза.

Особливості інтерпретації РК при дослідженні хвостосховища ПГЗК. Розроблена нами [10] об'єктно-адаптаційна методологія (як сукупність методів і методик у їх взаємозв'язку) визначення параметрів природних і техногенних приповерхневих порід за даними комплексу методів РК передбачає врахування особливостей досліджуваного об'єкта і пристосування метрологічного та інтерпретаційно-методичного забезпечення до цих особливостей. Важливою складовою частиною об'єктно-адаптаційної методології (ОАМ) є використання ряду критеріїв достовірності і точності параметрів порід, що визначаються.

Особливостями техногенних порід хвостосховища ПГЗК є їх висока пористість (до ~60 %), відсутність хімічно зв'язаної води і значний вміст заліза – сильного поглинача теплових нейтронів. Останнє при визначенні вологості однозондовим приладом 1ННК (як у традиційній технології) призводить до значних неконтрольованих систематичних похибок. Використання двозондового приладу 2ННК при визначенні вологості базується на тому, що відношення показів двох зондів практично не залежить від поглинальних властивостей середовища [8].

Градуювальну залежність (рис. 1) двозондового приладу ДНК-1, створеного в Інституті геофізики НАН України, отримано за даними свердловинних вимірювань нижче рівня ґрунтових вод в природних неглинистих породах різної вологості – в піску (~35-40 % об.) і торфі (~70 % об.). Інтерпретаційним параметром служить відношення показів двох зондів приладу ДНК-1 – *A*, виражене в умовних ("водяних") одиницях.

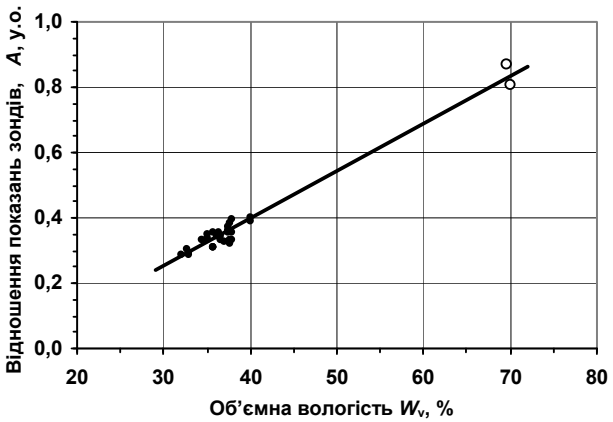

Рис. 1. Градуювальна залежність двозондового приладу ДНК-1 для визначення вологості:
● – пісок, ○ – торф

Важливим параметром, що характеризує літологічні властивості породи та вміст в ній окремих елементів (наприклад, заліза у складі відповідних мінералів), а також використовується при визначенні інших петрофізичних параметрів, є мінеральна густина скелету. Зазвичай вона визначається в лабораторних умовах пікнометричним способом [1]. Нами розроблено спосіб визначення цього параметра за даними каротажу [11]. Спосіб полягає у використанні густини, визначеної за ГГК, та вологості, визначеної за ННК + ГК. Для досліджуваної техногенної породи, яка не містить хімічно зв'язаної води, значення мінеральної густини скелету за даними РК в зоні повного водонасичення визначається за формулою:

$$\rho_s^{\text{РК}} = \frac{\rho^{\text{ГГК}} - \rho_w W_V^{\text{2ННК}}}{1 - W_V^{\text{2ННК}}}. \qquad (1)$$

Тут $\rho_s^{\text{РК}}$ – мінеральна густина скелету за комплексом РК, $\rho^{\text{ГГК}}$ – загальна густина за ГГК, ρ_w – густина води, прийнята рівною 1,00 г/см^3; $W_V^{\text{2ННК}}$ – об'ємна вологість за відношенням показів двох зондів приладу 2ННК (вологість у зоні повного водонасичення співпадає з пористістю).

Параметри техногенних порід хвостосховища ПГЗК. Результати вимірювань приладами РК і інтерпретації даних комплексу РК наведено на рис. 2. Діаграми 1-3 відображають вимірювані величини: 1 – швидкість лічби імпульсів ГК, 2 – швидкість лічби імпульсів ГГК (з урахуванням фону за ГК), 3 – відношення показів двох зондів приладу ДНК-1 (*А*, у.о.).

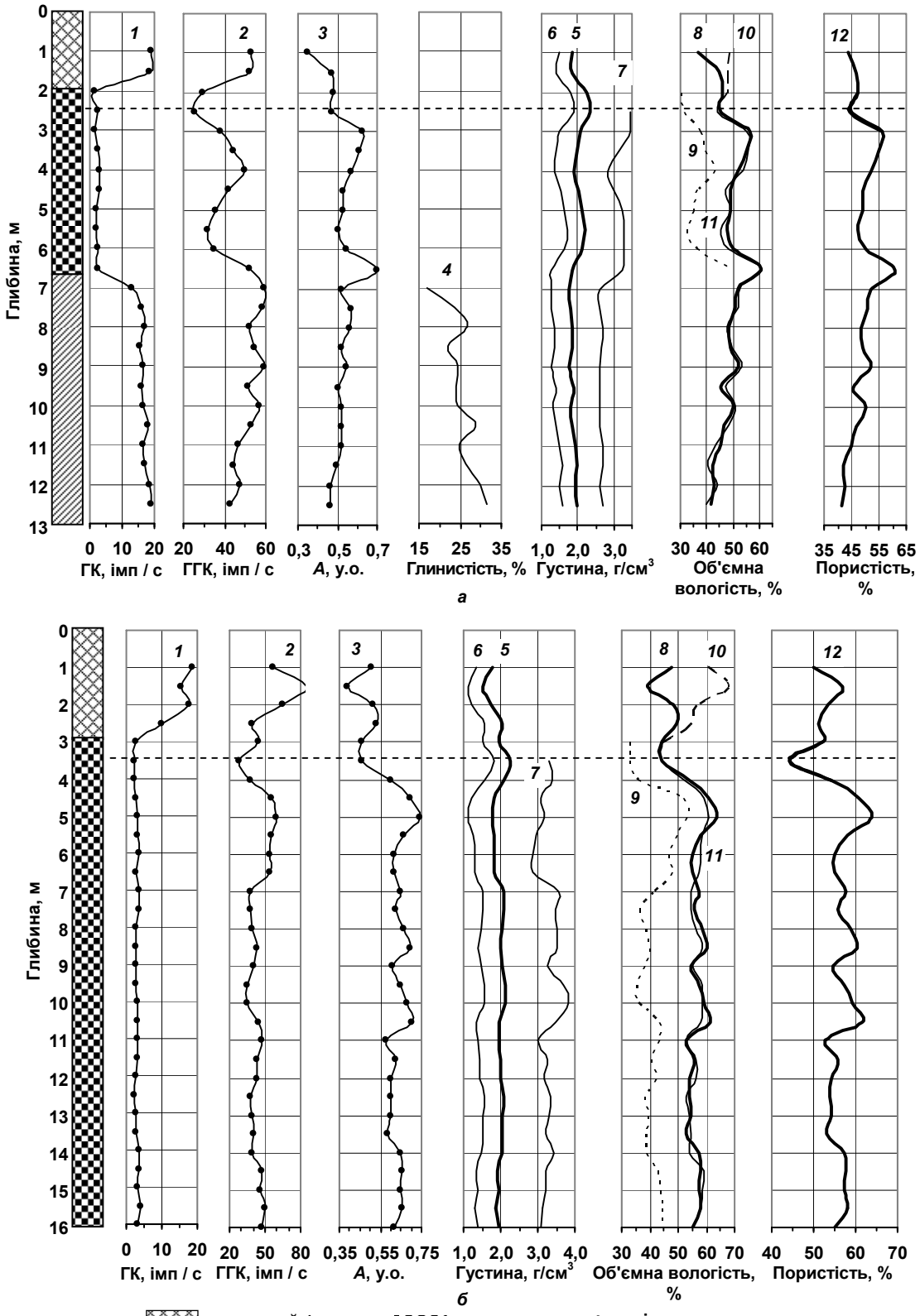

Рис. 2. Результати дослідження хвостосховища ПГЗК: а) свердловина № 1, б) свердловина № 2.
Шифр кривих: *1* – покази ГК, *2* – покази ГГК, *3* – відношення двох зондів ДНК-1, *4* – коефіцієнт глинистості за ГК, *5* – загальна густина породи за ГГК, *6* – густина сухої породи, *7* – мінеральна густина скелету породи, *8* – вологість за 2ННК, *9* – позірна вологість техногенної породи за 1ННК, *10* – фіктивна вологість породи за ГГК в зоні аерації, 11 – вологість за ГГК в зоні повного водонасичення, *12* – пористість за РК

Із рис. 2 видно, що за даними ГК чітко виділяються насипний ґрунт, техногенна порода і природна основа. При цьому радіоактивність техногенної породи в ~5 разів нижча, ніж насипного і природного ґрунту. Зона аерації і зона повного водонасичення розділяються за результатами визначень вологості в зоні аерації: 1) на основі ННК [9] ("істинна" вологість); 2) на основі ГГК (фіктивна вологість).

Загальна густина породи *5*, густина сухої породи *6* і мінеральна густина скелету *7* за результатами каротажу відповідають даним лабораторних досліджень. Об'ємні вологості в зоні повного водонасичення за даними на основі 2ННК *8* і ГГК *11* практично співпадають, тоді як вологість, визначена за 1ННК *9*, для техногенної породи нижча на ~10-20 %, тобто містить значну систематичну похибку. Пористість 12 в зоні водонасичення визначена за 2ННК, а в зоні аерації – за комплексом РК.

Оцінка вмісту заліза в лежалих хвостах ПГЗК. Для оцінки вмісту заліза в лежалих хвостах ПГЗК нами було виконано градуювання приладу ДНК-1 на побудованих в Інституті Геофізики ім. С.І. Субботіна лабораторних фізичних моделях залізовмісних порід. Робочим тілом моделі служила суміш кварцового піску і порошку гематиту.

На рис. 3 наведено градуювальні залежності – показів більшого зонду ДНК-1 (у відносних (водяних) одиницях) від вмісту заліза (% ваг.) Залежності отримані для крайніх значень об'ємної вологості W_V: максимальної (повна водонасиченість) ~45 % і мінімальної (повітряно-суха суміш) ~4 %. Порожнисті точки, отримані за результатами інтерпретації вимірювань приладом ДНК-1 на хвостосховищі ПГЗК, є оцінкою вмісту заліза у лежалих хвостах. У даному випадку він складає ~20 ваг. %, що узгоджується з літературними даними.

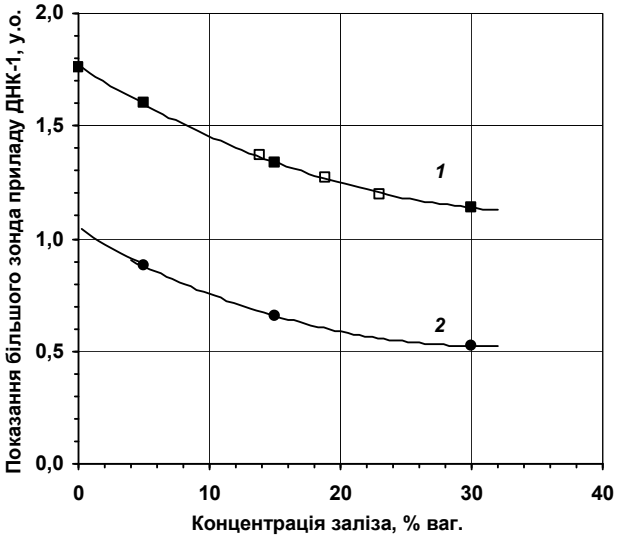

Рис. 3. Градуювальні залежності для оцінки вмісту заліза в техногенній породі приладом ДНК-1:
1 (■, □) – об'ємна вологість ~45 %, *2* (●) – ~4 %.
■, ● – вимірювання на фізичних моделях ІГФ,
□ – оцінка вмісту заліза за даними свердловинних вимірювань на хвостосховищі ПГЗК

Висновки. Отримані результати РК дозволяють: 1) виділити лежалі хвости, для яких характерна низька радіоактивність; 2) визначити сукупність параметрів, які характеризують петрофізичні властивості розрізу; 3) розділити зону повного водонасичення і зону аерації; 4) оцінити вміст заліза у лежалих хвостах.

Для розглянутих свердловинних розрізів сукупність параметрів, визначена за об'єктно-адаптаційною методологією, відповідає критеріям узгодженості. Каротажна оцінка зони аерації і повного водонасичення узгоджена з даними прямих спостережень за рівнем ґрунтових вод (див. рис. 2а, б). Отримані параметри відповідають даним лабораторних досліджень з літературних джерел.

У цілому, виконані роботи показали високу ефективність та інформативність комплексу методів РК при дослідженні техногенних залізовмісних ґрунтів – хвостосховищ ГЗК.

Список використаних джерел

1. Ґрунти. Методи лабораторного визначення фізичних властивостей: ДСТУ Б В.2.1-17: 2009. – К.: Мінрегбуд України, 2010. – 26 с. – (Національний стандарт України).

2. *Євтєхов В. Д.* Мінеральний склад хвостів Північного гірничозбагачувального комбінату / *Євтєхов В. Д., Федорова І. А.* // Геолого-мінералогічний вісник. – 2002. – № 1. – С. 90–98.

3. *Евтехов В. Д.* Топоминералогия отходов обогащения бедных железных руд Кривбасса как техногенного железорудного сырья / *Евтехов В. Д., Федорова И. А.* // Геолого-мінералогічний вісник.– 2001.– № 2. – С. 81–87.

4. *Евтехов Е. В.* Влияния условий складирования лежалых хвостов на качество техногенных железных руд Криворожского бассейна / *Евтехов Е. В.* // Геолого-мінералогічний вісник. – 2004. – № 1. – С. 31–39.

5. *Костов И.* Минералогия / *Костов И.* – М.: Мир, 1971. – 584 с.

6. *Малахов И. Н.* Качество жизни: опыт экологического прочтения / *Малахов И. Н.* – Кривой Рог: Вежа, 1999. – 158 с.

7. Оцінка можлвиості використання відходів збагачення залізистих кварцитів в народному господарстві / *Губіна В. Г., Кадошніков В. М., Заборовський В. С.* [та ін.] // Збірник наукових праць Інституту геохімії навколишнього середовища. – 2009. – Вип. 17. – С. 79–92.

8. Патент України на винахід № 100911. Спосіб визначення параметрів природних і техногенних ґрунтів за допомогою радіоізотопного каротажу та пристрій для його здійснення / *Кулик В. В., Старостенко В. І., Нестеренко Г. Ф.* [та ін.]; заявник і патентовласник ІГФ НАНУ. – № a201103180; заявл. 18.03.11; опубл. 11.02.13, Бюл № 3.

9. Патент України на корисну модель № 66364. Спосіб визначення вологості піщано-глинистих ґрунтів у зоні аерації на основі нейтрон-нейтронного каротажу / *Бондаренко М. С., Кулик В. В.*; заявник і патентовласник ІГФ НАНУ. – № u201110720; заявл. 06.09.11; опубл. 26.12.11, Бюл № 24.

10. Принципові положення нової технології дослідження природних і техногенних ґрунтів комплексом радіоізотопного каротажу / *Кулик В. В., Бондаренко М. С., Кетов А. Ю.* [та ін.] // Наука та інновації. – 2012. – Т. 8, № 6. – С. 26–39.

11. Спосіб визначення мінеральної густини скелету гірських порід / *Кулик В. В., Бондаренко М. С., Камілова О. В;* заявник ІГФ НАНУ. Заявка на патент на винахід № a201208338 від 06.07.12.

12. *Федорова И. А.* Технологическая минералогия отходов обогащения Северного горно-обогатительного комбината Криворожского бассейна: автореф. дис. на соиск. уч. степени канд. геол. наук: спец. 04.00.20 "Минеенералогия, кристаллография" / *Федорова И. А.* – Кривой Рог. – 2004. – 20 с.

13. *Шерстюк Н. П.* Воздействия горнодобывающей промышленности на природно-техногенные ландшафты и его элементы на примере СевГОКа (Кривбасс) / *Шерстюк Н. П., Власова И. А* // Геолого-мінералогічний вісник. – 1999. – № 2. – С. 78–80.

Надійшла до редколегії 05.12.12

О. Камилова, млад. науч. сотр., В. Кулик, канд. физ.-мат. наук,
М. Бондаренко, канд. геол. наук, А. Кетов, канд. геол. наук,
С. Дейнеко, канд. геол. наук
Институт Геофизики им. С.И. Субботиіна НАН Украины, Киев

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОГЕННЫХ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ ПОРОД КОМПЛЕКСОМ РАДИОАКТИВНОГО КАРОТАЖА (НА ПРИМЕРЕ ХВОСТОХРАНИЛИЩА СЕВЕРНОГО ГОК)

С помощью комплекса радиоактивного каротажа (РК) в составе нейтрон-нейтронного, гамма-гамма и гамма- каротажа выполнено исследование пород на территории хвостохранилища Северного горно-обогатительного комбината. На основе объектно-адаптационной методологии РК (как совокупности соответствующих методов и методик) определен ряд петрофизических параметров техногенных и естественных пород и оценено содержание железа. Показана высокая эффективность и информативность комплекса РК и его интерпретационно-методического обеспечения.

O. Kamilova, Junior researcher,V. Kulyk, Cand. Sci. (Phys.-Math.),
M. Bondarenko, Cand. Sci. (Geol.), A. Ketov, Cand. Sci. (Geol.),
S. Deineko, Cand. Sci. (Geol.)
Institute of Geophysics National Academy of Science of Ukraine, Kyiv

DETERMINATION OF PARAMETERS OF TECHNOGENIC IRON-BEARING ROCKS BY COMPLEX RADIOACTIVE LOGGING (BY THE EXAMPLE OF TAILING DUMP OF NORTHERN MINE AND CONCENTRATOR COMPLEX)

By means of a complex radioactive logging (RL) made up a neutron-neutron, gamma-gamma and gamma logging is executed research of rocks in the territory of tailing dump of Northern mine and concentrator complex. On the basis of objective and adaptable of RL-methodology (as sets of the corresponding methods and techniques) a number of petrophysical parameters of technogenic and natural rocks is determined and the content of iron is estimated. High efficiency and informativity of a RL-complex and its interpretative and methodical providing is shown.