

© Кривенко В.В.¹, Чупринов Є.В.², Олійник Т.А.³, Харітонов В.М.⁴,
Реков Ю.В.⁵

**ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПРОБИ
ЕФІОПСЬКОЇ ЗАЛІЗНОЇ РУДИ АРАВІЙСЬКО-НУБІЙСЬКОГО ЩИТА.
ЧАСТИНА 1. ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЧОВИННОГО СКЛАДУ ПРОБИ РУДИ**

Виконано ситовий аналіз матеріалу вихідної проби залізної руди із аравійсько-нубійського щита, що надійшов на дослідження. Проведений хімічний аналіз різних проб на вміст загального заліза та кремнію показав рівномірний розподіл компонентів по класам. Виконаний первинний огляд уламків +5 мм, котрий показав, що вони складаються, в основному, з двох компонентів – відокремлення кварцу і цементу, що їх зв'язує. За результатами аналізу виділено чотири типи уламків за вмістом цементу, котрий представлений сурико-охристо-глинистим цементом: мало-глиниста зі вмістом 5-10% цементу, середньо-глиниста зі вмістом 10-50% цементу, глиниста зі вмістом більше 50% цементу і убого-глиниста. Проведена рудорозборка матеріалу із виділенням п'яти мінералого-петрологічних різновидів.

Ключові слова: залізна руда, аравійсько-нубійський щит, рудорозборка, мінералогія, вміст заліза.

V.V. Krivenko, E.V. Chuprinov, T.A. Oliinyk, V.M. Haritonov, Y.V. Rekov. Study of technological properties of the sample ethiopian iron ore of the arabian-nubian shield. Part I. Study of the substance composition of the ore sample. A literary analysis of the presented studies of the Arabian-Nubian shield, its history of formation and geological features was performed. It was found that the iron ores of Ethiopia have a certain technological value, but the technological expediency of their enrichment should be confirmed by relevant studies. A sample of iron ore from an Ethiopian deposit was received and prepared for research. Preparation and work with the samples took place in accordance with the state standards of Ukraine. A sieve analysis of the material of the original sample of iron ore from the Arabian-Nubian shield, which was received for research, was performed. It was found that the genetically studied raw material is a product of chemical weathering of the original volcanic-sedimentary rock. The structure of the rock is fine-grained, oolitic, sometimes hornblende, porphyry, rarely psammitic and psephytic. The texture is powdery, mottled, in some places conglomerate-like, breccia-like, hollow, interspersed, almond-like. The chemical analysis of various samples for the content of total iron and silicon showed an even distribution of components by class. An initial examination of +5 mm fragments was performed, which showed that they consist mainly of two components - the separation of quartz and the cement that binds them. Based on the results of the analysis, four types of fragments were distinguished by the content of cement, which is represented by suric-ochre-clay cement: low-clay with a content of 5-10% cement, medium-clay with a content of 10-50% cement, clay with a content of more than 50% of cement and poor clay. The ore separation of the material was carried out, with the selection of five mineralogy-petrological varieties. The mineral composition is mainly represented by dispersed hematite, hydrohematite and quartz. There is also goethite, hy-

¹ канд. техн. наук, доцент, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID: 0000-0001-7822-6358, yvkrivenko2017@gmail.com

² канд. техн. наук, доцент, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID: 0000-0001-8605-3434, itchupa@gmail.com

³ д-р техн. наук, професор, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, ORCID: 0000-0002-0315-7308

⁴ канд. техн. наук, доцент, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг

⁵ канд. техн. наук, доцент, Технічний університет «Метінвест Політехніка», м. Запоріжжя

drogoethite, kaolinite and calcite. A single phenocryst of chalcopyrite was noted. The conclusions reached regarding the mineralogical and petrographic composition of the presented ore provide a basis for further electron-microscopic studies and analysis of the ore for the possibility of its enrichment.

Key words: iron ore, Arabian-Nubian shield, ore mining, mineralogy, iron content.

Постановка проблеми. На сьогоднішній день українська металургія переживає дуже складні часи. Проведення досліджень та розробка нових технологічних рішень надзвичайно ускладнені, а науковий потенціал не може себе реалізувати в повній мірі. В таких умовах можливим рішенням для продовження та розвитку науки буде залучення українських науковців до роботи над проектами за межами України. Прикладом такої роботи є представлене дослідження. Крім того, масштабного промислового видобутку, збагачення та перероблення залізних руд Ефіопії сьогодні не відбувається, тому дослідження відповідних проб може стати відповідним технологічним фундаментом для майбутніх робіт.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На протязі останніх 30 років Ефіопія була доволі політично нестабільною державою, тому проведення комплексних досліджень щодо залізних руд цієї країни було дуже ускладнено. Крім того, в літературі є дуже незначна кількість авторитетних джерел, роботи котрих були б присвячені родовищам залізних руд Ефіопії. Тим не менше, в роботі [1] детально проаналізовані родовища корисних копалин Ефіопії та надана характеристика родовищ залізних руд. Останній комплексний аналіз металургійної промисловості Ефіопії [2] відмічає її кризовий стан, що з малою ймовірністю вдасться подолати власними силами, тож долучення іноземних спеціалістів є найбільш оптимальним шляхом. В роботі [3] проведено аналіз генезису аравійсько-нубійського щита, надана інформація щодо особливостей її формування, типів руд, що утворились та їх властивостей. Особливої уваги також заслуговують дослідження геолого-петрографічних вулканогенних хребтів, проведені у роботі [4]. Аналогічні експедиційні дослідження були представлені дослідженням [5], де вивчались руди тектонічних зв'язків Данакільської западини с Африканської рифтової системи та з рифтом Червоного моря, та були представлені зв'язки між тектонікою та магматологією основних петрологічних та ізотопних даних з різних вулканічних одиниць північної Данакільської западини. Детальний аналіз ефіопських залізних руд представлений в роботі [6], де виконаний огляд різних типів порід різного походження, з особливою увагою до офіолітових і концентрично-зональних комплексів аляскинського типу.

Мета статті – дослідити пробу залізної руди ефіопського родовища із аравійсько-нубійського щита, проаналізувати її структуру та мінералогічний склад.

Виклад основного матеріалу. На дослідження надійшла проба залізородної сировини, ймовірно, вулканогенно-осадового, вулканогенного генезису, що зазнала хімічного вивітрювання. Загальний вигляд шматкового матеріалу вихідної проби крупністю +60,0+0,0 мм наведено на рис. 1.



а



б

Рис. 1 – Матеріал вихідної проби: а – загальний вид; б – окремі уламки

Гранулометричний, хімічний та мінералогічний аналізи проби залізорудної сировини виконувались відповідно до ДСТУ 3792-98 «Руди залізні та концентрати. Метод визначення мінералогічного типу». Відбір проб для хімічного аналізу виконувався відповідно до ДСТУ ISO 7764:2008 «Руди залізні. Готування попередньо висушених випробних проб для хімічного аналізу». Хімічний та мінералогічний аналіз матеріалу проб супроводжувався мікрофотознімками та мікроскопічним вивченням матеріалу. Гранулометричний (ситовий) аналіз виконувався відповідно до ДСТУ 3210-95 «Руди залізні та марганцеві, концентрати, агломерати та окатиші. Визначення гранулометричного складу методом ситового аналізу».

Ситовий аналіз матеріалу вихідної проби наведено у таблиці 1. Розмір основної частини уламків (понад 87%) перевищує 20,0 мм. Хімічний аналіз на загальне залізо і оксид кремнію показав, що ці хімічні компоненти за класами крупності розподілені рівномірно. Масова частка $Fe_{заг}$ у пробі становила 36,47%, SiO_2 – 29,96%.

Первинний огляд уламків +5 мм досліджуваної сировини показав, що вони складаються, в основному, з двох компонентів – відокремлення кварцу (зерна, уламки – окатані і гострокутні) і цементу, що їх сполучає. Має місце два типи цементу: – сурико-охристо-глинистий (дисперсногематит-каолінітовий, гетит-гідрогетит-каолінітовий) блідо-рожевого, світло-жовтого або світло-сірого кольору та кремністо-суриковий (гетит-кварц-дисперсногемат; гетит-дисперсно-гематитовий) жовто-червоного, червоного кольору з бурим відтінком. Також було встановлено, що глинистий цемент має підлегле значення та зустрічається в уламках у різних кількостях. У зв'язку з цим було виділено чотири різновиди уламків:

- 1) мало-глинисті, що містять 5-10% сурико-охристо-глинистого цементу;
- 2) середньо-глинисті, що містять 10-50% сурико-охристо-глинистого цементу;
- 3) глинисті, що містять більше 50% сурико-охристо-глинистого цементу;
- 4) убого-глинисті, що містять до 5% сурико-охристо-глинистого цементу; також для цього різновиду характерним є більший розмір і кількість кварцових відокремлень порівняно з іншими різновидами.

Таблиця 1

Ситовий аналіз матеріалу вихідної проби залізорудної сировини

Клас крупності, мм	Вихід, %	Масова доля, %		Вилучення, %	
		$Fe_{заг}$	SiO_2	$Fe_{заг}$	SiO_2
+40,0	48,52	36,1	30,16	48,03	48,84
20,0-40,0	38,89	36,7	29,82	39,14	38,71
10,0-20,0	6,30	38,5	28,36	6,65	5,96
5,0-10,0	2,07	37,5	29,02	2,13	2,00
3,0-5,0	2,03	35,6	30,92	1,99	2,10
1,0-3,0	1,32	34	33,46	1,23	1,47
0,5-1,0	0,17	33,2	34,06	0,16	0,19
0,25-0,5	0,22	34	34,5	0,2	0,26
0,1-0,25	0,22	36,1	30,18	0,22	0,22
0,071-0,1	0,05	36,2	29,88	0,05	0,05
0-0,071	0,21	36,4	28,98	0,2	0,20
Всього	100,00	36,47	29,96	100,00	100,00

Різко-підлегле значення у матеріалі вихідної проби мають переважно кварцові уламки – фрагменти великих кварцових відокремлень. Вони були віднесені до п'ятого різновиду, їхньою відмінністю є незначна домішка (кілька десятих часток відсотка) дисперсного гематиту, частинки якого зосереджені частіше на поверхні кварцових уламків.

Подальше вивчення матеріалу проводилося методом рудорозборки із п'яти мінералогічних різновидів. На рудорозбірку було спрямовано чотири верхні класи: +40,0 мм; 20-40 мм; 10-20 мм; 5-10 мм. Результати показані в таблицях 2-5 та на рис. 2-5.

Таблиця 2

Мінералого-петрологічний склад матеріалу верхніх класів вихідної проби залізорудної сировини

Різновиди	Вихід різновидів (мас. %)			
	класи крупності, мм			
	+40,0	20-40	10-20	5-10
I – мало-глиниста	40,71	24,90	24,48	15,36
II – середньо-глиниста	14,53	13,69	13,91	13,35
III – глиниста	1,48	1,43	4,39	13,09
IV – убого-глиниста	43,28	44,65	52,87	46,37
V – уламки кварцу	0,00	15,33	4,35	11,83

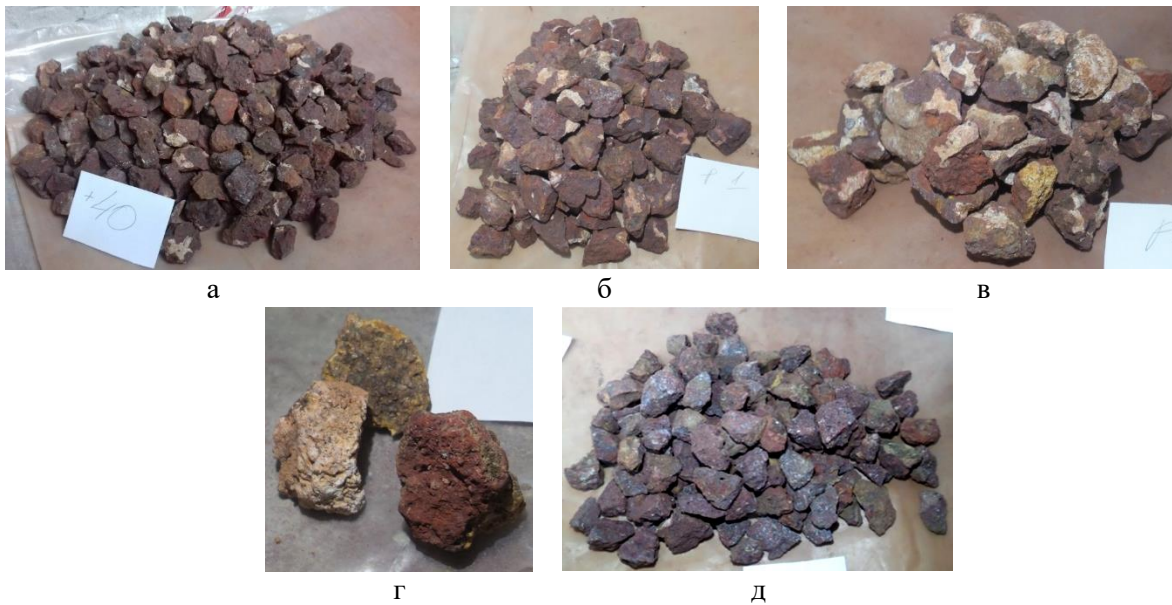


Рис. 2 – Матеріал класу крупності +40,0 мм: а – загальний вигляд; б-д – мінералого-петрологічні різновиди: б – мало-глинистий; в – середньо-глинистий; г – глинистий; д – убого-глинистий



Рис. 3 – Матеріал класу крупності 20-40 мм: а – загальний вигляд; б-д – мінералого-петрологічні різновиди: б – мало-глинистий; в – середньо-глинистий; г – глинистий; д – убого-глинистий, е – уламки кварцу

Таблиця 3

Мінеральний склад мінералого-петрологічних різновидів,
що складають матеріал верхніх класів вихідної проби залізорудної
сировини крупності 20-40 мм, визначений у світлі, що проходить

Індекс проб	Мінерали					Сума
	диспергований гематит + гідрогематит	гетит + гідрогетит	глинистий мінерал	кварц	кальцит	
мало-глиниста						
1_1	69,7	3,1	6,5	20,7	н.в.	100,0
1_2	66,3	5,5	5,7	22,5	н.в.	100,0
середнє	68,0	4,3	6,1	21,6	н.в.	100,0
середньо-глиниста						
2_1	37,7	3,5	37,1	21,7	н.в.	100,0
2_2	32,8	7,3	35,6	24,3	н.в.	100,0
2_3	45,3	5,7	27,8	21,2	н.в.	100,0
середнє	38,6	5,5	33,5	22,4	н.в.	100,0
глиниста						
3_1	н.в.	н.в.	н.в.	н.в.	н.в.	н.в.
3_2	н.в.	н.в.	н.в.	н.в.	н.в.	н.в.
середнє	н.в.	н.в.	н.в.	н.в.	н.в.	н.в.
убого-глиниста						
4_1	64,1	2,6	2,2	31,1	н.в.	100,0
4_2	62,8	3,8	0,7	32,7	н.в.	100,0
4_3	63,3	3,2	3,1	30,4	н.в.	100,0
середнє	63,4	3,2	2,0	31,4	н.в.	100,0



а



б



в



г



д



е

Рис. 4 – Матеріал класу крупності 10-20 мм: а – загальний вигляд; б-д – мінералого-петрологічні різновиди: б – мало-глинистий; в – середньо-глинистий; г – глинистий; д – убого-глинистий, е – уламки кварцу

Таблиця 4

Мінеральний склад мінералого-петрологічних різновидів,
що складають матеріал верхніх класів вихідної проби залізорудної
сировини крупності 10-20 мм, визначений у відбитому світлі

Індекс проб	Мінерали					Сума
	диспергований гематит + гідрогематит	гетит + гідрогетит	глинистий мінерал	кварц	кальцит	
мало-глиниста						
1_1	66,5	3,3	6,3	21,1	2,8	100,0
1_2	64,2	5,7	6,4	21,3	2,4	100,0
середнє	65,4	4,5	6,3	21,2	2,6	100,0
середньо-глиниста						
2_1	34,4	3,9	37,9	20,7	3,1	100,0
2_2	27,6	7,8	35,3	26,5	2,8	100,0
2_3	42,1	5,4	26,7	22,4	3,4	100,0
середнє	34,7	5,7	33,3	23,2	3,1	100,0
глиниста						
3_1	3,5	3,5	87,9	5,1	0	100,0
3_2	1,7	3,9	89,9	4,5	0	100,0
середнє	2,6	3,7	88,9	4,8	0,0	100,0
убого-глиниста						
4_1	61,3	2,7	3,1	32,2	0,7	100,0
4_2	60,1	3,4	1,3	34,1	1,1	100,0
4_3	61,9	2,9	3,4	29,7	2,1	100,0
середнє	61,1	3,0	2,6	32,0	1,3	100,0

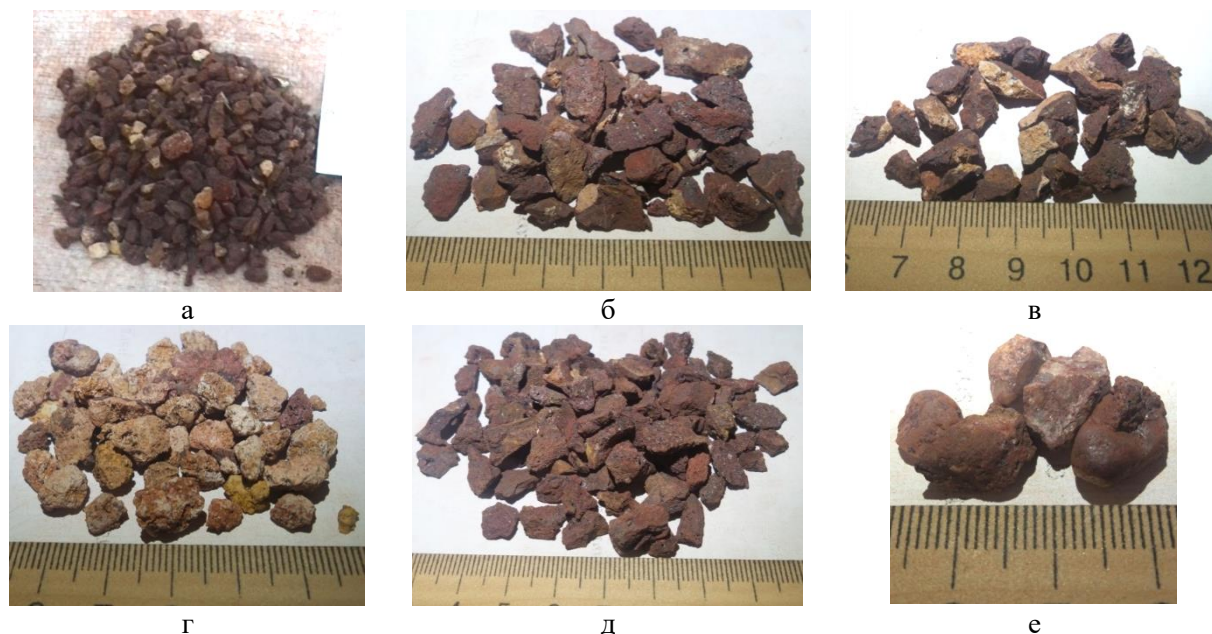


Рис. 5 – Матеріал класу крупності 5-10 мм: а – загальний вигляд; б-д – мінералого-петрологічні різновиди: б – мало-глинистий; в – середньо-глинистий; г – глинистий; д – убого-глинистий, е – уламки кварцу

Таблиця 5

Середній мінеральний склад мінералого-петрологічних різновидів, що складають матеріал верхніх класів вихідної проби залізородної сировини крупності 5-10 мм, визначений у прозорих та полірованих препаратах

Індекс проб	Мінерали					Сума
	диспергований гематит + гідрогематит	гетит + гідрогетит	глинистий мінерал	кварц	кальцит	
мало-глиниста						
1_1	66,7	3,2	6,4	20,9	2,8	100,0
1_2	64,0	5,6	6,1	21,9	2,4	100,0
середнє	65,4	4,4	6,3	21,4	2,6	100,0
середньо-глиниста						
2_1	34,5	3,7	37,5	21,2	3,1	100,0
2_2	28,7	7,6	35,5	25,4	2,8	100,0
2_3	41,9	5,6	27,3	21,8	3,4	100,0
середнє	35,3	6,6	31,4	23,6	3,1	100,0
глиниста						
3_1	3,5	3,5	87,9	5,1	0,0	100,0
3_2	1,7	3,9	89,9	4,5	0,0	100,0
середнє	2,6	3,7	88,9	4,8	0,0	100,0
убого-глиниста						
4_1	62,3	2,7	2,7	31,7	0,7	100,0
4_2	60,9	3,6	1,0	33,4	1,1	100,0
4_3	61,5	3,1	3,3	30,1	2,1	100,0
середнє	61,2	3,4	2,1	31,7	1,6	100,0

Висновки

1. Генетично вивчена сировина є продуктом хімічного вивітрювання вихідної вулканогенно-осадової породи. Структура породи дрібнозерниста, оолітова, місцями роговова, порфірова порфіроподібна, рідше псаммітова та псефітова. Текстура – порошоква, плямиста, місцями конгломератоподібна брекчіеподібна, пустотна, вкраплена, мигдалекам'яна.

2. Мінеральний склад представлений, в основному, дисперсним гематитом (Fe_2O_3), гідрогематитом ($Fe_2O_3 \cdot nH_2O$) та кварцем (SiO_2). Також є гетит ($FeOOH$), гідрогетит ($FeOOH \cdot nH_2O$), каолініт ($Al_2[Si_2O_5](OH)_4$) і кальцит ($Ca_2[CO_3]$). Відзначено одиничний вкрапленник халькопіриту ($CuFeS_2$).

3. Виконана рудорозборка представленої проби та проведений мінералого-петрологічний аналіз проб різної крупності.

4. Наступним етапом роботи буде виконання електронно-мікроскопічного аналізу сировини та опис властивостей мінералів, що присутні в дослідженій пробі залізної руди.

Перелік використаних джерел:

- Ghebre W.M. Opportunities for iron resources development in Ethiopia / W.M. Ghebre // The Seventh International Conference on the Geology of Africa. – November, 2013. – Pp. 15-29.
- Zeherudin I. Study of development of iron ore and metallurgy industries: challenges, prospects and policy/strategy options / I. Zeherudin, A. Baraki, H. Berhe // FDRE, Policy Study and Research Center. – Addis Ababa, Ethiopia, 2017. – 175 p.
- Abd El-Wahed M. Genesis of the gneissic core complexes in the Arabian-Nubian Shield and its tectonic implications: A regional overview / M. Abd El-Wahed, M. Attia // Journal of Asian Earth Sciences. – 2022. – Volume 236. – Article 105337. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2022.105337>.
- De Fino M. Geology and volcanology of the Edd-Bahar Assoli area (Ethiopia) / M. De Fino, L. La Volpe, L. Lirer // Bulletin Volcanologique. – 1978. – Vol. 41 – Pp. 32-42(1978). – Mode of access:

cess: <https://doi.org/10.1007/BF02597681>.

5. Relations between Tectonics and Magmatology in the Northern Danakil Depression (Ethiopia) / F. Barberi, S. Borsi, G. Ferrara, G. Marinelli, J. Varet // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. – 1970. – Article 267. – Pp. 292-311. – (Series A. Mathematical and Physical Sciences).
6. Ahmed H. Magmatic (Orthomagmatic) Deposits (Ore Deposits Associated with Mafic–Ultramafic Complexes). In: *Mineral Deposits and Occurrences in the Arabian-Nubian Shield* / H. Ahmed // *Earth and Environmental Sciences Library*. – 2022. – Pp. 89-165. – 512 p. – Mode of access: https://doi.org/10.1007/978-3-030-96443-6_3.

References:

1. Wondafrash Mammo Ghebre. Opportunities for iron resources development in Ethiopia. *The Seventh International Conference on the Geology of Africa*, 2013, pp. 15-29.
2. Zeherudin I., Baraki A., Berhe H. Study of development of iron ore and metallurgy industries: challenges, prospects and policy/strategy options. Ethiopia, 2017. 175 p. (Eng.)
3. Abd El-Wahed M., Attia M. Genesis of the gneissic core complexes in the Arabian-Nubian Shield and its tectonic implications: A regional overview. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2022, vol. 236, article 105337. doi: 10.1016/j.jseaes.2022.105337.
4. De Fino M., La Volpe L., Lirer L. Geology and volcanology of the Edd-Bahar Assoli area (Ethiopia). *Bulletin Volcanologique*, 1978, vol. 41, pp. 32-42 (1978). doi: 10.1007/BF02597681.
5. Barberi F., Borsi S., Ferrara G., Marinelli G., Varet J. Relations between Tectonics and Magmatology in the Northern Danakil Depression (Ethiopia). *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1970, article 267, pp. 292-311.
6. Ahmed H. Magmatic (Orthomagmatic) Deposits (Ore Deposits Associated with Mafic–Ultramafic Complexes). In: *Mineral Deposits and Occurrences in the Arabian-Nubian Shield*. *Earth and Environmental Sciences Library*, 2022. 512 p. doi: 10.1007/978-3-030-96443-6_3.

Рецензент: В.Й. Засельський,
д-р техн. наук, проф., ННТІ ДУЕТ

Стаття надійшла 23.04.2022