

## МІНЕРАЛОГО-ГЕОХІМІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ БІСМУТУ В ПРОТЕРОЗОЙСЬКИХ РУДОНОСНИХ СТРУКТУРАХ ЗАХІДНОЇ ЧАСТИНИ ІНГУЛЬСЬКОГО МЕГАБЛОКУ (УКРАЇНСЬКИЙ ЩИТ)

**С.М. Бондаренко**<sup>1</sup>

E-mail: sbond.igmr@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7948-3583>

**В.О. Сьомка**<sup>1</sup>

<https://orcid.org/0000-0001-5202-4045>

**Л.М. Степанюк**<sup>1</sup>

<https://orcid.org/0000-0001-5591-5169>

**О.В. Грінченко**<sup>2</sup>

E-mail: alexgrin@univ.kiev.ua, <https://orcid.org/0000-0003-3030-1720>

**Б.Н. Іванов**<sup>3</sup>

**В.М. Бельський**<sup>1</sup>

<https://orcid.org/0000-0001-7990-1386>

<sup>1</sup> Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення імені М.П. Семененка НАН України, 03142, просп. акад. Палладіна, 34, Київ, Україна

<sup>2</sup> Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Навчально-науковий інститут «Інститут геології», 03022, вул. Васильківська, 90, Київ, Україна

<sup>3</sup> ПЗЕ №46, КП «Кіровогеологія», 55222, с. Підгородня, Первомайський р-н, Миколаївська обл., Україна

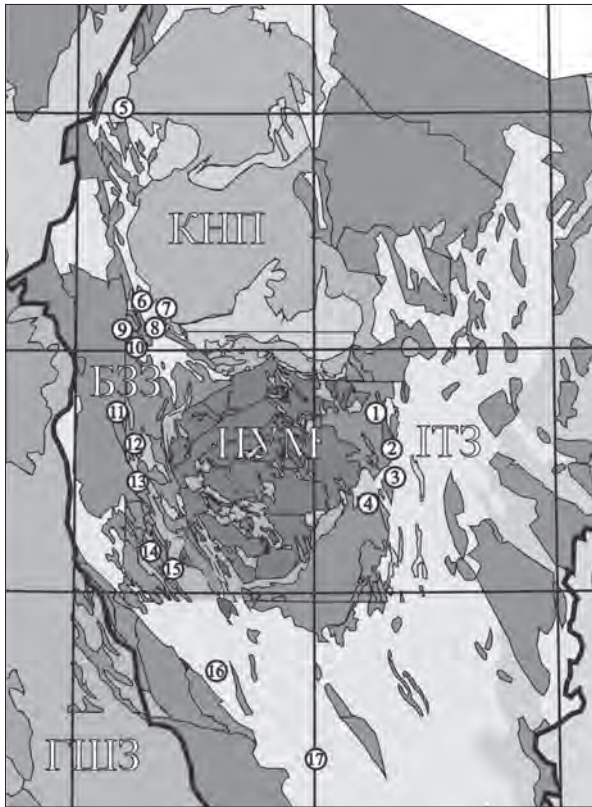
Узагальнено інформацію щодо мінералогії та геохімії бісмуту в протерозойських рудоносних структурах Західної частини Інгульського мегаблоку (Братсько-Звенигородська та Інгуло-Тясминська (Кіровоградська) структурно-металогенічні зони). Розглянуто мінералого-геохімічні особливості поведінки цього металу в деяких золоторудних, уранових, рідкіснометалевих родовищах району. Показано, що за досить низького вмісту (5–60 г/т) бісмут є типовим металом рудних об'єктів калій-уранової формації та рідкіснометалевих пегматитів Полохівського і Станкуватського рудних полів. Уперше визначено мінеральні форми бісмуту (самородний бісмут, Рb-бісмутин, галенобісмутин) у рудопрові Обгінний, де зафіксовані аномально високі значення вмісту (до 0,8–1,3 %). Геохімічною особливістю багатьох золоторудних об'єктів району є майже повне домінування сполук бісмуту з телуром. У системі Ві-Те виявлені такі індивідуалізовані фази: хедлейт ( $\text{Bi}_7\text{Te}_3$ ), телуробісмутит ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ), цумойт ( $\text{BiTe}$ ), пільзеніт ( $\text{Bi}_4\text{Te}_3$ ), жозейт-В ( $\text{Bi}_4(\text{S},\text{Te})_3$ ). У скарнах Бандурківського рудопрояву рання продуктивна асоціація є такою: мальдоніт + жозейт-В + тетрадиміт, а пізня — самородне золото + бісмутин. Сульфосоли бісмуту в різних рудних об'єктах присутні у складі сульфідної Cu-Ag-Bi та Pb-Ag-Bi мінералізації.

**Ключові слова:** бісмутин, самородний бісмут, мінералізація, телуриди, рудоносні структури, Інгульський мегаблок.

**Вступ.** У докембрійських породах Українського щита (УЩ) бісмут є надзвичайно рідкісним халькофільним елементом. Кларк його складає всього  $(1-3) \times 10^{-5}$  %. Найвідоміший рудний об'єкт у межах УЩ з промисловим вмістом бісмуту — Вербинське родовище молібдену, яке знаходиться

в Волинському мегаблоці [11]. До унікальних для України слід віднести прояви Ві-Те-Se-S мінералізації у вулканітах пліоценового віку Вигурлат-Гутинського пасма на Закарпатті [20].

Інформація з геохімії та мінералогії бісмуту в рудоносних структурах західної частини



**Рис. 1.** Карта-схема Інгульського мегаблоку з рудними об'єктами, в яких виявлена мінералізація вісмуту: 1 — Обгінний рудопрояв U, 2 — Клинецьке родовище Au, 3 — Губівський рудопрояв Au, 4 — Східно-Юрівське родовище Au, 5 — Селищанський рудопрояв W, 6 — Мостовий рудопрояв Au, 7 — Прудянська точка мінералізації Bi-As мінералізації, 8 — Полохівське родовище Li, 9 — Тимофіївський рудопрояв Au, 10 — Ватутінське родовище U; 11 — Овражний рудопрояв Au, 12 — Контактний рудопрояв Au; 13 — Станкуватське родовище Li, 14 — Бандурківський рудопрояв Au, 15 — Калинівське родовище U, 16 — рудопрояв Au Ахтове, 17 — Кашперівський прояв U мінералізації

Інгульського мегаблоку досить обмежена і несистематизована через низький вміст бісмуту та аналітичні проблеми його визначення [13]. Разом із тим, концентрації цього металу від 5 до 60 г/т фіксуються в родовищах різних генетичних типів завдяки здатності до утворення в гідротермальних процесах власних мінеральних сполук за низького вмісту [5]. Окремі ураганні значення (до 1,5 %) трапляються лише у виняткових випадках [9]. Традиційно металогенія бісмуту розглядається в контексті з процесами формування головних рудоносних комплексів золота, урану, рідкісних елементів, оскільки метал не утворює власні родовища, а розсіюється в рудах разом із благородними елементами, поліметалами, колчеданами і навіть леткими

компонентами. Завдяки своїм халькофільним властивостям бісмут переважно знаходиться в парагенезисах із сульфідами, арсенідами, телуридами, самородними елементами та інтерметалевими сполуками. Досить часто поведінка бісмуту у золоторудному процесі схожа з поведінкою золота, тому під час мінералого-геохімічних досліджень цей елемент може бути інформативним. Окремо доцільно розглядати зв'язок елемента з акцесорними мінералами (турмаліном, фосфатами, тантало-ніобатами).

**Геолого-структурне положення рудоносних структур із бісмутною мінералізацією.** В межах західної частини Інгульського мегаблоку виділено три крупні тектонічні структури: з заходу Братський синклінорій, зі сходу Інгульський синклінорій, а центральну осьову зону займають анортозит-рапаківі-гранітний Корсунь-Новомиргородський плутон (КНП) з півночі та Новоукраїнський масив порфіровидних гранітів і монзонітів (НУМ) — з півдня (рис. 1). Слід зазначити, що більша частина Інгульського синклінорію належить до центральної частини Інгульського мегаблоку. Загальну симетрію району субмеридіонального напрямку також підкреслюють численні масиви ультраметаморфічних гранітоїдів кіровоградського комплексу та характерна лінійність складчастості дислокованих товщ метаморфічних утворень інгуло-інгулецької серії.

В екзоконтактах КНП і НУМ виділено рудоносні тектонічні та відповідно структурно-металогенічні зони: Братсько-Звенигородську (БЗЗ) та Іnguло-Тjасминську (Кіровоградську) (ІТЗ). За своєю металогенічною значимістю БЗЗ та ІТЗ поступаються на УЩ лише Криворізько-Інгулецькій СМЗ та характеризується наявністю різномасштабних родовищ та рудопроявів урану, рідкісних металів (Li, Rb, Cs, Ta, Nb, W, Sn), благородних металів (Au, Ag). За даними геохімічних досліджень, у рудоносних структурах БЗЗ спостерігається підвищення концентрації бісмуту відносно вмісних товщ (табл. 1). У межах інтрузивів КНП і НУМ бісмут практично відсутній.

**Методи досліджень.** Дослідження геохімії та мінералогії бісмуту виконано в Інституті геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка НАН України за допомогою растрового електронного мікроскопа JSM-6700F (фірми JEOL). Дані про

хімічний склад мінералів отримано за допомогою мікрозондових приладів *JCHA-733*, *JXA-8200* (Технічний центр НАН України) і *Cameca SX-100* (Технічний Університет, м. Клаусшталь (Німеччина)). Також використано результати спектрального та атомно-абсорбційного аналізу, отримані у центральній лабораторії КП «Кіровгеологія».

**Бісмут в ультраметаморфічних U-Th-вмісних метасоматитах калій-уранової формації.** Саме для цього генетичного типу уранових родовищ та рудопроявів бісмут розглядається як один із типових елементів. Згідно з геологічними даними, зруденіння пов'язане з процесами ультраметаморфічної переробки порід кам'яно-костовацької світи в умовах гранулітової та амфіболітової фації [4]. Рудні зони досить чітко проявлені на ділянках поширення гідротермально-метасоматичних процесів за широкого спектра температурних режимів — від піроксенізації й амфіболізації до мікроклінізації, біотитизації та окварцювання. На півдні БЗЗ виділяється цілий рудний район, в межах якого виявлено родовища (рудопрояви) урану: Лозоватський, Калінінське, Південне, Виноградівський, Миколаївський та ін. Геохімічна спеціалізація практично всіх рудних об'єктів досить одноманітна (U, Th, REE, Mo, Bi) [4]. Вміст останнього рідко перевищує перші десятки грамів на тонну. Головні рудні мінерали: уранініт (брегерит), настуран, кофінит, циртолїт, монацит, ксенотим, ортит, торогуміт. В ореолах локалізації уранової мінералізації досить часто спостерігається самородний бісмут та бісмутин в асоціації з мо-

лібденітом, ільменітом, графітом, піротином, арсенопіритом, льолінгітом. Вік формування рудогенерувальних гранітів Лисогірського масиву становить  $2\,029,1 \pm 2,5$  млн років [16].

**Бісмут у рідкіснометалевих пегматитах і пов'язаних із ними екзоконтактових метасоматитах Шполянсько-Ташлицького рудного району.** Підвищений вміст арсену (до 0,5 %) та бісмуту (до 60 г/т) систематично фіксується серед різноманітних пегматитів і пегматоїдних гранітів Полохівського та Станкуватського рудного полів. Бісмутоносність рудопрояву Мостовий та Липнязького масиву була предметом спеціальних геохімічних досліджень, виконаних Б.Н. Івановим з колегами [7]. На його думку, окрім рудоносних пегматитів з літієвою та тантал-ніобієвою мінералізацією окремо існують пегматити з As-Bi геохімічною спеціалізацією. Вони мають чітко виражені петрохімічні та геохімічні властивості, зумовлені набором породотвірних та акцесорних мінералів: циркон, монацит, уранініт, дюмортъерит, хризоберил, каситерит, графіт, льолінгіт, арсенопірит. Характерною геохімічною особливістю порід, що розглядаються, є підвищений радіоактивний фон, зумовлений U-Th-вмісними акцесоріями. Тектурно-структурні особливості вищезгаданих пегматитів досить мінливі. Поряд із крупнозернистими існують дрібнозернисті аплітоподібні породи, у складі яких, %: кварц — 20—30, плагіоклаз — 20—45, КПШ — 10—45, біотит — до 5, мусковіт, гранат, турмалін, силіманіт.

Самородний бісмут та бісмутин є головними мінералами-концентраторами металу.

Таблиця 1. Вміст бісмуту та деяких інших металів, парагенних до нього, у вмісних породах із рудоносних структур Братсько-Звенигородської зони [1, 14]

Порода	Кількість проб	Вміст елементу, г/т				
		Au, $n \times 10^{-4}$	As, $n \times 10^{-3}$	Bi, $n \times 10^{-3}$	Cu, $n \times 10^{-3}$	Ag, $n \times 10^{-4}$
Гнейси біотит-гранат плагіоклазові	2720	0,004	5,2	0,09	4,4	0,08
		0,003—0,03	5—8	0,05—0,5	1—60	0,05—0,5
Гнейси графітові	1133	0,008	6,4	0,06	7,0	0,19
		0,003—0,08	5—300	0,05—0,8	1—200	0,05—1,0
Графіт-кварцові породи з сульфідами	86	0,017	6,5	0,10	10,5	0,71
		0,003—0,6	5—60	0,05—1,0	1—100	10,1—5,0
Золотовмісні окварцовані гнейси і амфіболіти	166	0,17	15,2	0,20	6,0	0,13
		0,015—9,6	7—400	0,05—3,0	1—30	0,05—0,6
Скарни	34	0,15	20,8	0,003	20,6	0,006
		0,002—10,1	5—450	0,001—30	1—200	0,002—30

\* Чисельник — середній вміст, знаменник — межі зміни вмісту.

В більшості випадків бісмути заміщує самородний Ві. Останній відзначається чіткою зернистістю, а розмір агрегатів змінюється від субмікроскопічних до порівняно великих (1–2 мм у перетині).

**Бісмут у провагах золоторудної мінералізації Au-As типу.** Цей тип руд має регіональне поширення в ІТЗ і БЗЗ. Мінералізація має епігенетичний характер і пов'язана з міграцією елементів у процесі метасоматично-гідротермальних перетворень різних за складом порід в екзоконтактах гранітних масивів палеопротерозойського віку [11, 19]. Мінералізація локалізується в породах інгуло-інгулецької серії: графітові гнейси, амфіболіти, кварцити, скарни, а також різноманітні граніти та мігматити. Поведінка бісмуту та інших парагенних йому елементів (Ві, Те, Pb, Ag) і вмісних мінералів майже на всіх рудах Au-As типу надзвичайно схожа. Мінеральний склад руд у більшості рудопроявів цього типу досить простий і одноманітний: кварц, біотит, польовий шпат та рудні мінерали: ільменіт, графіт, льолінгіт, арсенопірит, сульфіді (піротин, пірит, халькопірит), телуриди Ві, самородний Ві, Au. Геохімічною особливістю телуридної мінералізації в золоторудних об'єктах західної частини Українського щита є майже повне домінування сполук з бісмутом [2, 6]. Серед останніх виявлено хедлеїт ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ), телуровісмутит ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ), цумоїт ( $\text{BiTe}$ ), пільзеніт ( $\text{Bi}_4\text{Te}_3$ ), жозейт-В ( $\text{Bi}_4(\text{S, Te})_3$ ).

У межах ІТЗ виділяється Клишівсько-Конівське золоторудне поле (Клишівське родовище та Губівський рудопрояв) і Юрівське рудне поле (Східно-Юрівське родовище). На останньому родовищі в парагенезисі з золотом спостерігається повне переважаювання Ві-Те мінералізації, яка є важливим індикатором золоторудного процесу [6, 18]. Телуридна мінералізація представлена телуридами і сульфотелуридами бісмуту з домішками свинцю та срібла — цумоїтом ( $\text{BiTe}$ ), Pb та S-вмісним цумоїтом, та неіндифікованою фазою  $\text{Bi}_3\text{Te}_2$ . В мінералізованих зонах Губівського рудопрояву бісмут концентрується у складі пізньої рудної асоціації: самородний бісмут — мальдоніт — телуриди Ві — високопробне золото — антимоніди. Для родовища Клишів характерний лише самородний Ві [10]. За допомогою методів багатовимірної статистики (рангова кореляція і кластерний

аналіз), у межах головного рудного тіла Губівського рудопрояву, Л.П. Заборовська вивчила особливості поведінки основних рудогенних елементів (Au, As, Bi, Ag, Ni, Co, Cu, Pb, Zn). За результатами досліджень виявлено значимі кореляційні зв'язки бісмуту: із золотом ( $r = 0,46$ ) і одночасно з арсеном і золотом ( $r = 0,37$  і  $r = 0,5$  відповідно) [6].

В БЗЗ характерні Au-As-прояви з бісмутом для Петроострівського рудного поля (Висівський, Ярошівський, Мостовий рудопрояви, Прудянська точка мінералізації) та Станкуватського рудного поля (Овражний, Контактний, Степовий, Станкуватський рудопрояви) [1, 12]. Останні у вигляді досить щільного напівкільця розміщуються головним чином навколо однойменного Липнязького гранітного масиву. Бісмутоносність багатьох відомих рудопроявів зумовлена розвитком бісмутелуридно-самородного парагенезису, який спостерігається у льолінгіт-арсенопіритових агрегатах (табл. 2). Головними бісмутовмісними фазами є телуриди (сульфотелуриди) зі співвідношенням Ві до (Te + Se + S) від 4 : 3 до 8 : 5 та самородний Ві. Хедлеїт домінує в рудах Овражного рудопрояву, що підтверджено численними результатами мікрозондового аналізу. Золото-бісмут-телуридова мінералізація фіксується серед графіт-діопсидових скарнів Бандурківського рудопрояву, в якому рання продуктивна асоціація складається з мальдоніту + жозейту-В + тетрадиміту, а пізня — з самородного золота + вісмути.

*Ахтовий рудопрояв* був відкритий безпосередньо у східному екзоконтакті Вознесенського масиву [15]. Золоторудна мінералізація контролюється розломом північно-західного простягання. В межах рудопрояву Ю.О. Кузнецов [8] виділив три головні типи золоторудної мінералізації: власне золоторудний, арсенопіритовий та галеніт-кіноварний. Останній поширений у зонах серицитизації та низькотемпературного окварцювання (халцедон, гребінчастий кварц). Головні мінерали представлені кіноварю, галенітом, халькопіритом, сфалеритом, антимонітом. Золото зафіксовано в парагенезисі з хедлеїтом та бісмутоауритом (мальдонітом)?. Шкода, що після відкриття рудопрояв більше не досліджували і тому багато аспектів щодо його генезису та мінералогічних особливостей залишились нез'ясованими.



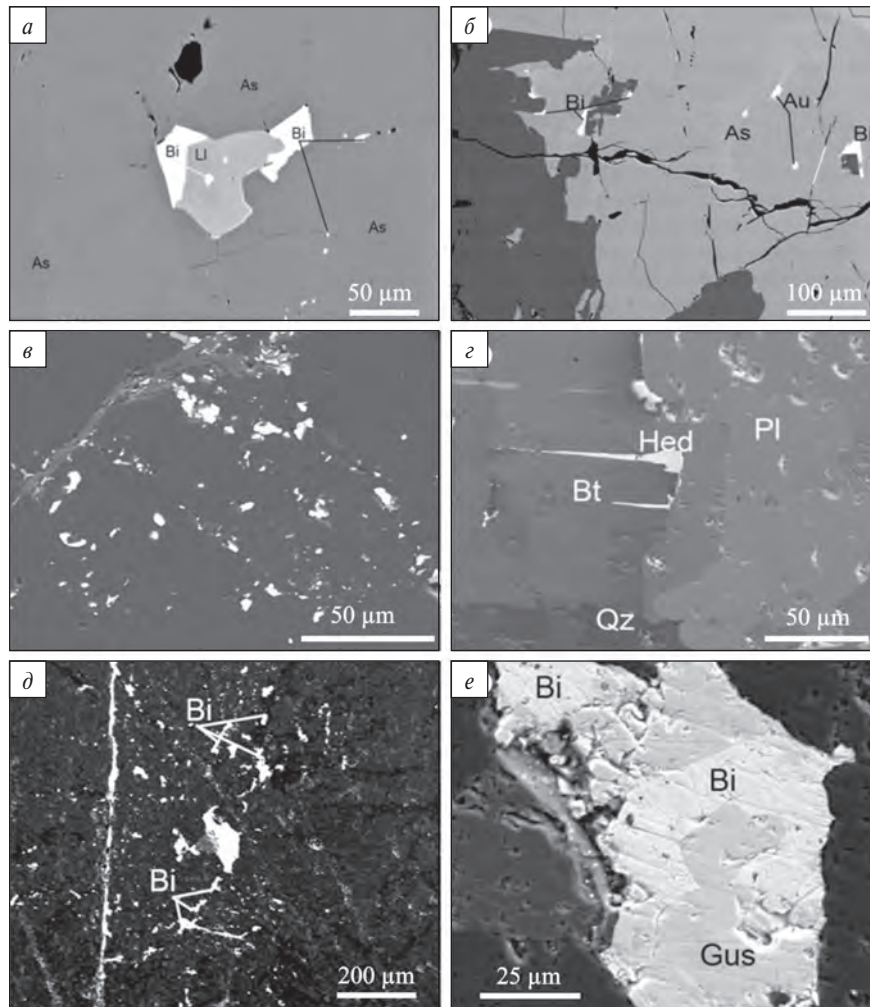
**Бісмут в ураноносних альбітитах із розломних зон гідротермально-метасоматичної переробки докембрійського фундаменту.** Для родовищ цього типу бісмут практично не характерний, а ні для самих ураноносних альбітитів, а ні для вмисних порід. Найцікавіший (і загадковий) рудний об'єкт, що містить одночасно ураганні концентрації бісмуту (до 0,8–1,3 %) та урану (до 15,5 %) — це рудопрояв Обгінний, розташований на північному фланзі Мічуринського рудного поля [4, 9]. Багате Ві-U зруденіння в ньому локалізується у тріщині сколювання, яка утворилась у процесі активізації в одному із розломів. Жильна мінералізація спостерігається головним чином у карбонат-хлоритових утвореннях, які виповнюють тріщину, заміщуючи глинку тертя. При цьому класична для цього типу руд альбітизація практично не проявлена. Мінеральна форма бісмуту — бісмутовмісний галеніт (Ві до 1 мас. %), самородний вісмут, Рb-бісмути́н (Ві до 8 мас. %), галенобісмути́т. За інформацією інших дослідників,

тут є жозеїт ( $\text{Bi}_4\text{TeS}$ ) та водний оксид U і Ві — ураносферит ( $\text{Bi}_2\text{O}_3 \times 2\text{UO}_3 \times 3\text{H}_2\text{O}$ ) [4]. Крім уранових мінералів (настуран, уранофан) у рудах присутні такі рудні мінерали: халькопірит, пірит, галеніт, сфалерит, борніт, халькозин, самородна мідь, самородний свинець. Генезис рудопрояву довгий час залишається предметом дискусій. Існує думка, що формування рудопрояву пов'язане з переміщенням (зокрема механічним) матеріалу еродованої частини Мічуринського родовища та з подальшим його перерозподілом [4].

На глибоких горизонтах Ватутінського родовища урану виявлена контрастна свинцево-бісмуто-срібна мінералізація [3]. За даними спектрального аналізу, у північній частині рудного поля в окварцованих альбітитах вміст срібла досягає 300 г/т. Головні рудні мінерали — концентратори срібла це самородне срібло та матильдит. Просторово Рb-Ві-Ag мінералізація відокремлена від уранової, яка формувалась у декілька етапів 1752—1740 млн років тому [17].

Таблиця 2. Головні мінерали — концентратори бісмуту в рудних структурах Західної частини Інгільського мегаблоку

Мінерал	Вміст Ві, ваг. %	Супутні рудні мінерали	Родовище, рудопрояв
Самородний вісмут (Ві)	98,2–99,9	Бісмути́н, арсенопірит, льолінгіт, молібденіт, самородне золото, халькопірит, турмалін, графіт, тантало-ніобати, каситерит, турмалін	Селищанський, Петроострівський, Прудянський, Мостовий, Овражний, Полохівське, Станкуватське, Обгінний, Бандурківський, Клинци, Губівський, Тимофіївський, Калинівський
Бісмути́н ( $\text{Bi}_2\text{S}_3$ )	81,6–83,0	Самородні Ві, Au, арсенопірит, льолінгіт, молібденіт, халькопірит, сфалерит, галеніт	Бандурківський, Станкуватське, Полохівське, Прудянський, Калинівський
Рb-бісмути́н $\text{Pb-Bi}_2\text{S}_3$	76,3–79,1	Настуран, галеніт, борніт, халькозин	Обгінний
Хедлеїт $\text{Bi}_7\text{Te}_3$	78,3–80,1	Сам. Au, Ві, арсенопірит	Мостовий, Овражний
Жозеїт-В $\text{Bi}_4\text{TeS}_2$	70,4–76,4	Сам. Au, жозеїт-В, вісмути́н, мальдоніт	Бандурківський
Тетрадиміт ( $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{S}$ )	60,2	Ті самі	Бандурківський
Галенобісмути́т $\text{PbBi}_2\text{S}_3$	55,3–56,9	Настуран, галеніт, борніт, халькозин	Обгінний
Матильдит ( $\text{AgBiS}_2$ )	27,7–29,5	Галеніт, сам. Ag	Ватутінське
Паркерит $\text{Ni}_3(\text{Bi,Pb})_2\text{S}_2$	64,8–66,1	Борніт, халькозин, вітихеніт, сам. Ві	Тимофіївський
Вітихеніт $\text{Cu}_3\text{BiS}_3$	41,8–43,7	Ті самі	Тимофіївський
Густавіт $\text{AgPbBi}_3\text{S}_6$	50,2–54,8	Галеніт	Кашперівський



**Рис. 2.** Електронне зображення (BSE) мінералів бісмуту в рудоносних структурах західної частини Інгільського мега-блоку: *a* — самородний бісмут (Bi) навколо льолінгиту в арсенопіриті, родовище золота «Клинці»; *б* — золотоносний арсенопірит (As) з тонкодисперсним золотом (Au) та самородним бісмутом, родовище золота Клинці; *в* — скупчення субмікроскопічних зерен телуридів бісмуту, самородного золота та сульфідів (біле), Губівський рудопрояв; *г* — хедлеїт (Hed) розвивається по спаяності у біотиті (Bt) серед кварц (Qz)-біотит-плагіоклазових (Pl) метасоматитів; *д* — суттєво самороднобісмутова (Bi) субмікроскопічна мінералізація Кашперівської ділянки; *е* — агрегат, що складається з самородного бісмуту (Bi), густавіту (Gus) та галеніту, Кашперівська ділянка

Підвищеною бісмутоносністю вирізняються ряд рудопроявів і точкових геохімічних аномалій срібла центральної частини Звенигородсько-Ганнівської зони розломів, у полі поширення комплексу березівських гранітів з численними релікатами метаморфітів рошавівської світи. Вік гранітів  $2038,7 \pm 0,7$  млн років [17]. Типовим рудним об'єктом поширення мідно-бісмут-срібної мінералізації є Тимофіївський рудопрояв, який початково розглядали як перспективну геохімічну аномалію золота (0,2–10 г/т) та срібла (300 г/т). Унаслідок глибокого буріння (до глибини 500 м) простежено три зони розвитку рудної мінералізації з вмістом срібла до 50–60 г/т. Cu-Ag-Bi мінералізація

локалізується серед пошарових і січних тіл гранітоїдів березівського типу. В зонах діафорезу гранітів розвиток отримали типові для зони вторинного сульфідного збагачення парагенні асоціації (халькопірит — борніт — халькозин — вітихеніт — паркерит — самородний бісмут) [3].

У крайній південній точці БЗЗ серед пегматоїдів Кашперівської ділянки підвищену концентрацію бісмуту виявлено серед уран-рідкісноземельної мінералізації. Головним мінералом концентратором металу є самородний бісмут, в зростанні з останнім фіксується галеніт і густавіт (рис. 2, *e*). Діагностику сульфосолей виконано за допомогою мікрозондового аналізу.

На північному замиканні БЗЗ у зоні поширення шеелітоносних магнезійальних скарнів, у смузі тектонічно активної контактової зони плутону, самородний бісмут фіксується в січних турмалінвмісних мусковіт-гранаткордієрит-альбіт-мікроклінових пегматитах ділянки Селище [14].

**Висновки.** Дослідження бісмутової мінералізації в рудоносних структурах західної частини Інгільського мегаблоку дало змогу виявити регіональні геохімічні особливості концентрування бісмуту. Зафіксовано як розсіювання його в породних комплексах за невисокого вмісту (до 60 г/т), так і випадки різкої контрастності його розподілу і наявності ураганих концентрацій. У деяких комплексних рудах, які вже розробляють, або розвідують, елемент можна розглядати як додатковий корисний компонент. Незважаючи на те, що в більшості випадків мінерали бісмуту формують субмікроскопічні виділення, метал проявляє високу здатність до мінералоутворення. Значна кількість мінеральних видів від самородного стану до сульфідів, сульфосолей, телуридів, сульфотелуридів свідчить про чутливість до певних фізико-хімічних умов формування. Цей факт може мати індикаторне значення. Бісмут проявляє типові властивості поліметалів разом з арсеном, сурмою, телуром.

В уранових рудопроявах (К-U формація) гідротермально-метасоматичного генезису рудні мінерали бісмуту (самородний Ві та бісмути́н)

є типовими і в деякій мірі визначають геохімічну спеціалізацію даного типу руд.

Самородний бісмут та бісмути́н наявні поряд із типовими акцесорними мінералами (арсенопіритом, графітом, ганітом, турмаліном, каситеритом, тантало-ніобатами, фосфатами) в полях поширення рідкіснометалевих пегматитів і пов'язаних із ними метасоматитах Шполянсько-Ташлицького рудного району.

Геохімічною особливістю золоторудних об'єктів західної частини Інгільського мегаблоку є домінування в парагенезисах із самородним золотом, сполук з бісмутом (телуридів, самородного та сульфідів). У системі Ві-Те виявлено такі індивідуалізовані фази: хедлеїт ( $\text{Bi}_7\text{Te}_3$ ), телуровісмути́т ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ), цумоїт ( $\text{BiTe}$ ), пільзеніт ( $\text{Bi}_4\text{Te}_3$ ), жозеїт-В ( $\text{Bi}_4(\text{S}, \text{Te})_3$ ).

Попри знахідки ураганного вмісту (рудопрояв Обгінний), численні родовища Na-U формації виявилися практично стерильними відносно бісмуту.

Результати вивчення мінералогічних аспектів бісмутоносності рудоносних структур західної частини Інгільського мегаблоку можуть бути використані у геологічній практиці для виявлення і оконтурення різних типів руд, оцінки перспектив зруденіння на флангах та на глибину. Виявлені в рудоносних структурах мінеральні комплекси бісмуту з телуром є типовими індикаторами верхніх горизонтів багатьох золоторудних родовищ, що дає змогу оцінювати їх перспективи в цілому.

## Література

1. Безвинний В.П. Рідкіснометалеве та золоте зруденіння і метасоматичні процеси Петроострівського рудного поля. *Збірн. наук. праць УкрДГРІ*. 2005. № 1. С. 82–84.
2. Бондаренко С.М. Золоторудна мінералізація західної частини Українського щита: автореф. ... дис. канд. геол. наук. Київ, 2009. 22 с.
3. Бондаренко С.Н., Иванов Б.Н., Сёмка В.А., Бондаренко И.Н. Проявления серебряной минерализации в западной части Кировоградского блока (Украинский щит). *Минерал. журн.* 2002. **24**, № 1. С. 72–79.
4. Генетические типы и закономерности размещения урановых месторождений Украины / Отв. ред. Я.Н. Белевцев, В.Б. Коваль. Киев: Наук. думка, 1995. 396 с.
5. Дунин-Барковская Э.А. Геохимия и минералогия висмута (Чаткало-Кураминские горы). Ташкент: ФАН, 1978. С. 272 с.
6. Заборовська Л.П. Мінералого-геохімічні та генетичні особливості Юр'ївського родовища і Губівського рудопрояву золота (Український щит): автореф. дис. ... канд. геол. наук. Київ, 2017. 23 с.
7. Иванов Б.Н., Бугаєнко В.М., Єрьоменко Г.К., Бондаренко С.М. Рідкіснометалеві гранітні пегматити з аномальним вмістом бісмуту і миш'яку в обрамленні Липнязького гранітного масиву. *Зб. наук. пр. УкрДГРІ*. 2008. № 1. С. 38–43
8. Кузнецов Ю.А., Гриценюк В.И., Веденеев Е.В. О проявлении золота в углеродсодержащих породах одного из районов УЩ. *Минералогические критерии поисков редких и цветных металлов в пределах Украинского щита*. Киев: Наук. думка, 1977. С. 86–89.
9. Кулиш Е.А., Михайлов В.А. Урановые руды мира. Геология, ресурсы, экономика. Киев, 2004. 277 с.

10. Марченко А.Г., Братчук О.М. Этапы рудоутворення, мінеральні асоціації та парагенези Клинівської рудної зони. *Зб. наук. пр. УкрДГРІ*. 2008. № 1. С. 83–92.
11. Металлические и неметаллические полезные ископаемые Украины. Т. 1. Металлические полезные ископаемые / Гурский Д.С., Есипчук К.Е., Калинин В.И., Кулиш Е.А., Нечаев С.В., Третьяков Ю.И., Шумлянский В.А. Киев-Львов: Центр Европы, 2005. 785 с.
12. Нечаев С.В., Бондаренко С.Н., Нечаев С.Вл. Висмут — мышьяковая минерализация в жильном граните секущем рапакиви Украинского щита. *Геол. журн.* 1986. № 3. С.86–90.
13. Нечаев С.В. Минералы висмута и мышьяка в западной части Украинского щита. *Геол. журн.* 1988. № 3. С. 86–90.
14. Нечаев С.В., Семка В.А. Скарны Украины. Киев: Наук. думка, 1989. 212 с.
15. Носырев И.В. Находки самородного золота в кварцевых жилах Украины. *Докл. АН СССР*. 1973. **210**, № 4. С. 929–930.
16. Степанюк Л.М., Довбуш Т.І., Бондаренко С.М., Сьомка В.О., Грінченко О.В., Скуратівський Є.В. Уран-свинцева геохронологія порід калій-уранової формації Інгульського мегаблоку Українського щита. *Мінерал. журн.* 2012. **34**, № 3. С. 55–63.
17. Степанюк Л.М., Бондаренко С.М., Іванов Б.Н., Довбуш Т.І., Курило С.І., Сьомка В.О., Шестопалова О.Є. Геохронологія Ватутінського уранового родовища (Інгульський мегаблок Українського щита). *Геохімія та рудоутворення*. Вип. 34. 2014. С. 18–25.
18. Фомин Ю.А., Шестаков Ю.П., Заборовская Л.П., Лазаренко Е.Е., Бондаренко С.Н., Бондаренко И.Н. Рудные минералы Восточно-Юрьевского месторождения золота (Украинский щит). *Мінерал. журн.* 2003. **25**, № 4. С. 101–108.
19. Яценко Г.М., Бабынин А.К., Гурский Д.С. и др. Месторождение золота в гнейсовых комплексах докембрия Украинского щита. Киев: Наук. думка, 1998. 256 с.
20. Melnikov V., Bondarenko S., Grinchenko A. Bi-tellurides of Transcarpatians (Ukraine): Mineralogy and genesis. Gold-Silver tellurides Deposits of the Golden Quadrilateral, South Apuseni Mts., Romania. *IAGOD Guidebook Series*. 2004. **12**. P. 214–216.

Надійшла 24.09.2020.

## References

1. Bezvynnyi V.P. (2005). Rare metals and Au ore occurrence and metasomatic process of Petroostriv ore field. *Zbirn. nauk. prats UkrDGRI*. No. 1. P. 82-84 [in Ukrainian].
2. Bondarenko S.M. (2009). Gold mineralization of west part of Ukrainian shield. Avtoref. dys. kand. geol. nauk. Kyiv. 22 p. [in Ukrainian].
3. Bondarenko S.M., Ivanov B.N., Syomka V.O (2002). Occurrence of silver mineralization in west part of Kirovograd block (Ukrainian shield). *Mineral. Journ.* V. 24. P. 72-79 [in Russian].
4. Belevtsev Ya.N., Koval V.B. (Eds) (1995). Genetic types and patterns of placement of uranium deposits of Ukraine. Kyiv, Nauk. dumka. 396 p. [in Russian].
5. Dunin-Barkovskaya E.A. (1978). Bismuth geochemistry and mineralogy (Chatkalo-Kuramin mountains). Tashkent, FAN, UzSSR [in Russian].
6. Zaborovskaya L.P. (2017). Mineralogical, geochemical and genetic features of Yuriv deposit and Gubiv ore occurrence of gold (Ukrainian shield). Avtoref. dys. kand. geol. nauk. Kyiv. 23 p. [in Ukrainian].
7. Ivanov B.N., Bugayenko V.M., Yeromenko H.K., Bondarenko S.M. (2008). Raremetals granitic pegmatite with anomalous content of bismuth and arsenic in the frame of Lypnyazhka granitic massif. *Zbirn. nauk. prats UkrDGRI*. No. 1. P. 38-43 [in Ukrainian].
8. Kuznetsov Yu.A., Hrytsenyuk V.I., Vedenev Ye.V. (1977). Mineralogicheskiye kriterii poiskov redkikh i tsvetnyh metalov v predelakh Ukrainskogo shchita. *About occurrence of gold in carbonbearing rocks of someone region of USh*. Kyiv. Nauk. dumka. P. 86-89 [in Russian].
9. Kulish Ye.A., Mykhaivlov V.A. (2004). Geologiya, resursy, ekonomika. Uranium ores of the world. 277 p. [in Russian].
10. Marchenko A.H., Bratchuk O.M. (2008). Stages of ore formation, minerals assemblages and paragenesis of Klyntsi ore zone. *Zbirn. nauk. prats UkrDGRI*. No. 1. P. 83-92 [in Ukrainian].
11. Hurskyi D.S., Yesypchuk K.Ye, Kalinin V.I., Kulish Ye.A., Nechayev S.V., Tret'yakov Yu.I., Shumlyanskiy V.A. (2005). Metallic and non-metallic minerals of Ukraine. Vol. 1. Metallic minerals. Kyiv-Lviv, Tsentr Yevropy. 785 p. [in Russian].
12. Nechayev S.V., Bondarenko S.N., Nechayev S.VI. (1986). Bismuth-arsenic mineralization in vein granite cutting rapakivi of Ukrainian shield. *Geol. Journ.* No. 3. P. 86-90 [in Russian].
13. Nechayev S.V. (1988). Bismuth and arsenic minerals in the west part of Ukrainian shield. *Geol. Journ.* No. 3. P. 86-90 [in Russian].
14. Nechayev S.V., Syomka V.A. (1989). Skarns of Ukraine. Kyiv, Naukova dumka. 212 p. [in Russian].
15. Nosyryov I.V. (1973). Finds of native gold in quartz veins of Ukraine. *Dokl. AN SSSR*. Vol. 210, No. 4. P. 929-930 [in Russian].
16. Stepanyuk L.M., Dovbush T.I., Bondarenko S.M., Syomka V.O., Hrinchenko O.V., Skurativskiy S.Ye. (2012). Uranium-lead geochronology potassium-uranium formation rocks of the Ingul megablock, the Ukrainian shield. *Mineral. Journ.* Vol. 34, No. 3. P. 55-63 [in Ukrainian].



17. Stepanyuk L.M., Bondarenko S.M., Ivanov B.N., Dovbush T.I., Kurylo S.I., Syomka V.O., Shestopalova O.Ye. (2014). Geochronology of Vátutin uranium deposit (Ingul megablock, Ukrainian shield). *Geohimiya ta rudoutvorennâ*. Iss. 34. P. 18-25 [in Ukrainian].
18. Fomin Yu.A., Shestakov Yu.P., Zaborovska L.P., Lazarenko Ye.Ye., Bondarenko S.M., Bondarenko I.H. (2003). Ore minerals East-Yuriv gold deposit (Ukrainian shield). *Mineral. Journ.* Vol. 25, No. 4. P. 101-108 [in Russian].
19. Yatsenko G.M., Babynin A.K., Gurskyi D.S. et al. (1998). Gold deposit in Precambrian gneiss formations of Ukrainian shield. Kyiv, Nauk. dumka. 256 p. [in Russian].
20. Melnikov V., Bondarenko S., Grinchenko A. (2004). Bi-tellurides of Transcarpatians (Ukraine): Mineralogy and genesis. Gold-Silver tellurides Deposits of the Golden Quadrilateral, South Apuseni Mts., Romania. *IAGOD Guidebook Series*. Vol. 12. P. 214-216.

Received 24.09.2020.

**S.M. Bondarenko**<sup>1</sup>

E-mail: sbond.igmr@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7948-3583>

**V.O. Syomka**<sup>1</sup>

<https://orcid.org/0000-0001-5202-4045>

**L.M. Stepanyuk**<sup>1</sup>

<https://orcid.org/0000-0001-5591-5169>

**O.V. Hrinchenko**<sup>2</sup>

E-mail: alexgrin@univ.kiev.ua, <https://orcid.org/0000-0003-3030-1720>

**B.N. Ivanov**<sup>3</sup>

**V.M. Belskyi**<sup>1</sup>

<https://orcid.org/0000-0001-7990-1386>

<sup>1</sup> M.P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of NAS of Ukraine

<sup>2</sup> Taras Shevchenko National University of Kyiv, Institute of Geology

<sup>3</sup> Search and Examination Expedition No 46 of the State Enterprise «Kirovgeology»

#### MINERALOGICAL AND GEOCHEMICAL FEATURES OF BISMUTH IN PROTEROZOIC ORE-BEARING STRUCTURES OF WEST PART OF THE INGUL MEGABLOK (UKRAINIAN SHIELD)

In this paper we summarize the geological information about regional distribution features of bismuth in the Ingul megablock of Ukrainian shield. Different Proterozoic ore sites situated within the Bratsk-Zvenihorodka and the Ingul-Tyasmyn metallogenic zone are considered. They are characterized by the presence of various scale deposits of uranium, rare metals (Li, Rb, Cs, Ta, Nb, W, Sn) and precious metals (Au, Ag). Minerals-concentrators of bismuth and main paragenetic associations comprising native Bi, tellurides, bismutite, maldonite, wittichenite, parkerite, matildite are investigated. It should be noted that within the intrusions of the Korsun-Novomyrhorod pluto and the Novoukraika massif, which spatially separate the Bratsk-Zvenihorodka and the Ingul-Tyasmyn metallogenic zone, there are also deposits of uranium and titanium, but bismuth is practically absent. At a relatively low content (from 5 to 60 g / t) bismuth is a typical metal for ore objects of K-U formation and rare metal pegmatites of Polokhiv and Stankuvatske ore fields. For the first time, mineral forms of bismuth (native bismuth, Pb-bismuth, galenobismuthin) were determined in the Obginnyi ore occurrence, where abnormally high content values of bismuth up to 0,8-1,3%. The geochemical feature of numerous gold ore objects is the almost complete dominance of bismuth compounds with tellurium. There are headleite (Bi<sub>7</sub>Te<sub>3</sub>), telluric bismuthite (Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>), tsumoit (BiTe), pilsenite (Bi<sub>4</sub>Te<sub>3</sub>), joseite-B (Bi<sub>4</sub>(S,Te)<sub>3</sub>) detected individualized phases in the Bi-Te system. In the skarns of the Bandurkivsky ore occurrence the early productive association consists of maldonite + joseite-B + tetradimite, and the late one consists of native gold + bismuth. Bismuth sulfosalts are present in various ore objects as part of sulfide Cu-Ag-Bi and Pb-Ag-Bi mineralization.

The study of geochemistry and mineralogy of bismuth was performed in M.P. Semenenko institute of geochemistry, mineralogy and ore formation of NAS of Ukraine, using a scanning electron microscope *JSM-6700F (JEOL)*. Data on the chemical composition of minerals were obtained using microprobe devices *JXA-733, JXA-8200* (Technical Center of the National Academy of Sciences of Ukraine) and *Cameca SX-100* (Technical University, Klausstal (Germany)). The data of spectral and atomic absorption analysis of the central laboratory of KP «Kirovgeologiya» were also used in writing the article.

**Keywords:** bismutite, native bismuth, mineralization, tellurides, ore-bearing structures, Ingul megablock.