

В. М. Квасниця

Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення
ім. М. П. Семененка НАН України, м. Київ, Україна
kvasnytsya@ukr.net

Синтетичні НРНТ алмази як псевдо-індикатори алмазоносності гірських порід

Виконано порівняння синтетичних НРНТ і природних алмазів та показана суттєва різниця між ними. Виділено основні індикаторні ознаки синтетичних НРНТ алмазів, за якими можна розпізнавати їхні знахідки в природних об'єктах. Розглянута достовірність знахідок НРНТ алмазів у породах Українського кристалічного щита. Знахідки у пробах концентратів із кристалічних і теригенних порід алмазів подібних до їхніх синтетичних НРНТ кристалів є псевдо-індикаторами алмазоносності гірських порід і потребують детального вивчення.

Ключові слова: синтетичний НРНТ алмаз, природний алмаз, індикаторні ознаки.

Промислово алмазоносними кристалічними породами є лише деякі кімберліти, зовсім зрідка лампроїти і лампрофіри. У процесі прогнозу, пошуку і оцінки таких корінних чи розсипних родовищ алмазу, наприклад кімберлітового типу, широко використовують так звані типоморфні мінерали кімберлітів. Серед них потрібно розрізняти мінерали, що генетично пов'язані з кімберлітами (магнезійний олівін, магнезійний гранат – піроп, магнезійний ільменіт – пікроільменіт, високохромистий хроміт, хромдіюксид, енсатит, циркон, апатит, титаноклиногумит, флогопіт), і різні ксеногенні мінерали, зокрема супутні чи парагенетичні алмазу у процесі його утворення на мантийних глибинах (певні відміни піропу, пікроільменіту, хроміту, хромдіюксиду) та всі разом з алмазом захоплені розплавами кімберлітів. Перші мінерали слід називати мінералами-індикаторами кімберлітів, другі – мінералами-індикаторами їхньої алмазоносності, зокрема до останніх відноситься й сам алмаз.

Підкреслимо, що у кімберлітах, лампроїтах і лампрофірах алмаз, як мінерал-індикатор, займає особливе місце. По-перше, як вище зазначено, у цих породах він є майже повністю ксеногенним мінералом. По-друге, далеко не всі кімберліти, лампроїти і лампрофіри містять алмази. Наприклад, не більше 4 % відкритих декількох тисяч кімберлітових тіл виявилися алмазоносними, а промислово алмазоносними є набагато менше. Тому алмаз як мінерал-індикатор продуктивності кристалічних порід є чи не найголовнішим серед всіх вище перерахованих мінералів-індикаторів. Проте час від часу виникає певна невизначеність його ролі саме як мінералу-індикатора. Це пов'язано з тим, що, наприклад, під час пошуків родовищ алмазу в Україні у концентраціях геологічних проб з кристалічних і теригенних порід відносно часто попа-

даються дрібні алмази, подібні до їхніх синтетичних аналогів. Відомо чимало таких прикладів під час пошукових робіт на Українському щиті (в Приазов'ї, на Поділлі тощо) [1–3]. Причина криється в тому, що широке використання синтетичних НРНТ алмазів, як абразивного чи різального матеріалу, стало серйозною проблемою сьогодення через реальну можливість ризику засмічення ними природних об'єктів і внесення певної дезінформації під час пошуків корінних і розсипних родовищ алмазу.

Нижче зіставлено за типоморфними ознаками природні алмази (із кімберлітів, лампроїтів і лампрофірів) і синтетичні НРНТ алмази. У порівнянні з ними надана характеристика знайдених в Україні кристалів алмазу, маловірогідних щодо їхнього природного походження і подібних до синтетичних НРНТ алмазів. Розглянуто основні ознаки як найбільш поширених марок синтетичних алмазів (наприклад, типу АС, АСМ та інші), так і природних алмазів, за якими можна розпізнавати походження сумнівних знахідок алмазів і таким способом виключати можливість недоцільного витрачання коштів на пошук, вивчення та розвідку об'єктів щодо їхньої недостовірної алмазозності. Знайдені сумнівні алмази надано для дослідження Приазовською і Правобережною геологічними експедиціями України.

ПОРІВНЯННЯ СИНТЕТИЧНИХ НРНТ І ПРИРОДНИХ АЛМАЗІВ

У таблиці наведено найважливіші типоморфні ознаки синтетичних НРНТ, отриманих із застосуванням таких розчинників вуглецю, як Ni, Fe, Mn, Co, та інших металів і алмазів із кімберлітів, лампроїтів і лампрофірів. Саме такі синтетичні алмази широко використовують для виготовлення всякого абразивного і різального інструменту і можуть попадати в природні об'єкти різними шляхами і способами. Згодом під час пошукових робіт на алмаз вони можуть засмічувати проби кристалічних чи осадових порід і вносити певну дезорієнтацію.

Типоморфні ознаки синтетичних НРНТ алмазів і алмазів із кімберлітів, лампроїтів і лампрофірів [4–10]

Ознака кристалів	Синтетичний НРНТ алмаз	Алмаз із кімберлітів, лампроїтів і лампрофірів
Прості форми*	{111}, {100}, {110}, {311}, {511}, {711}	{111}, зрідка як другорядна {100}
Габітус	Кубо-октаедричний, октаедричний, кубічний, ромбододекаедричний, тетрагон-триоктаедричний, комбінаційний {111}+{100}+{110}+{311}	Октаедричний, додекаедричний, кубічний, перехідний {111}+{110}, комбінаційний {111}+{100}+{110}
Мікроморфологія граней	Скелетні грані, спіралі росту, дендрити, відбитки металів, ямки розчинення граней октаедра і куба	Ямки розчинення граней октаедра і псевдокуба, штриховки, трикутні нарости, кільця, горбки
Анатомія	Переважно кубо-октаедричні зональні сектори	Переважно октаедричні зональні сектори, кубічні сектори фібрильного росту, комбінація вказаних октаедричних і кубічних секторів
Механізм росту	Дислокаційний (спіральний), двовимірного зародкоутворення	Дислокаційний (спіральний), двовимірного зародкоутворення, фібрильний
Ізотопний склад вуглецю, $\delta^{13}\text{C}\%$	Часто > -23	Від -41,4 до +2,5, середнє значення - -5,2

(Продовження)

Колір	Жовтий, коричнево-жовтий, жовто-зелений, сірий	Зрідка зелений, зелено-жовтий, жовтий, сірий, фіолетовий та інші. Домінують безбарвні кристали
Фотолюмінесценція	Не характерна, невиразна жовта, найчастіше фіксується азотний центр N3	Характерна, зумовлена різними дефектними центрами – переважно азотними: блакитна (центр N3), зеленувато-блакитна (центри N3, N3 і N4), зелена (центр N3) і жовто-зелена (центри N3 і N3); червона і помаранчева (центри 409 нм і 575 нм)
Азотні центри і спектральні типи	C, переважно Ib, рідше IIa, IIb	A, B1, B2, C, N3 та інші, IaA, IaAB, Iab, Ib, IIa
Тверді включення	Метали, їхні сплави: Ni, Fe, Mn, Co та інші	Силікати, оксиди, сульфіді, карбонати, прості речовини та інші

*Форми кристалів, грані яких плоскі і гладкі.

Прості форми, габітус і топографія граней кристалів

За набором і характером граней простих форм та габітусів кристалів синтетичні НРНТ алмази, які отримані в системах з участю таких розчинників вуглецю як Ni, Fe, Mn, Co та інших металів, і алмази із кімберлітів, лампроїтів і лампрофірів суттєво відрізняються. На кристалах синтетичного алмазу розвинуті плоскі і гладкі грані $\{111\}$, $\{100\}$, $\{110\}$, $\{311\}$, $\{511\}$, $\{711\}$. Ці форми визначають габітуси кристалів синтетичного діаманту – від поширеного кубо-октаедричного до рідкісних ромбододекаедричного і тетрагонтриоктаедричного. На кристалах алмазу із кімберлітів, лампроїтів і лампрофірів розвинуті тільки плоскі й гладкі грані октаедра, зрідка вершини октаедрів притуплені плоскими і гладкими гранями куба. Плоскогранні куби із вказаних порід не виявлені, у них поширені куби і пседокуби з горбистою чи ямчатою поверхнею граней. Інші мініатюрні грані таких простих форм як $\{110\}$, $\{hhl\}$, $\{hkk\}$, $\{hk0\}$ і $\{hkl\}$ є також рідкісними [7] і вони лише ускладнюють октаедри алмазу із перерахованих порід.

Анатомія кристалів

Внутрішня будова кристалів НРНТ алмазу є відносно простою, головне вона позбавлена зон чи секторів фібрильного росту, характерного для значної кількості алмазів із кімберлітів, лампроїтів і лампрофірів.

Ізотопний склад вуглецю кристалів

Алмази із кімберлітів, лампроїтів і лампрофірів мають широкий діапазон значень ізотопного складу вуглецю [8, 10]. Наприклад, $\delta^{13}\text{C}$ кристалів алмазу із кімберлітів перидотитової асоціації становить від $-34,5$ до $+2,5$ ‰, середнє значення $-4,9$ ‰, а $\delta^{13}\text{C}$ кристалів алмазу еклогітової асоціації – від $-40,7$ до $+2,5$ ‰, середнє значення $-6,5$ ‰ [8], тоді як кристали синтетичного алмазу мають переважно легкий склад вуглецю, відповідно прекурсорі проб графіту.

Азотні центри і спектральні типи кристалів

В кристалах алмазу із кімберлітів, лампроїтів і лампрофірів звичайними є структурні домішки азоту, так звані А-, В- і С-центри – атоми азоту чи їхні

групи, які ізоморфно заміщують атоми вуглецю в ґратці кристала [6, 10]. Вказані центри можна вважати індикаторами природних алмазів, за якими можна відтворювати мантіїну історію мінералу. За вмістом цих азотних центрів розрізняють спектральні типи і підтипи кристалів. Алмази із системою поглинання в інфрачервоних спектрах, обумовленою С-центрами (N_C – одиночні атоми азоту у вузлах ґратки, головна лінія поглинання – 1135 см^{-1}), відносять до спектрального типу *Ib*, алмази з агрегованим азотом – до типу *Ia*. Якщо весь структурний азот в кристалі представлений виключно А-центрами (N_A – два атоми азоту у сусідніх вузлах ґратки, головна лінія поглинання – 1282 см^{-1}), то кристали цього спектрального підтипу позначаються *IaA*. Алмази, що містять азот тільки у формі В-центру (N_{B1} – чотири атоми азоту, тетраедрично розміщуються навколо вакансії атому вуглецю, головна лінія поглинання – 1175 см^{-1}), належать до підтипу *IaB*. Для позначення алмазів змішаних підтипів прийнято такі позначення: *IaAB* (комбінація А- і В-центрів) – найбільш поширений підтип серед кристалів; *Iab* (комбінація А- і С-центрів) – доволі рідкісний підтип, як і тип *Ib* та безазотні кристали типу *IIa*. Ступінь агрегації структурного азоту в кристалах (*Ib* → *Iab* → *IaA* → *IaAB* → *IaB*) засвідчує відповідну термальну історію алмазоносних мантіїних порід і самого алмазу та час перебування їх у мантії. Для кристалів синтетичного НРНТ алмазу властиві типи *Ib* і *IIa*.

Тверді включення у кристалах

В алмазах із кімберлітів, лампроїтів і лампрофірів виявлено включення вже декілька десятків мінералів [9]. Наприклад, у алмазах перидотитової асоціації поширені Сг–піроп, олівін, енстатит, Сг–діопсид, Мг–хроміт, Fe–Ni сульфід, рідкісні коесит, Мг–ільменіт, магнезит, кальцит, самородне залізо, циркон, флогопіт, а у алмазах еклогітової асоціації поширені гроссуляр–альмандин–піроп, омфацитовий клінопіроксен, сульфід заліза, іноді трапляються рутил, коесит, кіаніт, корунд, ільменіт та більш рідкісні магнетит, Fe–Мг–хроміт, флогопіт, калієвий польовий шпат, титаніт, ставроліт, циркон, муасаніт, кальцит і доломіт. Відомі мінерали-включення у алмазах вебстеритової асоціації (альмандин–піроп, діопсид–авгіт, енстатит та ін.), а також ряд специфічних мінералів-включень (бриджманіт, ферропериклаз, CaSi–перовськіт та ін.) у так званих надглибинних алмазах, тоді як у кристалах синтетичного НРНТ алмазу домінують включення металів (нікель, залізо, кобальт та інші) та їхніх сполук, які використовують у розплавленому стані як розчинники вуглецю у ростовій системі.

ЗНАХІДКИ КРИСТАЛІВ ПОДІБНИХ ДО СИНТЕТИЧНИХ НРНТ АЛМАЗІВ СЕРЕД ПРИРОДНОГО МАТЕРІАЛУ

Знахідки алмазів у кристалічних породах, кімберлітова трубка Надія у Приазов'ї

У концентратах проб кімберлітів цієї трубки знайдено десяток дрібних жовто-зелених кристалів алмазу, їхній розмір не більше 0,5 мм. Три із них показано на рис. 1. Це кубо-октаедричні плоско- і гладкогранні кристали, ускладнені мініатюрними гранями ромбододекаедра і тетрагон-триоктаедра. Дві останні форми є неповногранними, грані цих форм також плоскі і гладкі. На інфрачервоних спектрах таких кристалів (рис. 2) проявлені такі лінії: 823 см^{-1} , сильна 856 см^{-1} , 916 см^{-1} , сильна 948 см^{-1} , сильна 1128 см^{-1} і слабка 1345 см^{-1} , а також слабкі лінії $2840\text{--}2980\text{ см}^{-1}$ (від груп CH_2 , CH_3). Лінії 1128 см^{-1} (С центр, 1135 см^{-1}) і 1345 см^{-1} (С центр) дозволяють віднести ці

кристали до спектрального типу *Ib* за фізичною класифікацією, характерного для кристалів синтетичного алмазу. Також відомо, що лінії інфрачервоних спектрів кристалів цього алмазу в діапазоні $853\text{--}952\text{ cm}^{-1}$ пов'язані з атомами Ni і Mn в його структурі [11], тобто з металами-розчинниками вуглецю під час його синтезу. У спектрах вивчених кристалів це лінії $856, 916$ і 948 cm^{-1} . Для порівняння на рис. 2 наведено майже аналогічний спектр завідомо синтетичного кристала алмазу. Отже, описані кристали належать до звичайного синтетичного алмазу. Напрямок і спосіб засмічення проб кімберліту із трубки Надія кристалами синтетичного алмазу не встановлено.

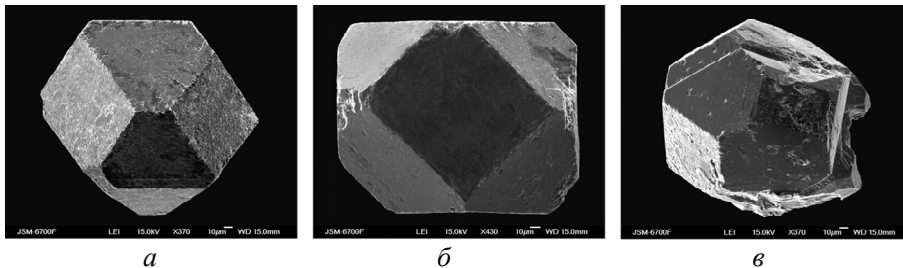


Рис. 1. Кубо-октаедричні кристали алмазу, які знайдені в концентраті проби із кімберлітів трубки Надія в Приазов'ї (Український щит). кубо-октаедри АВ-801-2 (а) і АВ-801-1 (б), зросток двох кубо-октаедрів (в).

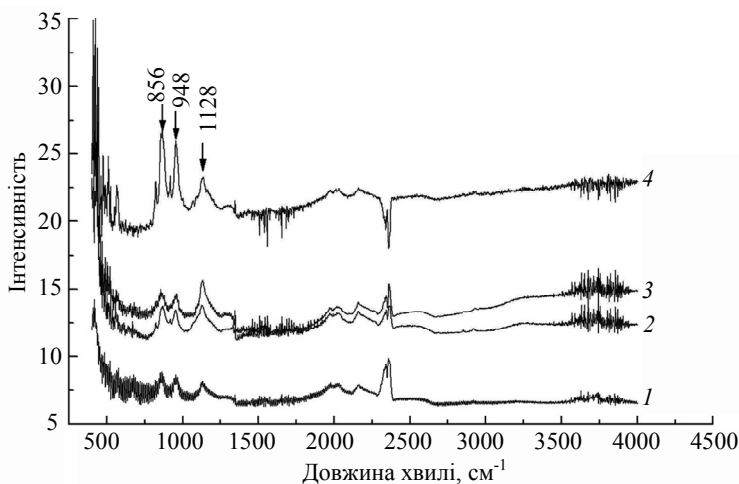


Рис. 2. Інфрачервоні спектри трьох “приазовських” кубо-октаедричних кристалів алмазу АВ-801-1 (3), АВ-801-2 (4) і АВ-801-3 (2); С321R (1) – спектр синтетичного НРНТ кубо-октаедричного кристала алмазу.

Знахідки алмазів у корі вивітрювання серпентинітів, центральна частина Українського щита

Більше десятка дрібних жовто-зелених кристалів алмазу знайдено в пробах із кори вивітрювання серпентинітів поблизу с. Капітанка. Розміри кристалів не перевищують $0,3\text{ mm}$. Два із них продемонстровані на рис. 3. Перший кристал є контактним двійником октаедрів в площині (111) (див. рис. 3 а, б), що зазнав значного розчинення його поверхні. Скульптури розчинення граней октаедрів представлені візерунками виразних прямо-паралельних трикутних впадин, що зайняли майже всі центральні частини граней. Внаслідок розчи-

нення біля реберні ділянки граней октаедрів перетворилися в поверхні тригон-триоктаедра, а біля вершинні – в мініатюрні поверхні тетрагон-триоктаедра. Такі рідкісні картини розчинення октаедрів алмазу відомі й для його кристалів природного походження, а також відтворені для кристалів алмазу експериментально. Тобто цей двійник октаедрів можна було б прийняти як природний кристал. Проте інші кристали із тих же проб кори вивітрювання серпентинітів належать до синтетичних кристалів алмазу. Так, кристал на рис. 3, *в* є типовим представником синтетичного НРНТ алмазу. Це зросток плоско- і гладкогранних кубо-октаедрів, до того ж одна грань октаедра є скелетною, що властиво синтетичним кристалам алмазу. Тому, мабуть, всі знайдені алмази в корі серпентинітів слід віднести до синтетичних кристалів. Напрямі і способи засмічення цих проб серпентинітів кристалами синтетичного алмазу також є загадкою.

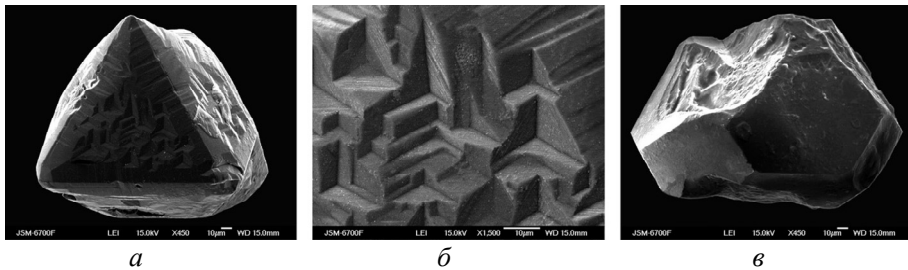


Рис. 3. Алмази, які знайдені в концентраті проби керна з кори вивітрювання серпентинітів (с. Капітанка, Український щит): *a* – контактний двійник октаедрів; *б* – прямо-паралельні трикутні впадини розчинення на грані (111) двійника октаедрів; *в* – зросток двох кубо-октаедрів.

Знахідки алмазів у осадових породах, центральна частина Українського щита

В пробі алювіального піску із р. Ятрань виявлено кристалографічно унікальний мікрокристал алмазу розміром 0,2 мм. Це жовтий контактний двійник кубо-октаедрів зі скульптурами розчинення граней куба і октаедра (рис. 4, *a*). Грані куба орнаментовані численними чотирикутними впадинами (див. рис. 4, *б*), а грані октаедра – прямо-паралельними трикутними впадинами, аналогічними впадинам зображеним на рис. 3, *б*. Окрім того, приреберні ділянки кристалів представлені вузькими гранями тетрагон-триоктаедра і тригон-триоктаедра. Водночас частина поверхонь куба і октаедра не зазнала розчинення. Релікти таких поверхонь – плоских і гладких граней куба та жовтий колір кристалів, є підставою віднесення даного зростка до синтетичного алмазу. У всякому разі, серед декількох тисяч мікрокристалів природного алмазу подібні кубічні поліедри автором не зафіксовано.

Знахідки кородованих синтетичних алмазів у корінних і осадових породах

Час від часу в пробах із кристалічних і осадових порід Українського щита попадаються дрібні кристали алмазу, що зазнали сильної термічної корозії. Наприклад, грані куба і октаедра кристала алмазу на рис. 5 покриті різними численними впадинами. Плоскі грані куба і габітус кристала однозначно визначають його належність до синтетичного алмазу. Загалом форма впадин на гранях цього алмазу близька до форми впадин кристала на рис. 4. Однак контури впадин тут переважно не чіткі, вони роз'їджені, особливо на гранях октаедра (див. рис. 5, *б*, рис. 6). Такі корозійні впадини можуть виникати вна-

слідок руйнування поверхні граней кристала алмазу під час сильного нагрівання – його “згоранні”. Можливий різний спосіб потрапляння таких синтетичних кристалів алмазу в природні об’єкти з різного абразивного інструменту, зокрема із бурових коронок.

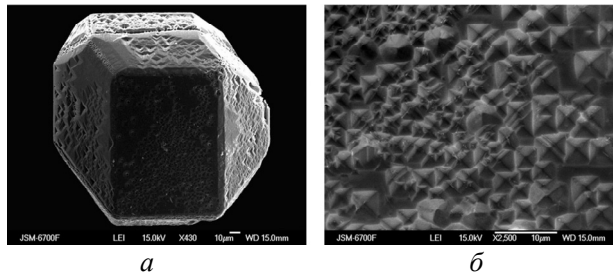


Рис. 4. Алмаз із алювію р. Ятрань (Український щит): *а* – зросток двох кубо-октаєдрів; *б* – чотирикутні впадини розчинення на грані (100) зростка кубо-октаєдрів.

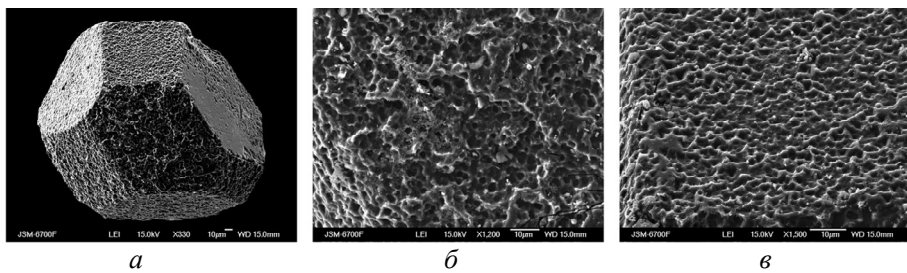


Рис. 5. Скульптури корозії поверхні граней кубо-октаєдра синтетичного НРНТ алмазу: *б* – на грані (111); *в* – на грані (100).

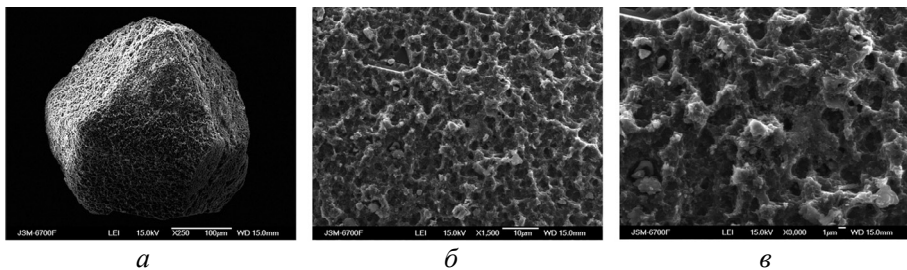


Рис. 6. Скульптури корозії поверхні граней октаєдра синтетичного НРНТ алмазу (*а*); *б*, *в* – скульптури за різного збільшення.

Насамкінець зауважимо, що такий же кубо-октаєдричний габітус і жовто-зелений колір мають мікрочастинки алмазу із офіолітів і вивержень деяких сучасних вулканів [12, 13]. Грані цих кристалів є плоскими і гладкими, а самі кристали можуть бути ускладненими малими гранями ромбододаєдра і тетрагон-триоктаєдра. Це також додатково ускладнює визначення природи сумнівних знахідок алмазів подібних до НРНТ кристалів. Втім природне походження кристалів алмазу із вище вказаних порід піддається сумніву [13].

Все ж, тільки вивчення твердих і флюїдних поліфазових включень у кристалах алмазу сумнівного походження, наприклад, із таких українських локалітів, як вище вказані серпентиніти чи сучасні алювіальні піски, може точніше прояснити їхній генезис – вони є природними чи штучними утвореннями. Таке вивчення включень у мікроалмазах потребує застосування раманівської спектроскопії і методів трансмісійної електронної мікроскопії.

ВИСНОВКИ

Основними ознаками для з'ясування синтетичного НРНТ чи природного походження знайдених у природі кристалів алмазу є особливості їхньої морфології, колір, ізотопний склад вуглецю, азотні центри і тверді включення. Найбільш доступними індикаторними показниками тут є фізіографічні ознаки кристалів алмазу – їхня морфологія та колір. У багатьох випадках вони є визначальними. Виявлення інших ознак кристалів алмазу потребує більш складнішого інструментального застосування, насамперед це стосується визначення ізотопного складу вуглецю, домішок азоту та їхнього стану і твердих включень.

Набір простих форм {111}, {100}, {110}, {311}, {511}, {711} на кристалах, плоска і гладка поверхня граней цих форм та їхня специфічна мікротопографія, домінуючий кубо-октаедричний і зрідка ромбододекаедричний та тетрагон-триоктаедричний габітуси кристалів, їхня відносно проста зонально-секторіальна кубо-октаедрична внутрішня будова, жовтий, жовто-зелений і сірий колір кристалів, відсутність їхньої видимої фотолюмінесценції в ультрафіолетовому промінні, легкий ізотопний склад вуглецю, вміст домішок переважно неагрегованого азоту і належність кристалів до спектрального типу *Ib* чи *IIa* та наявність твердих включень металів Ni, Fe, Co, Mn дозволяють віднести такі кристали до синтетичного НРНТ алмазу.

ФІНАНСУВАННЯ

Дану роботу не було профінансовано із зовнішніх джерел.

V. M. Kvasnytsya

Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation,

National Academy of Science of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Synthetic HPHT diamonds as pseudo-indicators
of diamond-bearing rocks

A comparison of synthetic HPHT and natural diamonds was made according to the main parameters and a significant difference between them was shown. The main indicator features of synthetic HPHT diamonds, which can be used to recognize their findings in natural objects, are highlighted. The reliability of the findings of HPHT diamonds in the rocks of the Ukrainian Shield is considered. Findings in samples of concentrates from crystalline and terrigenous rocks of diamonds similar to their synthetic HPHT crystals are pseudo-indicators of diamond-bearing rocks and require detailed study.

Keywords: synthetic HPHT diamond, natural diamond, indicator signs, the Ukrainian Shield.

1. Гейко Ю.В., Гурский Д.С., Лыков Л.И., Металиди В.С., Павлюк В.Н., Приходько В.Л., Цымбал С.Н., Шимкив Л.М. Перспективы коренной алмазоносности Украины. Киев-Львов: Изд-во Центр Европы, 2006. 200 с.
2. Бондаренко В.А., Лацько В.Г., Стрекозов С.Н., Козарь Н.А. Результаты алмазопроисковых работ в пределах Приазовского блока Украинского щита. *Наук. пр. УкрНДМІ НАН України*. 2011. № 9, ч. 2. С. 262–281.
3. Шеремет Е.М., Козарь Н.А., Стрекозов С.Н., Чашка А.И., Бондаренко В.А., Федоришин Ю.И., Пигулевский П.И. Поиски алмазов в Приазовском блоке Украинского щита. Донецк: Ноулидж, 2014. 367 с.
4. Физические свойства алмаза: Справ. под ред. Н.В. Новикова. Киев: Наук. думка, 1987. 188 с.
5. Курдюмов А.В., Малооголовец В.Г., Новиков Н.В., Пилянкевич А.Н., Шульман Л.А. Полиморфные модификации углерода и нитрида бора. Справ. Москва. Металлургия. 1994. 318 с.

6. Бокий Г.Б., Безруков Г.Н., Клюев Ю.А., Налетов А.М., Непша В.И. Природные и синтетические алмазы. Москва: Наука. 1986. 222с.
7. Kvasnytsya V. Crystal forms of natural microdiamonds. *Diam. Relat. Mater.* 2013. Vol. 39, October. P. 89–97.
8. Stachel T., Cartigny P., Chacko T., Pearson D.G. Carbon and nitrogen in mantle-derived diamonds. *Rev. Mineral. Geochem.* 2022. Vol. 88, no. 1. P. 809–875.
9. Stachel T., Aulbach S., Harris J.W. Mineral inclusions in lithospheric diamonds. *Rev. Mineral. Geochem.* 2022. Vol. 88, no. 1. P. 307–391.
10. Day M., Pamato M., Novella D., Nestola F. Imperfections in natural diamond: the key to understanding diamond genesis and the mantle. *Riv. Nuovo Cimento.* 2023. Vol. 46, no. 327. P. 381–471.
11. Малоголовец В.Г., Вишневикий А.С. Новые данные о поглощении синтетическими алмазами в однофононной области. ДАН СССР. 1975. Т. 225, № 2. С. 319–321.
12. Lian D., Yang J. Ophiolite-hosted diamond: A New window for probing carbon cycling in the deep mantle. *Engineering.* 2019. Vol. 5, no. 3. P. 406–420.
13. Litasov K.D., Kagi H., Voropaev S.A., Hirata T., Ohfuji H., Ishibashi H., Makino Y., Bekker T.B., Sevastyanov V.S., Afanasiev V.P., Pokhilenko N.P. Comparison of enigmatic diamonds from the Tolbachik arc volcano (Kamchatka) and Tibetan ophiolites: assessing the role of contamination by synthetic materials. *Gondwana Res.* 2019. Vol. 75. P. 16–27.

Надійшла до редакції 19.02.24

Після доопрацювання 19.02.24

Прийнята до опублікування 23.02.24