

В. М. Квасниця

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

Поліедрична форма мінеральних включень у кристалах алмазу за даними гоніометрії

На підставі власних досліджень та огляду публікацій узагальнено дані гоніометричного вивчення морфології кристалів мінеральних включень в алмазах із кімберлітів і розсипів. Розглянуто морфологію включень олівіну, гранату і хромшпінеліду. Для більшості вивчених включень цих мінералів інструментально доказано алмазну форму їхніх кристалів. Утворення такої форми – наслідок впливу на мінеральні включення негативної морфології кристалів алмазу як мінералу-господаря. Форма цих включень відображає всі особливості морфології алмазу: можливі прості форми, габітус, обрис і топографію поверхонь граней. Безсумнівними аргументами підтвердження сингенезису мінеральних включень з алмазною формою і кристалів алмазу, в яких вони знаходяться, є лише ознаки їхнього сумісного росту – наявність на кристалах-включеннях індукційних псевдорейбер, псевдограней і псевдовершин.

Ключові слова: алмаз, мінеральні включення, олівін, гранат, хромшпінелід, кристаломорфологія, прості форми, механізм утворення алмазної форми включень.

ВСТУП

Нині відомо декілька десятків мінералів, вивчених як включення у кристалах мантійного алмазу з кімберлітів, лампроїтів, лампрофірів і метакоматитів [1]. Вони представляють майже всі класи мінералів. Відносно часу утворення кристалів алмазу включення можуть бути протогенетичними (утворилися раніше алмазу або зони росту кристала алмазу, в якій вони перебувають), сингенетичними (одночасний ріст мінерального включення і зони алмазу, де воно знаходиться) і епігенетичними (післяалмазні, що утворилися всередині кристала після припинення кристалізації алмазу, зазвичай внаслідок заліковування тріщин). Всі вони важливі для відтворення історії кристалів алмазу. Різноманітні дані вивчення мінеральних включень у кристалах алмазу часто використовують для визначення типу мантійного середовища і p , T -умов кристалізації алмазу, глибини існування мантійних алмазозонних порід і утворення алмазів, геохімічних і петрологічних особливостей цих порід, для датування мінералів-включень і самих алмазів тощо. Власне лише прото- і сингенетичні включення в алмазах є чи не єдиними незайнятими глибинними зразками, вивчення яких необхідне для розуміння геологічних процесів у мантії Землі.

У кристалах алмазу виявлено включення алмазу, графіту, гранату, олівіну, енстатиту, хромдіопсиду, хромшпінеліду, рутилу, коеситу, магнетиту, піриту, піротину, пентландиту тощо. Для двох основних мантійних середовищ утворення алмазів визначальними є такі мінерали: для перидотитової асоціації –

піроп, олівін, енстатит, хроміт; для еклогітової асоціації – піроп-альмандин, клінопіроксен, рутил, кіаніт, корунд, коесит. Існують певні труднощі щодо визначення сингенезису чи протогенезису цих включень, необхідного для обґрунтування їхніх взаємозв'язків з алмазом [2–9]. Запропоновано великий набір критеріїв, які використовують для доказу одночасності кристалізації та парагенетичного зв'язку мінералу-включення з мінералом-господарем [2]. З них найважливішими є кристалографічні дослідження мінералів-включень та кристалів алмазу, що їх вміщують – порівняння морфології і взаємовідносин кристала алмазу і твердих включень у ньому. Серед цих досліджень нині переважає вивчення структурних зв'язків мінералу-включення з мінералом-господарем за допомогою рентгенівських методів (наприклад, [4, 8, 9]). Вони є більш доступними завдяки можливості деструктивного шляху вивчення співіснуючих мінералів, тоді як інструментальні гоніометричні дослідження морфології включень вимагають вилучення мінералу-включення з кристала-господаря. Самі ж включення є переважно дуже дрібними кристалами від < 50 мкм до рідкісних > 500 мкм [7]. Тому проведених гоніометричних досліджень кристалів-включень в природному алмазі обмаль і вони зовсім відсутні для включень у кристалах штучного алмазу. Нижче узагальнено літературні дані й власні результати гоніометричних досліджень мінеральних включень у кристалах алмазу з кімберлітів Якутії і Біломор'я (РФ).

ВРАЗИКИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для гоніометричного вивчення кристалів-включень в алмазах автором використано двоколовий гоніометр ГД-1. Відхилення заміряних координат граней кристалів від їхніх теоретичних значень не перевищували $\pm 2^\circ$. Для вивчення особливостей морфології кристалічних включень застосовано растрову електронну мікроскопію (РЕМ) – дослідження проводили за допомогою мікроскопа REMMA-102 (SEIMI, Україна). Процедура РЕМ-досліджень: на кристали включень було нанесено вуглецеве покриття, умови експлуатації: прискорювальні напруги – 5 і 15 кВ, сила струму – $5 \cdot 10^{-10}$ А. Проведено гоніометричні та РЕМ-дослідження біля десятка кристалів мінералів-включень з алмазів Якутії і Біломор'я. Діагностика вивчених автором включень підтверджена рентгеноспектральними дослідженнями хімічного складу, а структурні та морфологічні особливості включень вивчено рентгенівськими методами. Розміри включень становили не більше 0,6 мм. Дослідження проведено в Інституті геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М. П. Семененка НАН України. Також розглянуто дані гоніометричних досліджень понад десятка кристалів мінералів-включень з якутських алмазів, виконаних З. В. Бартошинським у Львівському національному університеті ім. Івана Франка.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дані гоніометричних досліджень найпоширеніших мінералів-включень в алмазі: олівіну, гранату і хромшпінеліду, представлено в таблиці, а їхні РЕМ-знімки на рис. 1. Інші подібні дослідження мінералів-включень у кристалах алмазу автору невідомі.

Включення олівіну

Перші гоніометричні дослідження мінеральних включень в алмазі, у світі взагалі і олівіну в кристалах алмазу з кімберлітів Якутії зокрема, виконав З. В. Бартошинський [10, 11]. Кристали олівіну виявилися протогенетичними включеннями (див. таблицю). Їм властива типова для олівіну морфологія.

Вони представлені ідіоморфними кристалами пінакоїдального, пінакоїдально-призматичного і призматичного габітусів, серед яких пінакоїдальні кристали трапляються частіше. Головні форми кристалів олівину: {010}, {540}, {140}, {132}, {210}, {230} і {120}. Прості форми і габітус кристалів олівину є беззаперечним доказом їхнього захоплення і консервації кристалами алмазу без будь-яких суттєвих змін, можливо, окрім деякого округлення вершин і ребер. Включення кристалів олівину не зазнали можливої трансформації під час тривалого перебування кристалів алмазу в мантії, тобто не відчували морфологічного впливу алмазу на їхню форму.

Результати гоніометричних досліджень мінеральних включень у кристалах алмазу з кімберлітів

Кристали алмазу та мінерали-включення в них		Кристаломорфологія включень			Література
Джерело і форма кристала-господаря	Мінерал-включення	Габітус	Головні форми	Другорядні форми	
Кімберлітова трубка “Удачная” (Якутія), октаедр	Олівін, 1 кристал	Пінакоїдально-призматичний	{010}, {540}, {140}, {132}	{130}, {180}, {304}, {172}, {142} та інші	[10]
Декілька кристалів з якутських кімберлітів, октаедри (?)	Олівін, декілька кристалів	Пінакоїдальний, пінакоїдально-призматичний, призматичний	{010}, {210}, {230}, {120}, {140}	{011}, {101}, {111}, {112} та інші	[11]
Кімберлітові трубки: “Архангельська” і “Карпінського” (Біломор’є), додекаедроїд і кристал перехідної форми {111}+{110}	Олівін, 2 кристали (див. рис. 1, а)	Октаедричний	{111}	{231}	[12]
Кімберлітові трубки: “Архангельська”, “Карпінського” і “Ломоносова” (Біломор’є), 3 додекаедроїди	Гранат, 3 кристали	Октаедричний	{111}	{221}, {110}, {241}	[12]
Кімберлітова трубка “Удачная” (Якутія), октаедр	Гранат, 1 кристал	Октаедричний	{111}	{331}, {551}, {991}, {774}, {544}, {453}	[10]
9 кристалів з якутських кімберлітів, октаедри (?)	Гранат, 9 кристалів	Октаедричний	{111}	{100}, {221}, {331}, {441}, {551}, {661}, {771}, {332}, {553}, {665}, {211}, {311}, {433}, {453}, {781} та інші	[13]

(Продовження)

Розсип ріки Біллях (Якутія), двійник додекаедроїдів	Гранат, 1 кристал (див. рис. 1, б)	Комбінаційний $\{111\} + \{100\} + \{221\}, \{331\}, \{hhl\} + \{hkk\} + \{hkl\}$	$\{111\}, \{100\}, \{221\}, \{331\}, \{322\}, \{511\}, \{783\}, \{3.11.1\}$	$\{332\}, \{441\}, \{552\}, \{553\}, \{554\}, \{773\}, \{775\}, \{885\}, \{887\}, \{994\}, \{110\}, \{533\}, \{611\}, \{722\}, \{922\}, \{988\}, \{582\}, \{786\}, \{796\}$ та інші	[14]
Кімберлітові трубки “Архангельська”, “Карпінського” і “Ломоносова” (Біломор’є), 3 додекаедроїди	Хромшпінелід, 3 кристали (див. рис. 1, в-е)	Октаедричний $\{111\}$	$\{100\}, \{110\}$	[12]	

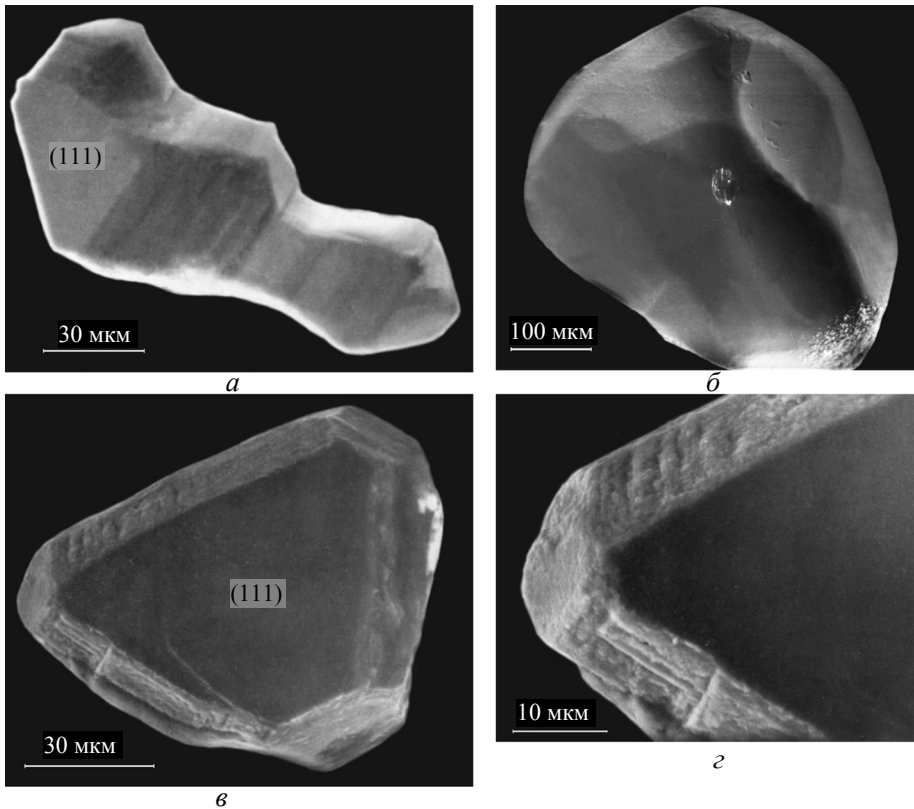


Рис. 1. РЕМ-знімки включень олівіну і хромшпінеліду в додекаедричних кристалах алмазу з кімберлітів Біломор’я та гранату в двійнику додекаедроїдів алмазу з Якутії: а – олівін, трубка “Карпінського”, Біломор’є; б – гранат, розсип р. Біллях, Якутія; в, д, е – хромшпінеліди, кімберлітові трубки “Архангельська”, “Карпінського”, “Ломоносова”, Біломор’є (г – деталізація кристала в).

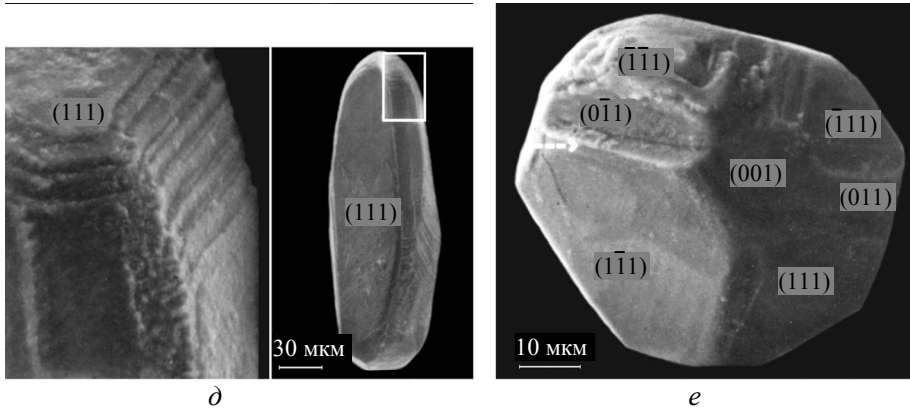


Рис. 1. (Продовження).

Особливо унікальним є кристал алмазу з трубки “Удачная” (Якутія), що містить незвичайну асоціацію включень: по два кристали гранату, олівину і хром діопсиду та зросток гранату з хромдіопсидом. Разом з ідіоморфними кристалами олівину в алмазі знаходилося включення гранату октаедричної форми [10]. Октаедр майже не властивий кристалам гранату завдяки гвинтовим осям третього порядку у його структурі, що є причиною другорядної ролі цієї форми для кристалів гранату із самих різних порід. Характерними простими формами таких кристалів гранату є ромбододекаедр і тетрагон-триоктаедр $\{211\}$. Гоніометричні дослідження кристалів-включень цих двох мінералів свідчать, що у кристалі алмазу асоціюють різні за генезисом включення – протогенетичне олівину і, можливо, сингенетичне гранату. Пояснення такого поєднання в одному кристалі алмазу різних за походженням форм включень двох мінералів розглянуто нижче.

Зовсім іншу морфологію мають два кристали олівину в алмазах із кімберлітових трубок “Архангельська” і “Карпінського” (Біломор’є). Вміст форстеритового компоненту в кристалах складає 92–93 % [12]. Обидва кристали належать до октаедрів. Їхні грані є плоскими і відносно гладкими. Один із кристалів сильно сплющений вздовж осі третього порядку, інший – сильно видовжений вздовж осі четвертого порядку з добре розвинутою паралельною штриховкою (див. рис. 1, *a*). Октаедрична форма включень відрізняється від округлої і напівкруглої форми кристала-господаря. На алмазі широкі ромбододекаедричні поверхні на місці ребер вкриті снопоподібною штриховкою.

Включення гранату

Вивчено три включення гранатів із біломорських алмазів. Вони представлені бузковим надзвичайно високохромистим піропом ($\text{Cr}_2\text{O}_3 = 14,88\%$) і двома помаранчевими піроп-альмандинами, магнієво-залізистими ($\text{CaO} = 10,88$ і $15,09\%$) [12]. Вилучені з додекаедроїдів тверді включення мають октаедричну форму, яка контрастує з округлою формою алмазів. Другорядні грані на кристалах цих включень рідкісні.

Таку ж просту октаедричну форму має кристал гранату з майже ізометричного октаедра алмазу з кімберлітів трубки “Удачная”, який асоціює з включеннями ідіоморфного кристала олівину і хромдіопсиду [10]. Грані алмазного октаедра складені серією товстих пластин дитригональної форми, зміщених одна відносно іншої у напрямку до ребер і вершин. Кристал гранату є сильно видовженим вздовж осі другого порядку. Як зазначено вище, включення олівину є протогенетичним із власними простими формами (див. таблицю). До-

мінувальне положення на кристалі гранату займають різні за площею грані октаедра, а на місці ребер октаедра розвинені вузькі циліндричні поверхні, місцями з тонкою паралельною штриховкою. Нечисленні другорядні прості форми на циліндричних поверхнях гранату представлені переважно різними тригон-триоктаедрами.

Значно більше другорядних простих форм виявлено на включеннях гранату з дев'яти октаедричних (?) якутських алмазів (див. таблицю), що відрізняються за мікроморфологією поверхні [13]. Результати гоніометричних досліджень цієї серії кристалів гранату свідчать, що найчастішою формою є октаедр і куб, тоді як ромбододекаедр має підлегле значення. На долю тригон-триоктаєдрів припадає 34,7 % всіх форм, гексоктаєдрів – 20,1 %, тетрагон-триоктаєдрів – 17,1 % і тетрагексаєдрів – лише 0,8 %. Привертає увагу той факт, що майже 80 % усіх заміряних форм групється в найважливішій для алмазу зоні [110]. Серед тригон- і тетрагон-триоктаєдрів на вивчених кристалах гранату виявлено практично всі форми алмазного типу з невеликими індексами. До найбільших за площею належать грані із символами {111}, {433}, {781}, {453}. Рентгенометричні дослідження кристалів гранату (методом лауєграм) показали, що у всіх дев'ятох вивчених кристалах зовнішня форма індивідів не відповідає їхній внутрішній симетрії. Тобто морфологія цих включень не властива кристалам такого хімічного складу. Морфологія кристалів гранату є алмазною і утворилася внаслідок впливу на включення кристалічної структури алмазу через його прості форми, у якому вони містяться. Вище вже було зазначено, що найчастішими габітусними формами на звичайних кристалах гранату є ромбододекаедр і тетрагон-триоктаедр {211}. Автори [13] вважають, що форма вивчених включень кристалів гранату не є результатом взаємодії двох мінералів (алмазу й гранату), що кристалізувалися одночасно, а повністю індукована алмазом. Автори допускають, що на початкових етапах форма гранату, що кристалізувався одночасно з алмазом, була іншою. Проте, внаслідок швидшого росту останнього його шари росту на відповідних гранях своїми торцями формували алмазну полієдрію гранату, ніби гасячи його власні грані. Однак надійних доказів вважати визначені форми кристалів гранату індукційними нема.

Унікальні за морфологією та складом включення гранату (деякі з них з олександритовим ефектом) та олівіну виявлені в алмазі з розсипу р. Біллях (Якутія) [14]. Алмаз масою 28,4 мг, що є двійником округлих індивідів – додекаєдроїдів (контактний двійник, площина двійникування (111)), містить чотири тверді включення, різні за складом, розміром та забарвленням.

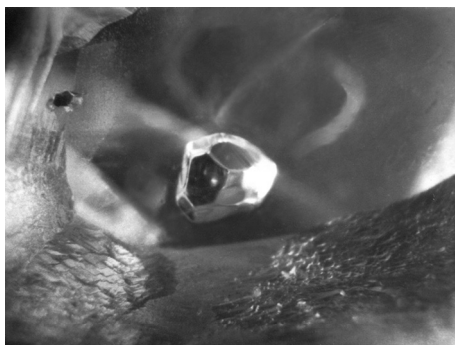


Рис. 2. Мікроснімок двох включень кристалів гранату в алмазі з розсипу р. Біллях на Анабарському щиті; розмір більшого включення гранату – 0,5 мм; менше включення знаходиться зліва, дещо вище більшого включення.

Три належать гранату і одне олівіну (див. рис. 1, б і рис. 2). Велике (~ 0,6 мм) включення гранату інтенсивно забарвлене в зелений колір, дещо менше за розміром (~ 0,5 мм) – у жовтувато-зелений з фіолетовим відтінком, найменше (< 0,1 мм) – майже безбарвне. Включення олівіну (< 0,1 мм) також безбарвне. Особливість складу мінеральних включень (піроп-гросуляр-уваровітового гранату – 15,28–20,18 % СаО, 6,79–7,29 % Сг₂О₃,

$f = 0,22-0,29$ і олівину – $f = 0,11$) дають змогу говорити про ультраосновну верлітову асоціацію алмазу. Включення гранату відрізняються не лише забарвленням (очевидно, через розмір), а й морфологією. Включення зеленого гранату, розташоване ближче до поверхні кристала-господаря, представлене пластинкою сильно сплющеного октаедра з елементами поліцентричного росту та паралельним штрихуванням. Напрямок сплюснення включення і двійника додекаедроїдів збігаються. Два інших включення гранату з центральної частини двійника, як і олівін, мають складну форму. Проведені гоніометричні дослідження видобутого жовтувато-зеленого гранату (див. таблицю, рис. 1, б) свідчать про його не тільки алмазну форму, а й про його поліедрию (рис. 3), властиву багатьом мікрокристалам алмазу з кімберлітів [15]. Серед заміряних форм найкраще розвинені $\{111\}$, $\{766\}$, $\{783\}$, $\{331\}$, $\{322\}$, $\{1.3.11\}$, $\{100\}$. Більшість простих форм на цьому кристалі-включенні є неповногранними. З октаедричних найбільшу площу займають лише дві грані, інші мініатюрні і часто округлі. З кубічних присутні всі шість граней, вони невеликі, деякі з них з ідеально гладкою поверхнею. Грані всіх інших простих форм плоскі та гладкі, іноді із закономірно розташованими кавернами та паралельним штрихуванням. Ребра та вершини кристала-включення часто округлі. Грані тетрагон-триоктаєдрів та інших форм розвинуті переважно на двох протилежних виходах осі четвертого порядку, де грані куба мають найбільшу поверхню. З лауєграми кристала, знятої вздовж цього напрямку, видно, що з “алмазною” віссю L_4 не збігаються такі структурно важливі напрямки у гранаті, як $[110]$, $[001]$ та $[111]$. Відзначимо також блочність та дифузійність плям на рентгенограмі гранату. Водночас поблизу однієї з вершин кристала гранату розвинені штриховані індукційні поверхні – псевдограні і псевдоребра, їхня поява зумовлена сумісним ростом алмазу та гранату. Отже, структурні орієнтування алмазу і гранату, обрис, габітус і набір простих форм останнього свідчать про активний вплив мінералу-господаря на формування алмазної поліедрії включення. Кристал гранату власних граней немає, тобто його форма є повністю алмазною. Інша, менша за площею, частина включення покрита індукційною поверхнею сумісного росту, тому цей кристал гранату можна віднести до сингенетичного включення.

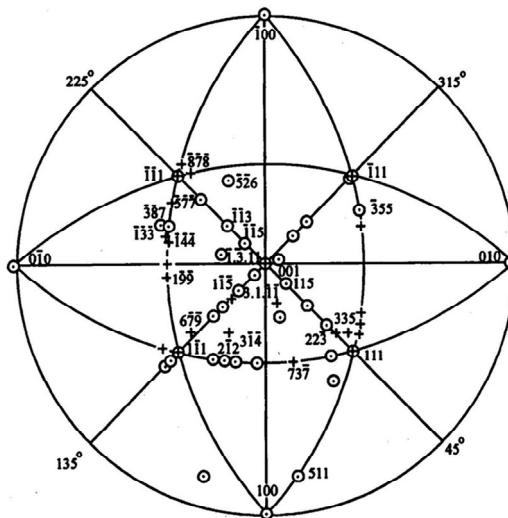


Рис. 3. Стереографічна проекція найкраще розвинутих граней простих форм на кристалі-включенні гранату в алмазі з розсипу р. Біллях на Анабарському щиті.

Включення хромшпінеліду

У габітусному плані алмазна морфологія включень хромшпінеліду в біломорських округлих алмазах виявилася одноманітною (див. рис. 1, *в-е*), а набір другорядних простих форм невеликий – найчастішими є куб і ромбододакедр (рис. 4). Для включень характерний підвищений вміст Cr_2O_3 (65,8–68,9 %) [12]. Очевидним є контраст між плоскогранною морфологією кристалів-включень хромшпінеліду і округлою формою кристалів алмазу.

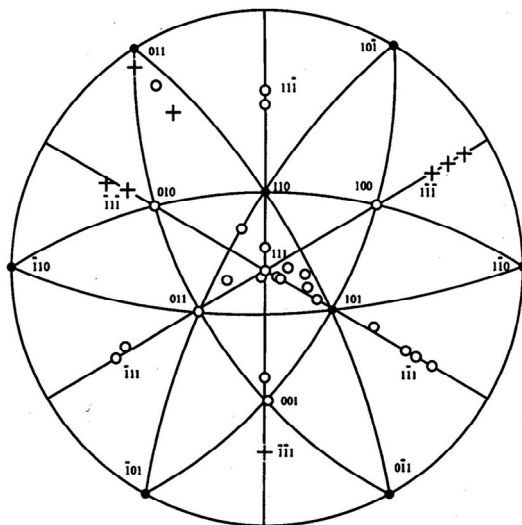


Рис. 4. Збірна стереографічна проекція найкраще розвинутих граней простих форм на кристалах-включеннях олівину, гранату і хромшпінеліду в алмазах із кімберлітів Біломор'я; установка кристалів вздовж $[111]$.

ОБГОВОРЕННЯ

Аналіз наших результатів рентгено- та гоніометрії мінеральних включень із округлих та напівкруглих кристалів біломорських і якутського алмазів свідчить про їхню морфологію, що відповідає формі негативних кристалів алмазу. Вивчені в алмазі мінерали-включення (олівін, гранат, хромшпінелід) не мають власної форми і представлені переважно спотвореними октаедрами, кубо-октаедрами та кристалами більш складної форми. Це притаманно і включенням одного мінерального виду, і різних видів, що містяться в одному кристалі алмазу. У більшості випадків спостерігаються субпаралельність форми включень головним ростовим площинам мінералу-господаря і подібність мікроморфології їхніх граней. Як правило, найрозвиненіші грані на кристалах-включеннях паралельні площинам (111) алмазу. Округла форма алмазного кристала зазвичай контрастує з переважно плоскогранною формою мінералів-включень. За даними рентгенівського дослідження включень орієнтації основних структурних напрямів кристала алмазу і мінералу-включення не збігаються. Алмазним поясам $[111]$, $[100]$ та $[110]$ можуть бути субпаралельні лише другорядні структурні напрямки кристалів включень. Морфологічні і структурні установки у кристалів-включень також різні.

Особливості будови алмазного кристала (груба-, тонка- і приховано шарова штриховка, поліцентричний ріст, обрис) відображаються в морфології кристалів мінералів-включень. Грані $\{111\}$ включень можуть бути плоскими і гладкими або скульптурованими тонким паралельним штрихуванням біля

ребер, а також усіченими поліцентрично складеними пірамідками росту. Кубічні та ромбододекаедричні поверхні включень частіше увігнуті. Перші бувають нерівно горбистими чи з чіткими квадратними усіченими пірамідками. У більшості випадків кристали-включення спотворені відповідно до спотвореної форми алмазного кристала. Оскільки найчастіше це сплющення вздовж потрійної осі, то кристал-включення також сплюснутий у цьому напрямку; водночас грані {111} включення, перпендикулярні до напрямку сплющення, найкраще розвинені. Відносно ізометричні індивіди трапляються зрідка, переважно це включення хромшпінеліду.

Зазначимо деякі особливості морфології включень різних мінералів. Так, включення хромшпінелідів представлені виключно плоскогранними багатогранниками – добре утвореними октаедрами, кубо-октаедрами та куб-ромбододекаедр-октаедрами. Поверхня їхніх граней дещо шорстка (корозійна?). Особливо це стосується граней куба і ромбододекаедра. Кристалам гранату і олівину властиве поєднання домінуютьних плоскогранних (октаедричних та інших граней) і менших за розмірами округлих форм. Деякі індивіди гранату представлені кристалами (спотвореними октаедрами) з безліччю другорядних дрібних граней, що надає їм округлих обрисів.

Частота і характер розвитку граней другорядних форм на кристалах-включеннях відображають специфіку алмазної кристаломорфології, виявленої для мікро- і макрокристалів алмазу [15]. Всі ці грані різних форм групуються навколо найважливіших форм алмазу, можливо, деякі з них належать до власних форм росту, не пригнічених алмазом, або є індукційно-компромісними поверхнями. Важливо, що серед заміряних форм є відносно добре розвинені грані куба, ромбододекаедра, тригон-триоктаєдрів {221}, {332}, тетрагон-триоктаєдрів {311}, {322}, гексоктаєдрів {231} та інших, тобто форм, характерних для складних за морфологією мікроекстремальних кристалів алмазу [15]. Все це разом вказує на відповідну залежність форми мінералу-включення від форми мінералу-господаря і водночас на переважний ріст кристала алмазу октаедричними шарами, ускладнений появою другорядних граней різних простих форм навіть у початкові періоди кристалізації його індивідів.

Узагальнені дані гоніометричних досліджень кристалів включень різних мінералів у кристалах алмазу з кімберлітів свідчать, що вони частіше набувають алмазну октаедричну форму [10–14]. Лише у деяких якутських алмазах виявлено ідіоморфні включення олівину, що однозначно вказує на їхнє протогенетичне походження. Питання про сингенезис включень з негативною алмазною формою залишається відкритим, оскільки важко з'ясувати час набуття цієї форми – вона є синхронною росту кристала алмазу чи пізнішою. Єдиною беззаперечною ознакою одночасної кристалізації алмазу і його включення є поверхні сумісного росту – індукційні псевдограні, псевдоребра і псевдовершини на останніх [16, 17]. Зафіксовано випадки, коли на кристалах-включеннях олівину і гранату поєднано ознаки їхнього сумісного росту з алмазом і ознаки набуття ними алмазної форми. Ці два характерні типи поверхні на кристалах-включеннях показано на рис. 5, а також на рис. 1, д, який є найвиразнішим віддзеркаленням особливостей морфології алмазу.

Отже, можна вважати, що в кристалах алмазу з кімберлітів домінують протогенетичні включення мінералів, зрідка фіксуються їхні сингенетичні включення з виразними індукційними поверхнями чи їхні частини, які синхронні певним зонам кристала алмазу. Імовірно, що майбутні включення мінералів як зародки найчастіше попадали саме на головні ростові площини алмазу (111). Захоплені зародки мінералів могли мати ідіо-, ксено- і округлу фор-

му. Їхня орієнтація відносно основних кристалографічних напрямків у структурі алмазу є найчастіше випадковою, незакономірною. Лише зрідка головні структурні напрямки алмазу і мінералу-включення є субпаралельними, тобто майже збігаються. Зовсім рідкісними є прояви епітаксії алмазу і його включення. Про різну орієнтацію елементів структури алмазу і його включень свідчать численні рентгенометричні дослідження цих мінералів.

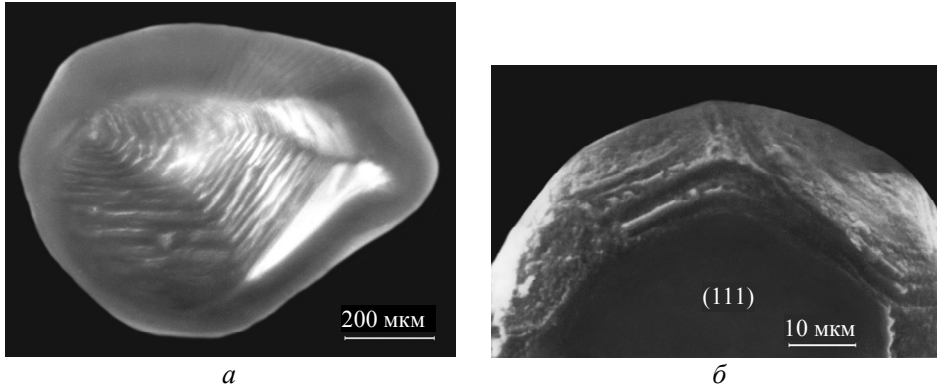


Рис. 5. РЕМ-знімки двох типів поверхні кристалів мінеральних включень в алмазі: *a* – індукційна поверхня сумісного росту олівіну в якутському алмазі з розсипу р. Біллях; *б* – негативна алмазна поверхня, яка віддзеркалює накладання октаедричної морфології алмазу на форму включення хромшпінеліду із біломорського алмазу.

Розглянемо можливий варіант утворення алмазної форми мінерального включення на прикладі вище описаних включень гранату і олівіну в алмазі з кімберлітів трубки “Удачная” [10]. Передусім ще раз зауважимо, що саме головні ростові площини алмазу (111) є найбільш імовірними місцями осідання кристалів мінералів як майбутніх включень (рис. 6). Допускаємо, що ксеноморфний чи ідіоморфний нанокристал гранату разом із флюїдом були захоплені алмазом в певній зоні під час його швидкого росту. Утворилася вакуоль з флюїдом і твердою фазою гранату всередині. Кристал гранату є протогенетичним відносно алмазу і виступає своєрідним зародком включення мінералу. У разі подальшого росту алмазного кристала вакуоль набуває форми його негативного кристала. Компоненти для росту обох мінералів поступають з флюїду. У цей же час можлива сумісна кристалізація обох мінералів з утворенням індукційних граней, ребер і вершин. Такі форми сумісного росту зафіксовані для включень гранату, олівіну і алмазу [16, 17]. Згодом настає повна консервація включення і флюїду, а також остаточна трансформація вакуолі у форму негативного кристала алмазу. Одночасно з продовженням росту кристала алмазу чи пізніше відбувається розростання кристала гранату із залишкового флюїду до повного виповнення вакуолі з набуттям алмазної форми – зовнішня форма включення стає відбитком алмазної форми вакуолі. У такому випадку включення гранату є протогенетично-сингенетичним. У ньому є імовірною зональна чи секторіальна внутрішня будова, яка повинна відображати обидві стадії його росту – протогенезису і сингенезису. Тому вивчення за допомогою різних методів дослідження особливостей внутрішньої будови таких включень належить до важливих майбутніх завдань. Тоді як ідіоморфне включення олівіну в алмазі з кімберлітів трубки “Удачная” такої історії не зазнало, а саме захоплення алмазом кристала олівіну відбулося без флюїду і без формування навколо нього вакуолі з алмазною морфоло-

гією. Отже, залежно від негативної алмазної форми вакуолі такою ж буде форма кристала-включення. Негативна форма вакуолі може бути октаедричною, кубо-октаедричною, кубо-ромбододекаедро-октаедричною чи взагалі складена, окрім граней октаедра, куба і ромбододекаедра, мікрогранями різних другорядних форм, як у разі форми включення гранату в алмазі з розсіпу р. Біллях. Найчастіше вона є октаедричною, ускладненою паралельною штриховкою (різними тригон-триоктаедрами), оскільки головна ростова форма алмазу — октаедр. Розростання включення до повного виповнення алмазної форми вакуолі може бути синхронно цій чи наступній зоні росту алмазу або відбувається взагалі після росту кристала алмазу. Тоді виникає питання про час розростання включення та про його сингенезис алмазу.

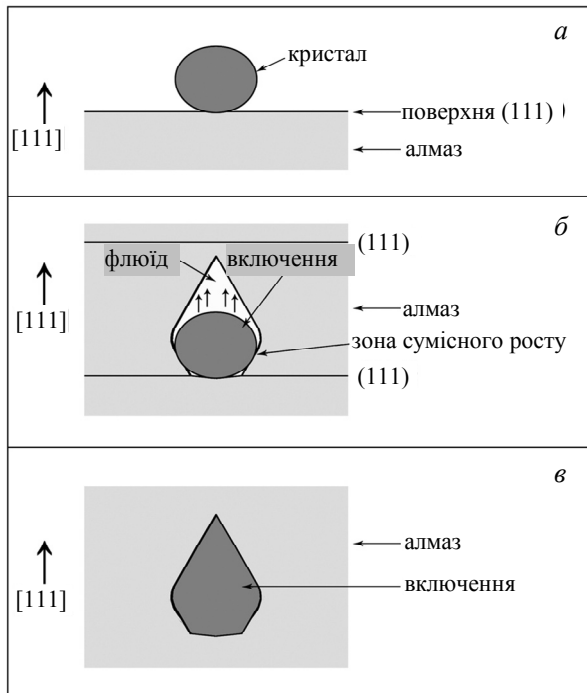


Рис. 6. Схема утворення включення з алмазною формою: *а* – осідання зародка мінералу на площині (111) кристала алмазу, що росте; *б* – утворення вакуолі негативної алмазної форми навколо осілого кристала із захопленням флюїду і наступною їхньою консервацією та можливий сумісний ріст осілого кристала-включення і алмазу з флюїду; *в* – подальший ріст включення із вакуольного флюїду до виповнення ним вакуолі алмазної форми.

Отже, розпізнавання походження форми мінеральних включень у природному алмазі вимагає насамперед проведення дослідження їхньої кристаломорфології із застосуванням різних методів, які дозволять встановити власну чи набуту форму мінералу-включення. Оскільки включення є часто нанокристаллами, то до таких методів вивчення їхньої форми необхідно залучати й трансмісійно електронно-мікроскопічні (ТЕМ) дослідження. В окремих випадках корисними можуть бути звичайні мікроскопічні дослідження включень у поєднанні з раманівською спектроскопією. Як приклад можливостей і результатів таких досліджень покажемо морфологію нановключень різних мінералів, які виявлено у мікродіамантах із неогенового розсіпу Самоткань на Українському щиті (рис. 7, 8). Серед них трапляються протогенетичні включення олівіну, графіту і алмазу (див. рис. 7, а, 8), діагностика двох останніх

підтверджена раманівською спектроскопією. Доречно відзначити, що у межах мініатюрних вакуоль в алмазах нанокристали різних мінералів саме у багатофазових флюїдних включеннях набувають власної форми (див. рис. 7, в).

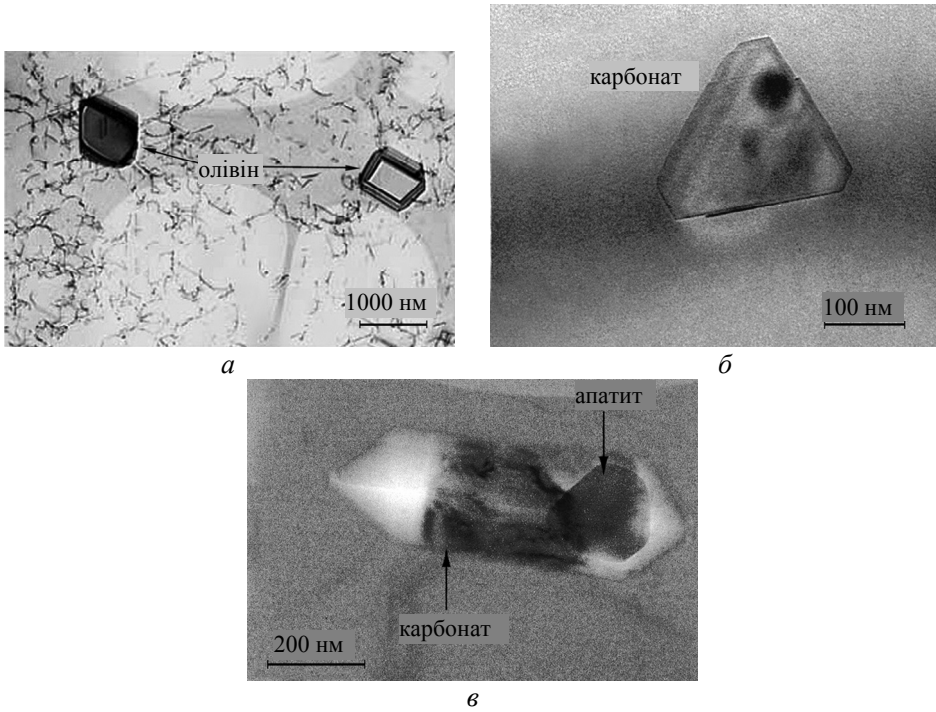


Рис. 7. ТЕМ-знімки нановключень в октаедричних мікрокристалах алмазу з неогенового розсипу Самоткань [18]: *а* – ідіоморфні кристали олівіну; *б* – кристал карбонату імовірної алмазної форми; *в* – ідіоморфний кристал апатиту у багатофазовому флюїдному включенні; діагностику включень проведено за їхнім хімічним складом.

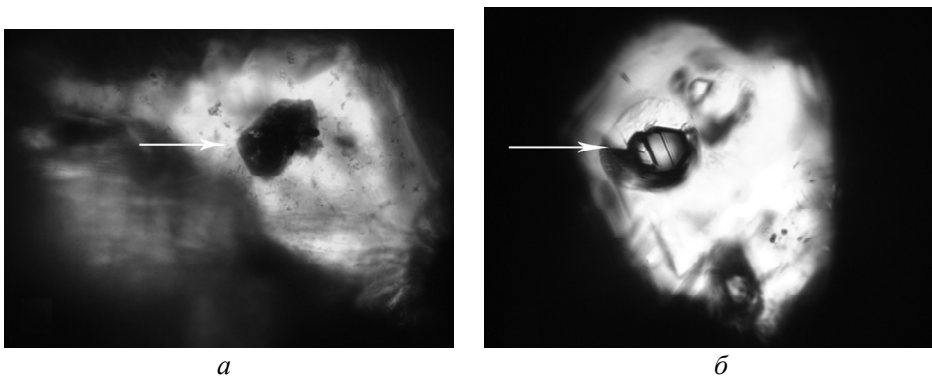


Рис. 8. Мікроснімки ідіоморфних нановключень графіту (*а*) і алмазу (*б*) в октаедричних мікрокристалах алмазу з неогенового розсипу Самоткань. Діагностика включень виконана за їхніми раманівськими спектрами; розміри кристалів алмазу – 0,3 мм.

Загалом іншою є морфологія твердих включень у кристалах штучного НРНТ алмазу, серед них домінують ксеноморфні форми [19–22]. Автору невідомі гоніометричні дослідження включень в кристалах цього алмазу. Форма його включень інструментально не вивчена, окрім згадок, наприклад, про поліедричні включення сполук Fe–Ni і алмазу [21, 22]. Гоніометричні дослідження твер-

дих включень у кристалах штучного алмазу допомогли б з'ясувати особливості їхньої можливої поліедриї (наприклад, для досить поширених пластинчастих виділень), враховуючи короткий час росту кристалів цього алмазу порівняно з передбачуваним довготривалим часом кристалізації природного алмазу.

ВИСНОВКИ

За даними гоніометричних досліджень алмазні форми характерні для кристалів мінеральних включень в алмазі. Вони є негативними формами кристалів алмазу і відображають всі особливості їхньої морфології: можливі прості форми, габітус, обрис і топографію поверхонь граней.

Серед вивчених мінеральних включень найбагатшими на алмазні форми виявилися кристали гранату. Морфологічна і структурна установки кристалів мінеральних включень не збігаються, що є одним із доказів набуття ними алмазної морфології.

Слід розрізняти два типи поверхонь кристалів мінеральних включень в алмазі: поверхні сумісного росту з утворенням індукційних псевдо-граней, псевдо-ребер і псевдо-вершин і поверхні негативного віддзеркалення алмазної морфології. На сингенезис мінеральних включень з кристалами алмазу, в яких вони знаходяться, явно вказують лише характерні ознаки їхнього сумісного росту: наявність на кристалах включень індукційних псевдо-ребер, псевдо-граней і псевдо-вершин.

Набуття алмазної форми кристалами мінеральних включень є можливим лише в разі консервації алмазом їхніх зародків разом з флюїдом. За особливостями морфології кристалів мінеральних включень можна відтворювати анатомію кристалів алмазу та їхній механізм росту.

ФІНАНСУВАННЯ

Ця робота була підтримана постійним інституційним фінансуванням. Жодних додаткових грантів на проведення чи керівництво цим дослідженням отримано не було.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автор цієї роботи заявляє, що він не має конфлікту інтересів.

V. M. Kvasnytsya

Seimenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation,

National Academy of Science of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Polyhedral shape of mineral inclusions in diamond crystals

according to goniometry data

Based on own research and a review of publications, the data of the goniometric study of crystals of mineral inclusions in diamonds from kimberlites and placers are summarized. The morphology of inclusions of olivine, garnet, and chromium spinelide is considered. For most studied inclusions of these minerals, diamond faceting of their crystals has been instrumentally proven. The formation of such faceting is a consequence of the impact on the mineral inclusions of diamond negative morphology as the host mineral. The faceting of such inclusions reflects all the features of diamond morphology: possible simple crystal forms, habit, outline and topography of the face surfaces. An undoubted argument for the syngeneses of diamond-faceting mineral inclusions with the diamond crystals containing them is only the typical signs of their simultaneous growth – the presence of induction pseudo-edges, pseudo-faces and pseudo-vertices on inclusion crystals.

Keywords: diamond, mineral inclusions, olivine, garnet, chromium spinelide, crystal morphology, simple crystal forms, mechanism of formation of diamond-faceting inclusions.

1. Stachel T., Aulbach S., Harris J.W. Mineral inclusions in lithospheric diamonds. *Rev. Mineral. Geochem.* 2022. Vol. 88, no. 1. P. 307–392.
2. Соболев Н.В. Глубинные включения в кимберлитах и проблема состава верхней мантии. Новосибирск: Наука, 1974. 264 с.
3. Taylor L.A., Anand M., Promprated P. Diamonds and their inclusions: Are the criteria for syngeneses valid? *8th Int. Kimberlite Conf. Extended Abstract Volume.* Victoria, Canada. 2003. P. 397–402.
4. Nestola F., Nimis P., Angel R.J., Milani S., Bruno M., Prencipe M., Harris J.W. Olivine with diamond-imposed morphology included in diamonds: Syngeneses or protogeneses? *Int. Geol. Rev.* 2014. Vol. 56, no. 13. P. 1658–1667.
5. Nestola F., Jung, H., Taylor L.A. Mineral inclusions in diamonds may be synchronous but not syngenetic. *Nature Commun.* 2017. Vol. 8, no. 1. P. 1–6.
6. Bruno M., Ghignone S., Aquilano D., Nestola F. Is the imposition of diamond morphology on mineral inclusions a syngenetic or post-genetic process with respect to diamond formation? *Crystal Growth Design.* 2023. Vol. 23, no. 7. P. 5279–5288.
7. Harris J.W., Smit K.V., Fedortchouk Y., Moore M. Morphology of monocrystalline diamond and its inclusions. *Rev. Mineral. Geochem.* 2022. Vol. 88, no 1. P. 119–166.
8. Angel R.J., Alvaro M., Nestola F. Crystallographic methods for non-destructive characterization of mineral inclusions in diamonds. *Rev. Mineral. Geochem.* 2022. Vol. 88, no. 1. P. 257–306.
9. Соболев Н.В., Сереткин Ю.В., Логвинова А.М., Павлушин А.Д., Угапьева С.С. Кристаллографическая ориентировка и геохимические особенности минеральных включений в алмазах. *Геология и геофизика.* 2020. Т. 61, № 5–6. С. 774–793.
10. Соболев Н.В., Бартошинский З.В., Ефимова Э.С., Лаврентьев Ю.Г., Поспелова Л.Н. Ассоциация оливин – гранат – хромдиопсид из якутского алмаза. *Доклады АН СССР.* 1970. Т. 192, № 6. С. 1349–1352.
11. Бартошинский З.В., Ефимова Э.С. Кристаллография включений оливина в алмазах *Минералогический сборник Львовского государственного университета им. Ив. Франка.* 1974. № 28, вып. 2. С. 67–71.
12. Квасница В.Н., Захарченко О.Д., Вишневецкий А.А., Мельников В.С. Морфология минеральных включений в алмазах Беломорья. *Минерал. журнал.* 1993. Т. 15, № 4. С. 38–46.
13. Бартошинский З.В., Ефимова Э.С., Жихарева В.П., Соболев Н.В. Кристалломорфология включений граната в природных алмазах. *Геология и геофизика.* 1980. Т. 21, № 3. С. 12–22.
14. Квасница В.Н., Вишневецкий А.А., Возняк Д.К., Кутузова Т.Я., Кириллин А.С. Ассоциация пироп-гроссуляра-уваровитового граната и оливина в алмазе. *Минерал. журнал.* 1992. Т. 14, № 2. С. 80–88.
15. Kvasnytsya V. Crystal forms of natural microdiamonds. *Diamond Relat. Mater.* 2013. Vol. 39. P. 89–97.
16. Возняк Д.К., Квасница В.М. Мінеральні і флюїдні включення в кристалах алмазу і циркону із кимберлітів та їх генетичне значення. *Записки Українського мінералогічного товариства.* 2009. Т. 6. С. 14–29.
17. Возняк Д.К., Квасница В.Н. Обоснование генетического типа минеральных включений в кристаллах эндогенного алмаза. *Минерал. журнал.* 2013. Т. 35, № 2. С. 49–55.
18. Kvasnytsya V.M., Wirth R. Nano-inclusions in microdiamonds from Neogenic sands of the Ukraine (Samotkan' placer): A TEM study. *Lithos.* 2009. Vol. 113, no. 3–4. P. 454–464.
19. Бокій Г.Б., Безруков Г.Н., Клюев Ю.А., Налегов А.М., Непша В.И. Природные и синтетические алмазы. Москва: Наука, 1986. 222 с.
20. Shulshenko A.A., Varga L., Hidasi B. Inclusions of synthetic diamonds. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 1993–1994. Vol. 12, no. 6. P. 349–355.
21. Пальянов Ю.Н., Хохлаков А.Ф., Борздов Ю.М., Дорошев А.М., Томиленко А.А., Соболев Н.В. Включения в синтетическом алмазе. *Доклады РАН.* 1994. Т. 338, № 1. С. 78–80.
22. Chepurov A.A., Dereppe J.M., Fedorov I.I., Chepurov A.I. The change of Fe–Ni alloy inclusions in synthetic diamond crystals due to annealing. *Diamond Relat. Mater.* 2000. Vol. 9. P. 1374–1379.

Надійшла до редакції 11.09.23

Після доопрацювання 11.09.23

Прийнята до опублікування 20.09.23