

УДК 549.091:548.3:543.2:543.4

Є.В. Науменко, науковий співробітник геологічного відділу¹

E-mail: kyivmineralogist@gmail.com

Ю.Д. Гаєвський, головний фахівець відділу експертизи дорогоцінного каміння²

E-mail: gud@gems.org.ua

Н.І. Вовк, гемолог, GIA Graduate Gemologist³

E-mail: nv0672162915@gmail.com

¹Національний науково-природничий музей НАН України

вул. Б. Хмельницького, 15, к. 105, Київ, 01030, Україна

²Державний гемологічний центр України

вул. Дегтярівська, 38–44, Київ, 04119, Україна

³Інтернет-магазин: nvovkjewelry.com.ua

Дослідження огранованого діоптазу: оптичні властивості, спектроскопія, хімічний склад мінеральних включень

DOI: [https://doi.org/10.53036/2025-1-2\(119-120\)-2](https://doi.org/10.53036/2025-1-2(119-120)-2)

У статті автори вперше в Україні досліджують два ограновані діоптази, використовуючи класичний набір гемологічних приладів – рефрактометр, полярископ, спектроскоп, дихроскоп та УФ-лампу зі стандартними довжинами хвиль (254 і 365 нм). Результати гемологічних досліджень дозволяють стверджувати, що можна доволі легко відрізнити діоптаз від схожих на нього дорогоцінних каменів за комбінацією певних показників заломлення, дуже високого двозаломлення, одновісності і позитивного оптичного знака, а також характерного спектра поглинання та відсутності люмінесценції. За оптичними показниками існує тільки один мінерал, який дуже схожий на діоптаз, – весцеліт, але він є дуже рідкісним і поки не зустрічається в огранованому вигляді.

Також для одного з досліджуваних зразків діоптазу вперше вдалося напряму сфотографувати спектр поглинання у видимому оптичному діапазоні. Колір діоптазу зумовлений двома лініями поглинання 14500 і 30000 см^{-1} , що спричинюють як впізнаваний синювато-зелений колір діоптазу, так і відповідний колір його риси. Дослідження, проведені з допомогою ІЧ-Фур'є спектроскопії в ІЧ-діапазоні $7000\text{--}400\text{ см}^{-1}$, дозволили виокремити певні піки, які пов'язують як з коливаннями зв'язків Si-O-Si (521 , 581 , 609 , 779 , 885 , 937 см^{-1}), так і з коливаннями молекул води (серія $3200\text{--}4000\text{ см}^{-1}$) у структурі діоптазу. З'ясовано, що низька стійкість діоптазу до нагрівання пов'язана зі значним впливом водневого зв'язку на формування кристалічної структури діоптазу.

Крім того, електронно-мікроскопічне дослідження хімічного складу твердих включень у досліджуваних діоптазах дозволило визначити, що вони являють собою кристали цинкмісного доломіту. Це разом з порівняльним аналізом мінеральних асоціацій діоптазу на різних родовищах світу, зробленого з урахуванням частоти знахідок відповідних зразків, в свою чергу дозволяє зробити обґрунтоване припущення про походження цих діоптазів з намібійського родовища Цумеб.

Ключові слова: діоптаз, гемологічні дослідження, показник заломлення, двозаломлення, спектр поглинання, ІЧ-спектроскопія, доломіт, Цумеб.

Вступ

Діоптаз є дуже відомим і популярним колекційним мінералом насамперед за свій яскравий синьо-зелений колір. Але ограновані вставки з діоптазу є вкрай рідкісними передусім тому, що кристали діоптазу великого розміру практично ніколи не бувають прозорими, до того ж вони дуже крихкі, через що їх майже ніколи не розглядають як сировину, придатну для гранування. З

огляду на те автори вважають, що вивчення огранованого діоптазу додасть корисної інформації для гемологів, геологів-професіоналів, ювелірів і, взагалі, для поціновувачів рідкісного дорогоцінного каміння.

Об'єктами дослідження є два діоптази, які вперше в Україні будуть вивчатися саме в огранованому вигляді як рідкісне дорогоцінне каміння. Предметом дослідження є їхні оптичні і спектроскопічні властивості, вивчення яких

зможе дозволити побудувати алгоритм діагностики огранованого діоптазу шляхом порівняння його властивостей з відповідними властивостями схожих мінералів, які теж можуть бути огранованими і використовуватись як дорогоцінне каміння. Тобто, мета цього дослідження – отримати дані, які дозволять полегшити діагностику цього доволі рідкісного мінералу саме як дорогоцінного каменю.

Окрім того, предметом дослідження є також хімічний склад діоптазу та його твердих включень, вивчення яких зможе допомогти у визначенні родовища, з якого походить діоптаз. Для цього необхідно порівняти мінеральні асоціації з різних мідних родовищ світу, де знаходили кристали діоптазу.

Походження об'єктів дослідження

Один з авторів (Наталія Вовк) придбала на міжнародній виставці у Бангкоку два зразки, які продавцем було атрибутовано як огранований діоптаз. Камінці мали яскравий синювато-зелений колір, під час перегляду під лупою в одному з них (багеті) були помітні невеликі темні й світлі включення.

Розмірно-вагові характеристики каменів:

1. Овал 6,39×5×3,33 мм, маса 0,85 ст (рис. 1).
2. Багет 4,99×3,79×3,19 мм, маса 0,58 ст. (рис. 2).



Рис. 1. Діоптаз, овал
Fig. 1. Diopside, oval

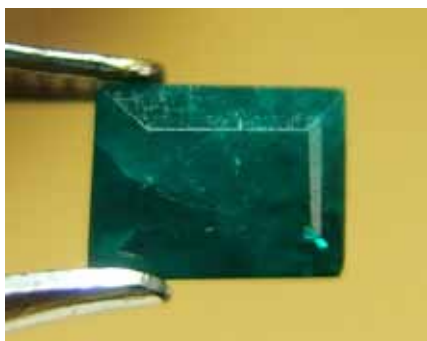


Рис. 2. Діоптаз, багет
Fig. 2. Diopside, rectangle

Мінералогічні характеристики діоптазу

Діоптаз відомий доволі здавна: для світу його відкрив казахський купець Ашир ще у 1780 році. Щоправда, спочатку певний час його приймали за смарагд, але згодом встановили, що це окремий мідьвмісний мінерал, і тому він отримав окрему назву «діоптаз», яку

дав йому Рене Гаюї за те, що в кристалі можна побачити тріщини спайності.

Хімічна формула мінералу – $\text{Cu}_6[\text{Si}_6\text{O}_{18}] \times 6\text{H}_2\text{O}$, він належить до кільцевих силікатів. Основою структури діоптазу є шестичленні кремнекисневі кільця, які розташовані одне над одним аналогічно структурі берилу, але зв'язуються між собою атомами міді і чергуються з гофрованими кільцями, що складені з шести молекул води (Heide, 1955) (рис. 3).

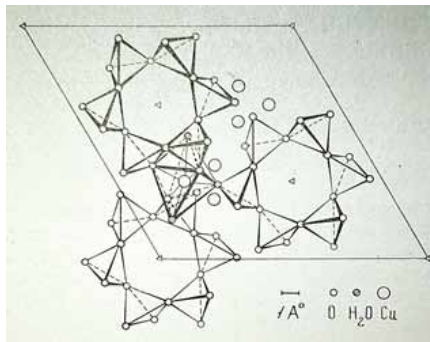


Рис. 3. Структура діоптазу
Fig. 3. Diopside structure

Відповідно в структурі діоптазу, крім міцного йонно-ковалентного зв'язку в кремнекисневих кільцях, важливу роль відіграє більш слабкий водневий зв'язок. Згідно з Букіним та ін. (1976), шестерні кільця з молекул H_2O утворюють два типи водневих зв'язків: довжиною 2,693 Å в самих кільцях та довжиною 2,835 Å з силікатними кільцями (рис. 4).

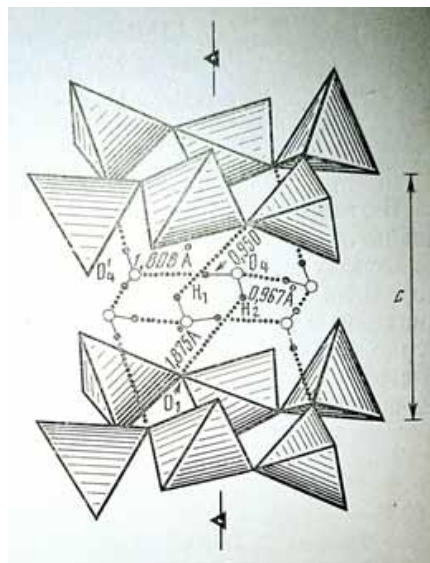


Рис. 4. Схема розташування водневих зв'язків у структурі діоптазу
Fig. 4. Diagram of the arrangement of hydrogen bonds in the structure of diopside

Це зумовлює дещо меншу твердість (5 за шкалою Мооса), ніж у більшості кільцевих силікатів (6,5–7,5), гарну спайність по {1011}, а також високу крихкість і слабку стійкість до нагрівання. Остання властивість є вкрай важливою для обробки – діоптаз починає втрачати воду вже за нагрівання до 100°C, що може призвести до розтріскування. За температури більше 400°C діоптаз втрачає колір і стає сірим, руйнація кристалічної ґратки починається при умови втрати більше половини кристалізаційної води приблизно за 550°C (Чухров, 1981, с. 77–82). Саме ця властивість зумовлює нечисленність випадків огранування цього ефективного мінералу.

Виходячи зі структури, діоптаз утворює кристали, ограновані одним чи декількома ромбоєдрами та гексагональною призмою, відповідно він належить до ромбоєдричного класу тригональної сингонії. Діоптаз є одновісним та оптично позитивним мінералом.

Колір діоптазу, який робить його дуже привабливим мінералом як для колекцій, так і для обробки, зумовлений значним вмістом двовалентної міді, що знаходиться в оточенні шести найближчих сусідів – двох молекул води та чотирьох атомів кисню, тобто координаційний поліедр атому міді являє собою витягнуту тетрагональну дипіраміду.

Така кристалохімічна координація міді як 3d-хромوفору зумовлює дозволені за спіном лінії поглинання (14500 cm^{-1} та 30000 cm^{-1}), що в свою чергу є причиною появи яскравого синювато-зеленого кольору. (Платонов, 1976, с. 168, 177). Цей колір зберігається і для кольору риси – від темно- до яскраво-зеленого (рис. 5).

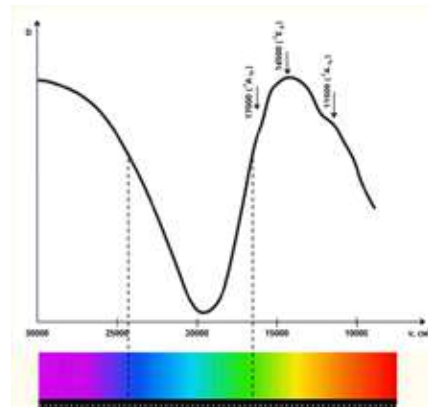


Рис. 5. Спектр поглинання діоптазу (Платонов, 1976)
Fig. 5. Absorption spectrum of diopside (Platonov, 1976)

Гемологічна характеристика діоптазу

Загалом гемологічна характеристика огранованого каменю складається найперше з вивчення оптичних властивостей – показника заломлення, дво-заломлення, спектроскопічних даних (як у видимій, так і в ІЧ-ділянці спектру електромагнітних хвиль), а також питомої ваги. Відповідно для гемологічної характеристики обох зразків огранованого діоптазу Наталією Вовк були використані:

1. Еталони кольорів GIA.
2. Гідростатичні ваги.
3. Полярископ з коноскопічною лінзою.
4. Рефрактометр «Duplex II» з імерсійною рідиною і граничним показником заломлення 1,81.
5. Дихроскоп з двома кальцитовими призми.
6. УФ-лампа з двома джерелами монохромного світла, які відповідають довжинам хвиль 365 (LW) нм і 254 нм (SW).
7. Спектроскоп призмений.

Відповідно до задіяної апаратури були отримані певні показники, які наведено в таблиці 1.

Окрім того, Юрію Гаєвському вдалося зафіксувати поглинання світла одним із зразків (рис. 6). Оскільки автори в жодній науковій публікації не знайшли фото спектру поглинання саме у такому вигляді, а не у вигляді спектрограми, ми вважаємо, що таке фото, яке дає наочне розуміння кольору діоптазу, було зроблено вперше.

Дослідження інфрачервоного

спектру поглинання та люмінесценції

Дослідження методом ІЧ-Фур'є спектроскопії виконувалося Юрієм Гаєвським за допомогою спектрометра моделі «Nicolet 6700» виробництва «Thermo Fisher Scientific» на приставці «Collector II» відповідно до «Методики діагностики дорогоцінного каміння методом ІЧ-Фур'є спектроскопії».

За результатами вивчення методом ІЧ-Фур'є спектроскопії встановлено деякі особливості ІЧ-спектрів цих каменів. Дослідження здійснювалося за кімнатної температури, в спектральному діапазоні 7000–400 см^{-1} , кількість сканувань у циклах вимірювання – 128–384 за роздільній здатності 4 см^{-1} .

1. В одному з цих каменів (№1) було виявлено піки поглинання близько

Табл. 1. Порівняння оптичних характеристик досліджуваних зразків діоптазу
Tabl. 1. Comparison of optical characteristics of the studied diopside samples

	Колір	Питома вага	Показники заломлення	Дво-заломлення	Оптичний знак та осність	УФ-люмінесценція	Плеохроїзм	Спектр
№1 Овал 0,85 ct	Злегка синювато-зелений – Slightly Bluish Green	3,33 г/см ³	min – 1,652 max – 1,702	0,050	Uniaxial (+)	LW – відсутня SW – відсутня	Слабкий	Широкі темні полоси в діапазонах 350–450 нм та 600–700 нм
№2 Баре́т 0,58 ct	Злегка синювато-зелений – Slightly Bluish Green	3,31 г/см ³	min – 1,652 max – 1,701	0,051	Uniaxial (+)	LW – відсутня SW – відсутня	Слабкий	Широкі темні полоси в діапазонах 350–450 нм та 600–700 нм

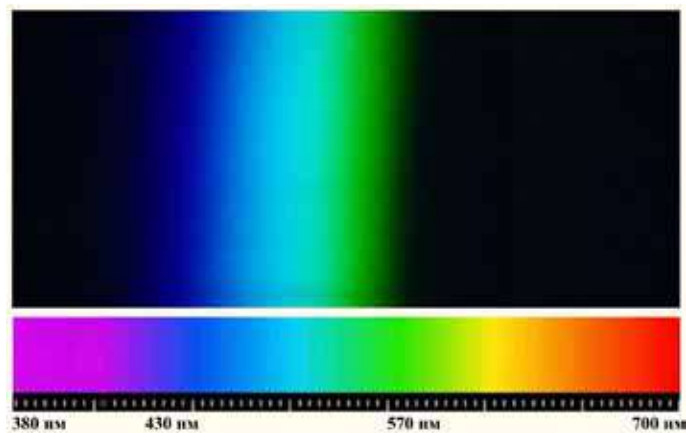


Рис. 6. Спектр поглинання світла діоптазом у призмений спектроскопі
Fig. 6. Light absorption spectrum of diopside in a prism spectroscope

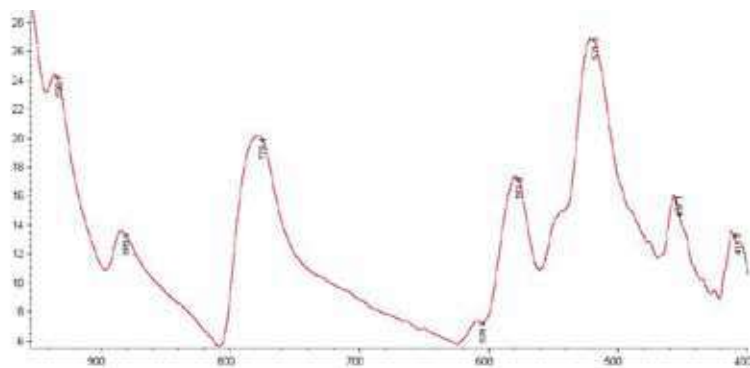


Рис. 7. ІЧ-спектр, піки в якому відповідають фундаментальним коливанням зв'язків Si-O в кристалічній ґратці діоптазу
Fig. 7. IR spectrum, the peaks in which correspond to fundamental vibrations of Si-O bonds in the crystal lattice of diopside

521, 581, 609, 779, 885 см^{-1} , які дослідники (Otto, 2017; Wu et al., 2024)

пов'язують з коливаннями зв'язків типу Si-O-Si.

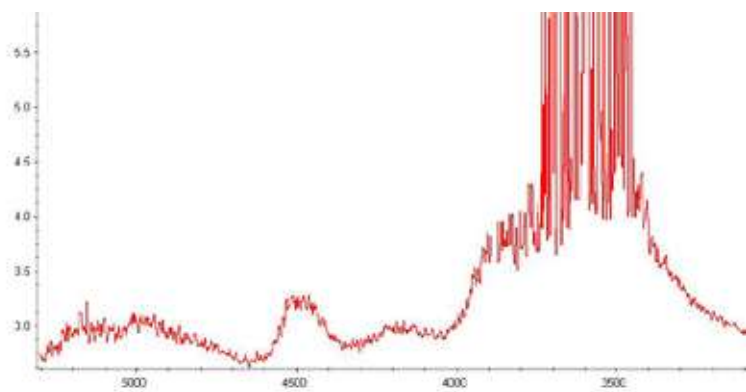


Рис. 8. ІЧ-спектр, піки в якому відповідають коливанням молекул H_2O в кристалічній ґратці діоптазу

Fig. 8. IR spectrum, the peaks in which correspond to vibrations of H_2O molecules in the crystal lattice of diopside

2. Також було виявлено пік поглинання близько 937 cm^{-1} , який спеціалісти пов'язують з коливаннями зв'язку типу Si-O (рис. 7).

3. В іншому камені (№2) було виявлено широку зону поглинання в діапазоні $3200\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$, яка пов'язана з коливанням у кристалічній ґратці молекул H_2O . Коливання такого типу є типовими для кільцевих силікатів (рис. 8).

Дослідження хімічного складу діоптазу та включень в ньому

Дослідження хімічного складу діоптазу проводилося Юрієм Гаєвським на обладнанні ТОВ «Елватех». Результати дослідження подано у таблиці 2.

Результати дослідження хімічного складу наших діоптазів (табл. 3) дозво-

ляють стверджувати, що їх хімічний склад є доволі близьким до еталонного, зазначеного в міжнародній базі даних (Хімічний аналіз діоптазу, б. д.).

Для дослідження хімічного складу включень у діоптазі з метою виводу включень на поверхню зразка один з об'єктів дослідження (багет масою 0,58 ст) Євгеном Науменком було прошліфовано (на абразивному колі з мідною зв'язкою) з однієї сторони на глибину 0,5 мм, після чого відполіровано на олов'яній полірувальній планшайбі.

Хімічний склад твердофазних включень у попередньо відполірованому і покритому платиновою плівкою зразку діоптазу визначено Олексієм Вишневським на сканувальному електронному

мікроскопі JSM-6700F, оснащеному енергодисперсійною системою для мікроаналізу JED-2300 (JEOL, Японія).

Умови зйомки: прискорювальна напруга – 15 kV, струм зонду – 0,5 nA, діаметр зонду – 1 μ , час набору спектру характеристичного рентгенівського випромінювання у кожній точці становив 60 с.

Як стандарти використано: на Si, Fe, Mn, Zn, Cu – чисті метали, на Mg, Ca – синтетичні MgO , CaF_2 відповідно. Внесення поправок у результати вимірів і розрахунок концентрацій елементів здійснено методом ZAF-корекції з використанням оригінального програмного забезпечення фірми JEOL.

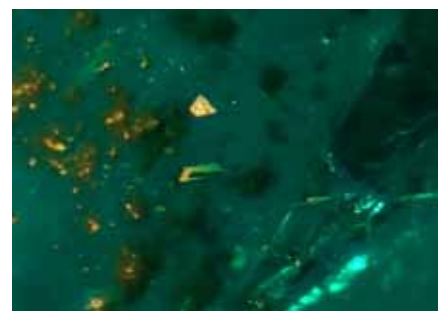


Рис. 9. Включення кристалів доломіту в діоптазі

Fig. 9. Inclusion of dolomite crystals in diopside

Включення в діоптазі виглядають світлішими і мають форму, близьку до витягнутого ромбоєдра. Хімічний склад включень відповідає цинквмісному доломіту (Дир та ін., 1966, с. 307–309). Доломіт є частим супутником діоптазу і взагалі властивий корі звітрювання рудних, зокрема мідних, родовищ.

Крім того, в діоптазі Юрієм Гаєвським були знайдені і зафіксовані на фото газово-рідкі включення (рис. 10) та структури двійникування діоптазу (рис. 11).

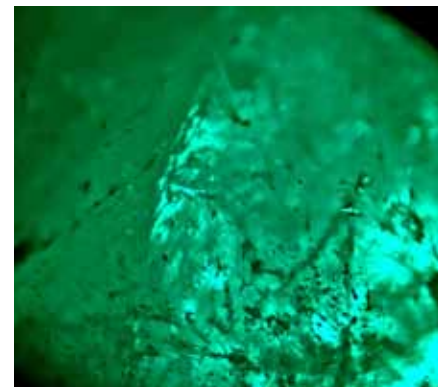


Рис. 10. Газово-рідкі включення в діоптазі

Fig. 10. Gas-liquid inclusions in diopside

Табл. 2. Хімічний склад досліджуваних діоптазів (мас. %)

Tabl. 2. Chemical composition of the studied diopside (wt. %)

№	Маса та форма	Елемент (оксид) Концентрація, мас. %								
		Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	SO_3	CuO	ZnO	PbO	H_2O	Сума
1	0,86 кт овал	0,54	39,26	0,02	0,14	48,46	0,04	0,005	11,5	99,965
2	0,56 кт багет	0,22	39,47	0,02	0,01	48,73	0,04	–	11,5	99,990

Табл. 3. Хімічний склад твердих включень у діоптазі (мас. %)

Tabl. 3. Chemical composition of solid inclusions in diopside (wt. %)

Хімічний компонент, мас. %	CaO	MgO	ZnO	CO_2	FeO	PbO	Сума
Мінерал							
Доломіт у включенні, проба 1	22,39	22,28	3,07	52,25	0,01	0,01	100,0
Доломіт у включенні, проба 2	23,69	23,89	2,04	50,36	0,01	0,01	100,0
Доломіт цинквмісний, еталон (род. Цумб)	27,77	14,34	8,74	43,56	0,12	4,96	99,64

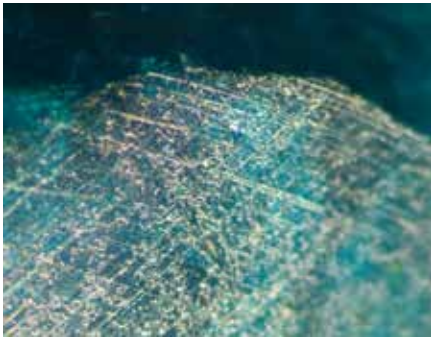


Рис. 11. Структури двійникування діоптазу
Fig. 11. Diopside twinning structures

Обговорення результатів

За зовнішнім виглядом діоптаз най-більше схожий на гарний смарагд, але від смарагду діоптаз дуже легко відрізнити за показником заломлення за допомогою рефрактометра, оскільки показники заломлення смарагду і діоптазу помітно відрізняються (смарагд – від 1,56 до 1,6, в середньому – 1,57; виміряні та вказані вище показники заломлення діоптазу значно вищі – від 1,652 до 1,703). Також двозаломлення діоптазу набагато більше (0,050) порівнюючи з дуже малим двозаломленням смарагду (від 0,004 до 0,010), яке навіть інколи можна спостерігати візуально (рис. 12).

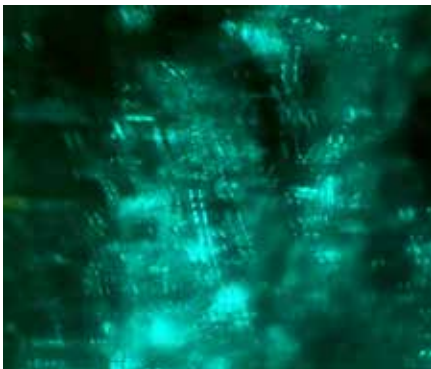


Рис. 12. Двозаломлення в діоптазі
Fig. 12. Birefringence in diopside

Діагностика огранованого діоптазу шляхом вимірювання оптичних властивостей на рефрактометрі зумовлює необхідність вибору з декількох синювато-зелених мінералів, показники заломлення яких знаходяться в близькому до діоптазу діапазоні (1,65–1,7). Загалом таких мінералів доволі багато, але, якщо вибирати з цього списку тільки синювато-зелені мінерали, він значно скорочується. Загалом, серед зелених мінералів з подібними показ-

никами заломлення є як певна кількість широко розповсюджених породоутворювальних мінералів, так і декілька доволі рідкісних: смарагд, віридин (зелений Мп-вмісний андалузит), весцеліт, жадеїт, олівін-форстерит, енстатит-гіперстен, жадеїт, діопсид, лудламіт, ехроїт, гіденіт (зелений сподумен), апатит. Тільки деякі мінерали з цього списку застосовують як дорогоцінні, всі вони мають інші зелені відтінки. І лише два мінерали в цьому оптичному діапазоні можуть мати такий самий колір, як і діоптаз – смарагд, для якого такий блакитно-зелений колір є доволі рідкісним, і екзотичний фосфат міді та цинку – весцеліт. Загалом весцеліт був відомий з 1959 року, але нещодавно його кристали відносно помітного розміру були знайдені на китайському Cu-Pb-Zn родовищі Донгчуань (*Dongchuan Cu Mine*, n. d.).

Відомості з порівняння оптичних властивостей смарагду, діоптазу і весцеліту (Ларсен & Берман, 1965, с. 194–204; Солодова та ін., 1985, с. 168–178) наведено в таблиці 4. Зважаючи на цю інформацію, діоптаз доволі легко визначити за допомогою оптичних даних.

• По-перше, серед мінералів, що можуть використовуватись як дорогоцінне каміння з показником заломлення в

діапазоні 1,65–1,7, високе двозаломлення в діоптазі, яке помітне навіть візуально (рис. 12), є важливим критерієм, що дозволяє відрізнити діоптаз від більшості мінералів, які мають схожий показник заломлення.

• По-друге, оптичний знак не виявився критерієм, який можна використати для діагностики діоптазу – практично всі мінерали зеленого кольору, крім апатиту, з близьким до діоптазу показником заломлення є оптично позитивними, як і діоптаз.

• По-третє, крім помітної різниці у кольорі, відокремити діоптаз від більшості інших зелених мінералів, зокрема від рідкісного, але дуже схожого на нього весцеліту, можна за допомогою вивчення осності, оскільки серед зелених мінералів (у відповідному діапазоні показників заломлення) одноосніми, як і сам діоптаз, є тільки везувіан і апатит, які зазвичай мають зовсім інший, хоч і зелений, колір.

• І, насамкінець, у більшості зелених мінералів, які можуть бути огранованими, присутній доволі помітний плеохроїзм, причому залежно від конкретного мінералу плеохроїзм може бути доволі різним, тоді як у діоптазу плеохроїзм дуже слабкий.

Табл. 4. Порівняння оптичних властивостей діоптазу та схожих мінералів
Tabl. 4. Comparison of optical properties of diopside and similar minerals

Мінерали	Оптичні властивості					
	Діапазон показників заломлення, осність	Двозаломлення	Оптичний знак	Колір	Плеохроїзм	Люмінесценція
Діоптаз	1,644–1,709, одноосний	0,050–0,052	+	Яскравий синювато-зелений	Слабкий	Не спостерігається
Смарагд	1,566–1,600, двовісний	0,004–0,010	+	Блакитно-зелений	Від блакитно-до жовто-зеленого	Слабка зелена (дуже зрідка)
Весцеліт	1,640–1,695, двовісний	0,040–0,055	+	Синьо-зелений	Слабкий	Не спостерігається

Огляд родовищ

Діоптаз є відносно рідкісним мінералом кори зітворювання мідних родовищ. Зазвичай він утворює асоціацію з карбонатними мінералами – малахітом, кальцитом, доломітом, зрідка з церуситом, смітсонітом, гідроцинкітом або розазитом, а також з кварцом та різноманітними мідьвмісними силікатами – хризолою, шатукітом, планшеїтом, кіноїтом, а на певних родовищах – з вульфенітом, мотрамітом або дуфтитом (*Diopase*, n. d.).

Нижче наведено короткий список найважливіших родовищ світу, де діоптаз у вигляді більш-менш помітних кристалів (від 5 мм і більше) знаходять доволі регулярно. У дужках наведена кількість описаних зразків за відомостями сайту mindat.org.

- Алтин-Тюбе – Казахстан, Карагандинська область (type locality) (207);
- Цумеб – Намібія, регіон Ошкіото (686);
- Кандесеї – Намібія, регіон Кунене (67);
- Крістоф – Намібія, регіон Кунене (97);
- Омае – Намібія, регіон Кунене (41);
- Тантара – ДР Конго, провінція Верхня Катанга (148);
- Реневіль – НР Конго, район Кінданба, департамент Пул (44);
- Кімбеді – НР Конго, район Міндоулі, департамент Пул (109);
- Мбумба – НР Конго, район Міндоулі, департамент Пул (30).

Існує також певна кількість інших родовищ, на яких діоптаз є або дуже рідкісним мінералом, або його кристали маленькі і не придатні для огранування:

- Санда-Хіллз – НР Конго, район Мін-доулі, департамент Пул (16);
- М'Фуаті – НР Конго, департамент Боуенза (11);
- Роджерберг – Намібія, регіон Отжозонджупа (7);
- Маммот-Сан-Ентоні – США, штат Аризона, округ Пінал (87);
- Рей – США, штат Аризона, округ Пінал (18);
- Магма – США, штат Аризона, округ Пінал (13);
- Тейбл-Маунтайн – США, штат Аризона, округ Пінал (13);
- Крістмас – США, штат Аризона, округ Джіла (79);
- Моренсі – США, штат Аризона, округ Грінлі (35);
- Бонанза – США, штат Аризона, округ Ла-Пас (30);

- Блю-Белл – США, штат Каліфорнія, округ Сан-Бернардіно (27);
- Блю-Джей – США, штат Невада, округ Кларк (3);
- Алгомах – США, штат Мічиган, округ Онтонангон (3);
- Вета-Грузеа – Чилі, провінція Копьяпо (14);
- Ла-Фарола – Чилі, провінція Копьяпо (11);
- Церро-Негро – Чилі, пустеля Атакама, провінція Чанарал (4);
- Амор – Чилі, пустеля Атакама, провінція Чанарал (3);
- Кобра – Перу, Пампа-Наска, департамент Іка (7);
- Карбонера – Перу, Пампа-Наска, департамент Іка (2);
- Мальпасо – Аргентина, пров. Кордоба, департамент Колон (22);
- Кейп-Каламіта – Італія, Тоскана, провінція Ліворно (2).

Загалом багато зразків діоптазу знаходять на мідних родовищах США, особливо у штаті Аризона (Antony et al., 1995), але практично всі кристали діоптазу з цих родовищ, по-перше, досить малесенькі (максимальний розмір 5–7 мм в окремих поодиноких зразках), по-друге, ці кристали здебільшого довгопризматичні – аж до голчастих, і по-третє, вони доволі часто утворюють скоринкоподібні агрегати на породі. Те саме стосується кристалів діоптазу з родовищ Чилі та Перу (Hyrsl et al., 2011).

Крім того, описані поодинокі знахідки діоптазу в таких родовищах та про-
явах:

- Мусоної – ДР Конго, провінція Луа-лаба, р-н Колвезі;
- Хінганське – Росія, Приморський край, Далекий Схід;
- басейн річки Тієради – Росія, Єнісейський кряж, Красноярський край;
- Себарц – Іран, провінція Ісфахан, р-н Анарак;
- Сарчешме – Іран, пров. Керман, р-н Сірджан.

Але щодо цих родовищ, крім згадування в літературі про знахідки діоптазу (Чухров, 1981, с. 77–82; Wilson, 2018), ніякої додаткової інформації про там-

тешній діоптаз у відкритих джерелах знайти не вдалося.

Хімічний склад включень, які діагностовано в одному з вивчених діоптазів, відповідає цинквмісному доломіту. Загалом доломіт є доволі частим супутником діоптазу і зустрічається разом з ним в багатьох родовищах. Але от що цікаво – домішка цинку як типоморфна ознака доломіту властива тільки доломітам з намібійського родовища Цумеб (Gebhardt, 1999), яке до того ж можна вважати рекордсменом за числом описаних зразків діоптазу, принаймні за відомостями сайту mindat.org. У книжці, яка присвячена цьому родовищу, прямо вказується на домішку цинку (або кобальту чи свинцю) як на типоморфну ознаку.

У 1986 році на родовищі Цумеб саме в зразках з діоптазом навіть був описаний новий мінерал – мінрекордит, який є аналогом доломіту, але з домінантним вмістом Zn в позиції Mg (Gebhardt, 1999). Є також родовища ДР Конго, наприклад Мусоної, де знайдено і діоптаз, і доломіт, але доломіт там описано виключно кобальтвмісний, яскравого рожевого кольору (Wilson, 2018). На інших родовищах, наприклад, на родовищах Аризони, доломіт вказується як один з мінералів того чи іншого родовища, де знайдено і діоптаз, але про його склад нема ніяких відомостей (Antony et al., 1995). Така сама ситуація спостерігається для важливих родовищ Тantara (*Tantara Mine*, n. d.) та Кімбеді (*Kimbedi*, n. d.) у ДР Конго, а також Мальпасо в Аргентині (*Malpaso Quarry*, n. d.). Крім того, є певна кількість важ-



Рис. 13. Друза діоптазу та кальциту. Родовище Алтин-Тюбе, Казахстан (з колекції Є. Науменка)
Fig. 13. Diopase and calcite druse. Altyn-Tyube deposit, Kazakhstan (from the collection of I. Naumenko)

ливих родовищ діоптазу, де доломіт взагалі не знайдено як такого, наприклад, Омауе у Намібії (*Omaue Mine*, n. d.), Алтин-Тюбе у Казахстані, Реневіль у ДР Конго (Wilson, 2023, 2024). Дуже характерну асоціацію діоптазу з кальцитом з родовища Алтин-Тюбе, де діоптаз був відкритий, можна побачити на рис. 13.

Загалом, за відомостями сайту mindat.org, описано 83 зразки діоптазу в прямій асоціації з доломітом (*Dioptase with Dolomite*, n. d.). Усі вони, без жодного винятку, походять з родовища Цумеб у Намібії. Це дозволяє авторам зробити припущення, що досліджувані діоптази з високим ступенем ймовірності теж можуть походити з цього родовища. Але стверджувати це як доведений факт автори не вважають можливим, оскільки не по всіх родовищах доступні відомості щодо складу відповідного мінералу-супутнику.

Висновки

Дослідження оптичних властивостей діоптазу та порівняння його з іншими мінералами зеленого кольору, які можуть ограновуватися, дозволяють стверджувати, що діоптаз можна легко відрізнити від інших мінералів зеленого кольору за комбінацією діапазону показників заломлення, дуже сильного двозаломлення, дуже слабкого плеохроїзму та характерного синювато-зеленого кольору. Існує тільки один мінерал, який можна сплутати з діоптазом майже за всіма цими властивостями, окрім осності, – весцеліт. Але він на відміну від діоптазу є дуже рідкісним, і авторам поки не вдалося знайти жодної згадки про можливість його огранування.

Також дослідження оптичних властивостей дозволило Юрію Гаєвському вперше зафіксувати на фото спектр по-

глинання у видимій області спектру, а дослідження поглинання діоптазу в інфрачервоній області спектру дозволило виокремити спектральні піки, що відповідають як за фундаментальні коливання зв'язків Si-O, так і за коливання молекул води у структурі діоптазу.

Дослідження хімічного складу включень в огранованому діоптазі підтвердило той факт, що діагностований доломіт є звичайною асоціацією для діоптазу. Наявність домішки цинку в діагностованому доломіті і детальне вивчення мінеральних асоціацій діоптазу в різних родовищах світу дозволяє зробити припущення щодо походження досліджуваних зразків діоптазу з намібійського родовища Цумеб.

Використані джерела

- Букин, В. И., Нозик, Ю. З., Фыкин, Л. Е., & Макаров, Е. С. (1976). Нейтронодифракционное изучение водородных связей в структуре диоптаза $\text{Cu}_6[\text{Si}_6\text{O}_{18}]\times 6\text{H}_2\text{O}$. *Геохимия*, 9, 1328–1333.
- Дир, У. А., Хауи, Р. А., & Зусман, Дж. (1966). *Породообразующие минералы: Т. 5. Несиликатные минералы*. Мир.
- Ларсен, Е., & Берман, Г. (1965). *Определение прозрачных минералов под микроскопом*. Недра.
- Платонов, А. Н. (1976). *Природа окраски минералов*. Наукова думка.
- Солодова, Ю. П., Андреевко, Э. Д., & Гранадчикова, Б. Г. (1985). *Определитель ювелирных и поделочных камней*. Недра.
- Хімічний аналіз діоптазу. (б. д.). Ruff.info. <https://ruff.info>
- Чухров, Ф. В. (Ред.). (1981). *Минералы. Справочник. Том III: Силикаты с линейными трёхчленными группами, кольцами и цепочками кремнекислородных тетраэдров*. Наука.
- Antony, John W., Williams, Sidney A., Bideaux, Richard, A., Wilson, Wendell E., & Raymond, W. Grant, (1995). *Mineralogy of Arizona*. Third edition. The University of Arizona Press.
- Dioptase*. (n. d.). Mindat.org. <https://www.mindat.org/min-1295.html>
- Dioptase with Dolomite*. (n. d.). Mindat.org. <https://www.mindat.org/photoscroll.php?searchbox=Dioptase+with+Dolomite>
- Dongchuan Cu Mine*. (n. d.). Mindat.org. <https://www.mindat.org/loc-418454.html>
- Gebhardt, Georg. (1999). Tsumeb. *A Unique Mineral Locality*. GG Publishing, Grossenseifen.
- Heide, H. G., Boll-Dornberger, K., Thilo, E., & Thilo, E. M. (1955). Die Struktur des Dioptras, $\text{Cu}_6(\text{Si}_6\text{O}_{18})\times 6\text{H}_2\text{O}$. *Acta Cryst*, 8(7), 425–430. <https://doi.org/10.1107/S0365110X55001357>
- Hyrsl, Jaroslav, Crowley, Jack A., Currier, Rock H., & Szenics, Terry. (2011). *Peru – Paradise of Minerals*. Museo Andres del Castillo.
- Kimbedi*. (n. d.). Mindat.org. <https://www.mindat.org/loc-145535.html>
- Malpaso Quarry*. (n. d.). Mindat.org. <https://www.mindat.org/loc-5809.html>
- Omaue Mine*. (n. d.). Mindat.org. <https://www.mindat.org/loc-5421.html>
- Otto, H. (2017). Crystal Growth of $\text{Cu}_6(\text{Ge},\text{Si})_6\text{O}_{18}\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ and Assignment of UV-VIS Spectra in Comparison to Dehydrated Dioptase and Selected Cu (II) Oxo-Compounds Including Cuprates. *World Journal of Condensed Matter Physics*, 7(3), 57–79. <https://doi.org/10.4236/wjcmp.2017.73006>
- Tantara Mine*. (n. d.). Mindat.org. <https://www.mindat.org/loc-4340.html>
- Wilson, W. E. (2018). The Musonoi mine, Kolwezi District, Lualaba Province, Democratic Republic of Congo. *Mineralogical Record*, 49(2), 236–304.
- Wilson, W. E. (2023). Altyn-Tyube, Karaganda Region, Kazakhstan: The Type Locality for Dioptase. *Mineralogical Record*, 54(2), 209–253.
- Wilson, W. E. (2024). Reneville, Kindanda District, Pool Department, Republic of the Congo. *Mineralogical Record*, 55(4), 411–438.
- Wu, S., He, M., Yang, M., Peng, B., Shi, Y., & Sun, K. (2024). Near-Infrared Spectroscopic Study of Secondary Minerals in the Oxidation Zones of Copper-Bearing Deposits. *Crystals*, 14(9), 791. <https://doi.org/10.3390/cryst14090791>

References

- Antony, John W., Williams, Sidney A., Bideaux, Richard, A., Wilson, Wendell E., & Raymond, W. Grant, (1995). *Mineralogy of Arizona*. Third edition. The University of Arizona Press.
- About chemical analysis of diopside. (n. d.). Rruff.info. <https://rruff.info>
- Bukin, V. I., Nozik, Yu. Z., Fykin, L. E., & Makarov, E. S. (1976). Neutron diffraction study of hydrogen bonds in the structure of diopside $\text{Cu}_6[\text{Si}_6\text{O}_{18}]\times 6\text{H}_2\text{O}$. *Geochemistry*, 9, 1328–1333 [in Russian].
- Chukhrov, F. V. (Red.). (1981). *Minerals. Handbook. V. III: Silicates with linear three-membered groups, rings and chains of silicon-oxygen tetrahedra*. Nauka [in Ukrainian].
- Deer, W. A., Howie, R. A., & Zisman, J. (1966). *Rock-Forming Minerals: V. 5. Non-silicate minerals*. Mir Publishing House [in Russian].
- Diopside. (n. d.). Mindat.org. <https://www.mindat.org/min-1295.html>
- Diopside with Dolomite. (n. d.). Mindat.org. <https://www.mindat.org/photoscroll.php?searchbox=Diopside+with+Dolomite>
- Dongchuan Cu Mine. (n. d.). Mindat.org. <https://www.mindat.org/loc-418454.html>
- Gebhardt, Georg. (1999). *Tsumeb. A Unique Mineral Locality*. GG Publishing, Grosssensen.
- Heide, H. G., Boll-Dornberger, K., Thilo, E., & Thilo, E. M. (1955). Die Struktur des Diopside, $\text{Cu}_6(\text{Si}_6\text{O}_{18})\times 6\text{H}_2\text{O}$. *Acta Cryst*, 8(7), 425–430. <https://doi.org/10.1107/S0365110X55001357>
- Hyrsl, Jaroslav, Crowley, Jack A., Currier, Rock H., & Szenics, Terry. (2011). *Peru – Paradise of Minerals*. Museo Andres del Castillo.
- Kimbedi. (n. d.). Mindat.org. <https://www.mindat.org/loc-145535.html>
- Larsen, E., & Berman, G. (1965). *Determination of Transparent Minerals under a Microscope*. Nedra [in Russian].
- Malpaso Quarry. (n. d.). Mindat.org. <https://www.mindat.org/loc-5809.html>
- Omaue Mine. (n. d.). Mindat.org. <https://www.mindat.org/loc-5421.html>
- Otto, H. (2017). Crystal Growth of $\text{Cu}_6(\text{Ge},\text{Si})_6\text{O}_{18}\times 6\text{H}_2\text{O}$ and Assignment of UV-VIS Spectra in Comparison to Dehydrated Diopside and Selected Cu (II) Oxo-Compounds Including Cuprates. *World Journal of Condensed Matter Physics*, 7(3), 57–79. <https://doi.org/10.4236/wjcmp.2017.73006>
- Platonov, A. N. (1976). *The Nature of Mineral Coloration*. Naukova Dumka [in Russian].
- Solodova, Yu. P., Andreenko, E. D., & Granadchikova, B. G. (1985). *Identifier of jewelry and ornamental stones*. Nedra [in Russian].
- Tantara Mine. (n. d.). Mindat.org. <https://www.mindat.org/loc-4340.html>
- Wilson, W. E. (2018). The Musonoi mine, Kolwezi District, Lualaba Province, Democratic Republic of Congo. *Mineralogical Record*, 49(2), 236–304.
- Wilson, W. E. (2023). Altyn-Tyube, Karaganda Region, Kazakhstan: The Type Locality for Diopside. *Mineralogical Record*, 54(2), 209–253.
- Wilson, W. E. (2024). Reneville, Kindanda District, Pool Department, Republic of the Congo. *Mineralogical Record*, 55(4), 411–438.
- Wu, S., He, M., Yang, M., Peng, B., Shi, Y., & Sun, K. (2024). Near-Infrared Spectroscopic Study of Secondary Minerals in the Oxidation Zones of Copper-Bearing Deposits. *Crystals*, 14(9), 791. <https://doi.org/10.3390/cryst14090791>

UDC 549.091:548.3:543.2:543.4

I. Naumenko, researcher of the geological department¹

E-mail: kyivmineralogist@gmail.com

Yu. Gayevsky, Chief Specialist of the Department of Examination of Precious Stones²

E-mail: gud@gems.org.ua

N. Vovk, gemologist, GIA Graduate Gemologist³

E-mail: nv0672162915@gmail.com

¹National Natural Science Museum of the NAS of Ukraine
15 B. Khmelnytskogo Str., room 105, Kyiv, 01030, Ukraine

²State Gemmological Centre of Ukraine
38–44 Deghtyarivska Str., Kyiv, 04119, Ukraine

³Internet shop: nvovkjewelry.com.ua

Research on faceted diopside: optical properties, spectroscopy, chemical composition of mineral inclusions

In this article, the authors study two faceted diopsides for the first time in Ukraine, using a classic set of gemological instruments – a refractometer, a polariscope, a spectroscope, a dichroscope and a UV lamp with standard wavelengths of 254 and 365 nm. The results of gemological studies allow us to state that it is quite easy to distinguish diopside from similar gemstones by a combination of certain refractive indices, very high birefringence, uniaxiality and a positive optical sign, as well as a characteristic absorption spectrum and the absence of luminescence. According to optical parameters, there is only one mineral that is very similar to diopside – veselyite, but it is quite rare and is not yet found in faceted form.

Also, for one of the studied diopside samples, it was possible to directly photograph the absorption spectrum in the visible optical range for the first time. The color of diopside is due to two absorption lines at 14500 cm^{-1} and 30000 cm^{-1} , which cause both the recognizable bluish-green color of diopside and the corresponding color of its streak. Studies conducted using IR-Fourier spectroscopy in the IR range of $7000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$ allowed us to distinguish certain peaks associated with both the vibration of Si-O-Si bonds ($521, 581, 609, 779, 885, 937\text{ cm}^{-1}$) and the vibrations of water molecules (series $3200\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$) in the diopside structure. It was found that the low resistance of diopside to heating is associated with the important influence of hydrogen bonding on the formation of the crystal structure of diopside.

In addition, electron microscopic study of the chemical composition of solid inclusions in the studied diopsides allowed us to determine that they are crystals of zinc-containing dolomite. This, together with a comparative analysis of mineral associations of diopside in different deposits of the world, made taking into account the frequency of findings of the corresponding samples, in turn allows us to make a reasonable assumption about the origin of these diopsides from the Tsumeb deposit in Namibia.

Keywords: diopside, gemological research, refractive index, birefringence, absorption spectrum, IR spectroscopy, dolomite, Tsumeb.