

© С.В. Шевченко<sup>1</sup>, І.Ю. Ткачук<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЧИННИКІВ ЗМІНИ КОЛЬОРУ ДЕЯКИХ РІЗНОВИДІВ ДОРОГОЦІННОГО КАМІННЯ

© S. Shevchenko<sup>1</sup>, I. Tkachuk<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

## STUDY OF COLOUR CHANGE FACTORS FOR SOME VARIETIES OF GEMS

**Мета.** На конкретних зразках дорогоцінного каміння зі зміною забарвлення, а також їх синтетичних аналогів та імітацій пояснити основні фактори кольорових трансформацій.

**Методика.** В роботі використано рентген-флюоресцентний аналіз, а також загальнонаукові методи дослідження – емпіричні і теоретичні (аналіз, узагальнення, порівняння, пояснення). Під час досліджень застосовувалися лампи з різними спектрами світла (різною кольоровою температурою): лампа розжарювання, жовта діодна лампа, спеціальна гемологічна лампа.

**Результати.** Визначено вміст та концентрацію іонів-хромофорів для зразків дорогоцінного каміння та їх імітацій зі зміною кольорів, а саме олександриту, хризоберилу, султаніту, гранату Малайя, гранатів зі змінами кольору, а також синтетичного корунду і алекситу (скла). Показано вплив співвідношення концентрації іонів-хромофорів на кольори забарвлення олександритів і гранатів зі зміною кольорів. Показано зміну забарвлення для анізотропних каменів, що мають плеохроїзм. Досліджено кольори анізотропних каменів за кристалографічними осями – два кольори для одновісних каменів і три – для двовісних.

**Наукова новизна.** Продемонстровано зміну забарвлення досліджуваних зразків з колекції кафедри під впливом чотирьох джерел освітлення: денного світла, лампи розжарювання, жовтої діодної лампи та спеціальної гемологічної лампи. Побудовано хроматичні діаграми з різними кольоровими температурами та довжинами хвиль для кожного джерела освітлення. Показано, що при збільшенні кольорової температури джерел освітлення довжини хвиль світла в усіх зразках, окрім олександриту, зменшуються.

**Практична значимість.** Наведені у статті дані демонструють конкретні приклади впливу чинників на зміну забарвлення дорогоцінного каміння і дають можливість додаткових пояснень цього явища для фахівців, а також розширюють його розуміння безпосередніми споживачами відповідних послуг на ринку. Показано, що з поступовою заміною ламп розжарювання на сучасні діодні лампи у найбільш «програшній» ситуації будуть гранати зі змінами забарвлення та синтетичний корунд «під олександрит» – їх кольори будуть більш наближеними один до одного і майже не демонструватимуть сильних змін. У той же час такий штучний матеріал як алексит (який видають за султаніт, зокрема) привертатиме увагу у тому числі необізнаних покупців через різку зміну забарвлення, при чому кольори майже співпадатимуть при таких протилежних джерелах, як денне світло і лампа розжарювання.

**Ключові слова:** дорогоцінні камені зі зміною кольору, співвідношення концентрації іонів-хромофорів, кольорова температура, ефект Усамбара, олександрит, султаніт, алексит.

**Вступ.** Сьогодні на ринку збільшується присутність дорогоцінних каменів, які змінюють колір у залежності від зміни освітлення. Це природні різновиди гра-

натів, корундів, олександрити різних кольорів, султаніт (діаспор), а також синтетичні аналоги та імітації деяких з них. У той же час штучне освітлення все менше забезпечується лампами розжарювання – їм на зміну приходять діодні лампи з дещо іншою температурою світла. Фахівці повинні мати чітку відповідь на запитання покупців щодо природи зміни кольорів дорогоцінного каміння з урахуванням сучасних освітлювальних приладів.

Науковці виділяють чотири головних фактори [1 – 4], що впливають на феномен зміни забарвлення у камені:

- умови освітлення, тобто природні або штучні джерела світла
- хімічний склад, тобто наявність у складі каменю певних металів-хромофорів, які відповідають за забарвлення при тих чи інших умовах освітлення
- плеохроїзм, тобто здатність анізотропних каменів змінювати колір при різних кутах огляду відносно основних кристалографічних осей
- довжина світлового шляху.

**Основна частина.** Кожне джерело світла має чіткі характеристики, що складаються зі світлового потоку (вимірюється в люменах) і кольорової температури, яку вимірюють у Кельвінах. Варто зазначити, що світлова температура не має ніякого відношення до температур навколишнього середовища, більше того, її визначають у зворотному напрямку: чим вища кольорова температура, тим холодніше світло, і чим нижча кольорова температура, тим світло жовтіше, тепліше [2].

Для класичних ламп розжарювання характерна кольорова температура на рівні 2700 К.

Нині їх усе більше витісняють жовті світлодіодні лампи з кольоровою температурою 3000-3500 К. Усі ці лампи можуть використовуватись для житлових приміщень, дитячих садочків, театрів тощо.

Нейтральне біле світло з кольоровою температурою (~4000-4500 К) використовують для офісів і виробництва – такі умови є найкращими для підтримки концентрації працівників, їх продуктивної роботи.

Холодне світло (~5000-6500 К) використовують там, де потрібна короткочасна висока концентрація: діагностичні приміщення лікарень, лабораторії тощо [2].






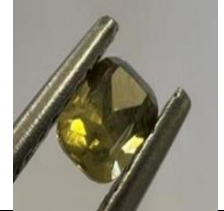


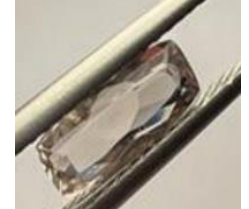

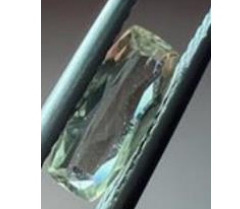


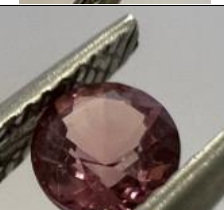
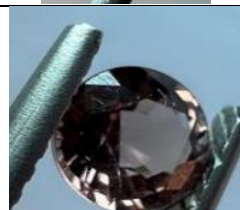






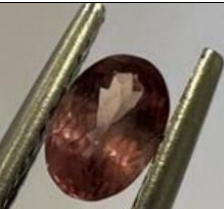



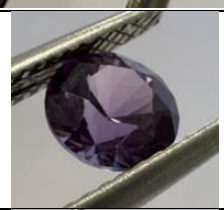
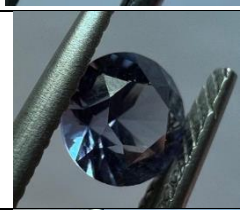
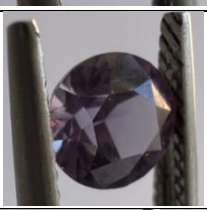




Нами було досліджено зміни кольору для деяких каменів з колекції кафедри, а саме: олександрит, хризоберил зі зміною кольору, султаніт, гранат Малайя, гранати зі зміною кольору, корунд синтетичний, а також алексит – скло, що імітує багато каменів, у даному випадку – султаніт. Умови освітлення: лампа розжарювання з кольоровою температурою 2500 К, лампа денного світла 4000 К, спеціальна гемологічна лампа 6500 К, і природне денне світло у сонячний день опівдні. Результати спостережень наведено у табл. 1.

Найяскравіші кольорові трансформації демонструє олександрит, який різко змінює колір від фіолетового під лампою розжарювання до насичено-блакитного під гемологічною лампою.

Хризоберил і султаніт мають під гемологічною лампою зеленкуватий колір. Звичайно, хризоберил більш насичений. Але при нижчих кольорових температурах хризоберил демонструє жовті відтінки, а султаніт – рожево-коричневі.

Таблиця 1

Зміна забарвлення у залежності від умов освітлення

Різновид	Кольорова температура ламп, джерело освітлення			
	2500 К	4000 К	6500 К	Денне світло
олександрит				
хризоберил зі зміною кольору				
султаніт				
гранат Малайя				
гранат зі зміною кольору №34				
гранат зі зміною кольору №98				
корунд синтетичний				
алексит				

Показаний у табл. 1 колір анізотропних каменів є сумішшю кольорів, які спостерігаються за кристалографічними осями – два кольори для одновісних каменів і три – для двовісних. У табл. 2 наведено відповідні кольори для анізотропних каменів, що спостерігалися нами за допомогою дихроскопу для різних умов освітлення – денного світла і лампи розжарювання.

Таблиця 2

Кольори і відтінки анізотропних каменів під дихроскопом за різних умов освітлення

Різновид	Денне світло			Лампа 2500 К		
	Колір 1	Колір 2	Колір 3	Колір 1	Колір 2	Колір 3
олександрит	Синювато-зелений	Блідо-фіолетовий	Блідо-блакитний	Синій	Фіолетово-пурпурний	Жовто-коричневий
хризоберил зі зміною кольору	Зеленуватий	Жовтуватий	Коричневатий	Блідо-зеленуватий	Жовтий	Коричнево-жовтий
султаніт	Блідо-зелений	Жовтувато-коричневий	-	Жовтувато-зеленуватий	Коричнево-рожевий	-
корунд синтетичний	Блакитно-фіолетовий	Фіолетовий	-	Червонувато-фіолетовий	Рожево-фіолетовий	-

Спостерігаючи зразки під різними джерелами освітленням, бачимо, що усі досліджувані гранати, які є ізотропними мінералами, досить плавно переходять від одного кольору до іншого. А ось алексит, навпаки, демонструє різку зміну кольорів: від червоного до зеленого.

Анізотропний корунд також має плавний перехід у фіолетово-синіх відтінках, але при лампі розжарювання ми бачимо вже насичено-рожевий колір.

Ще одним фактором, який впливає на забарвлення дорогоцінних каменів, є наявність елементів-хромофорів. Нами було досліджено хімічний склад кожного зразка за допомогою рентген-флюоресцентного аналізу. Особливості хімічного складу, а саме наявність та орієнтовна концентрація елементів-хромофорів у перерахунку на оксиди, наведені у табл. 3. Дані отримано за допомогою рентген-флюоресцентного аналізатору «ElvaX Plus», аналітик – канд. геол. наук Перков Є.С.

Олександрит і хризоберил очікувано продемонстрували наявність V, Cr, Ti, причому концентрація Cr в олександриті є найвищою для природних каменів. Для султаніту – це Cr і Ti. Ці елементи відповідають за жовто-зелені та рожево-червонуваті кольори.

Усі гранати мають велику концентрацію Mn, що і надає їм рожевого кольору. А в синтетичному корунді та склі, що імітує султаніт, переважає V, який забарвлює камені в зеленкувато-фіолетовий колір.

Таблиця 3

Вміст елементів-хромофорів у досліджуваних зразках, у відсотках

Різновид	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Інше
олександрит	0,01		1,07	0,08	
хризоберил зі зміною кольору	0,3		0,11	0,39	
султаніт			0,01	0,06	
гранат Малайя	0,14	8,75	0,42	0,25	
гранат зі зміною кольору №34	0,15	14,85	0,34	0,56	
гранат зі зміною кольору №98	< 0,02	15,27	< 0,01	< 0,02	
корунд синтетичний	0,3		< 0,01		
алексит	1,78	0,85	1,23		Rb, Co, Zr, Ni, Sr

Науковцями Гемологічного інститут Америки було встановлено, що на зміну кольору впливає також ще й співвідношення концентрації хромофорів.

Для олександритів співвідношення V<sup>3+</sup> і Cr<sup>3+</sup> 1:100 дає синювато-зелені і фіолетові кольори (як і у досліджуваного нами зразка), тоді як зниження концентрації Cr зміщує колір у бік жовтого і коричневого, а висока концентрація V виявляє стійкі зелені і сині кольори [1].

У той же час для гранатів співвідношення Mn до V і концентрація Cr теж мають значення. Перевищення Mn у понад 700 разів при низькому вмісті Cr чітко відносить один з досліджуваних нами гранатів (№34) до правої частини діаграми GIA [1] – зелено-коричневий у денному світлі і червонуватий під лампою розжарювання, тоді як зменшення цього значення надаватиме гранатам зелено-синіх і фіолетових кольорів (рис. 1). Високий вміст Cr позбавляє Mn-вмісні гранати зелених відтінків як у денному світлі, так і під лампою розжарювання, що і видно на іншому дослідженому нами зразку гранату (зразок №98, табл. 1).



Рис. 1. Діаграма GIA для гранатів зі зміною кольорів [1] і досліджуваних нами гранат №34 (праворуч) у денному світлі (верхній ряд) та під лампою розжарювання (нижній ряд)

Відкритий науковцями наприкінці минулого століття ефект Усамбара описує властивість матеріалу змінювати колір залежно від довжини шляху, який світло проходить через матеріал. Вперше цей феномен було описано для хромвмісних турмалінів зеленого кольору з гірського масиву Усамбара у Танзанії. У так званій критичній точці зміни товщини матеріалу (критична довжина шляху світла через дорогоцінний камінь) сприйманий колір світла, що проходить, змінюється з темно-зеленого на темно-червоний. Цей ефект можна спостерігати, дивлячись уздовж звичайного або незвичайного променя [3-4].

Колір дорогоцінних каменів, які виявляють ефект Усамбара, може також змінюватися через внутрішні відбиття, таким чином «подвоюючи» сприйнятну довжину шляху всередині каменю, або коли два камені накладаються (знову призводячи до «подвоєння» довжини шляху світла). Внутрішні відбиття є ефективним збільшенням довжини шляху, і червоні спалахи можуть з'являтися на деяких гранях у зовсім різних дорогоцінних каменях зеленуватого кольору, як у показаних на рис. 2 Cr-вмісного турмаліну і гранату зі зміною кольорів. Ефект Усамбара спостерігався в багатьох інших дорогоцінних каменях, таких як корунд, гранат, епідот і корнерупін [3].



Рис. 2. Ліворуч – гранат зі зміною кольорів під денним світлом (коричнево-зелений) та світлом лампи розжарювання (червоний). Червонувато-коричневі відблиски граней при денному світлі є результатом ефекту Усамбара. Праворуч – Cr-вмісний турмалін з Танзанії демонструє зміну кольору при різних джерелах освітлення [4]

На рис. 3 показано побудовані нами чотири хроматичні діаграми з різними кольоровими температурами та довжинами хвиль у нанометрах. Ми можемо спостерігати, що при збільшенні кольорової температури джерел освітлення довжини хвиль світла в усіх зразках, окрім олександриту, зменшуються. Це можна аргументувати тим, що при найнижчій температурі 2500 К усі зразки демонстрували відтінки червоного кольору, а це найдовша довжина хвилі для видимого світла, яка складає 700 нм. Олександрит же демонстрував фіолетовий колір, що має найкоротшу довжину видимої світлової хвилі 380 нм.

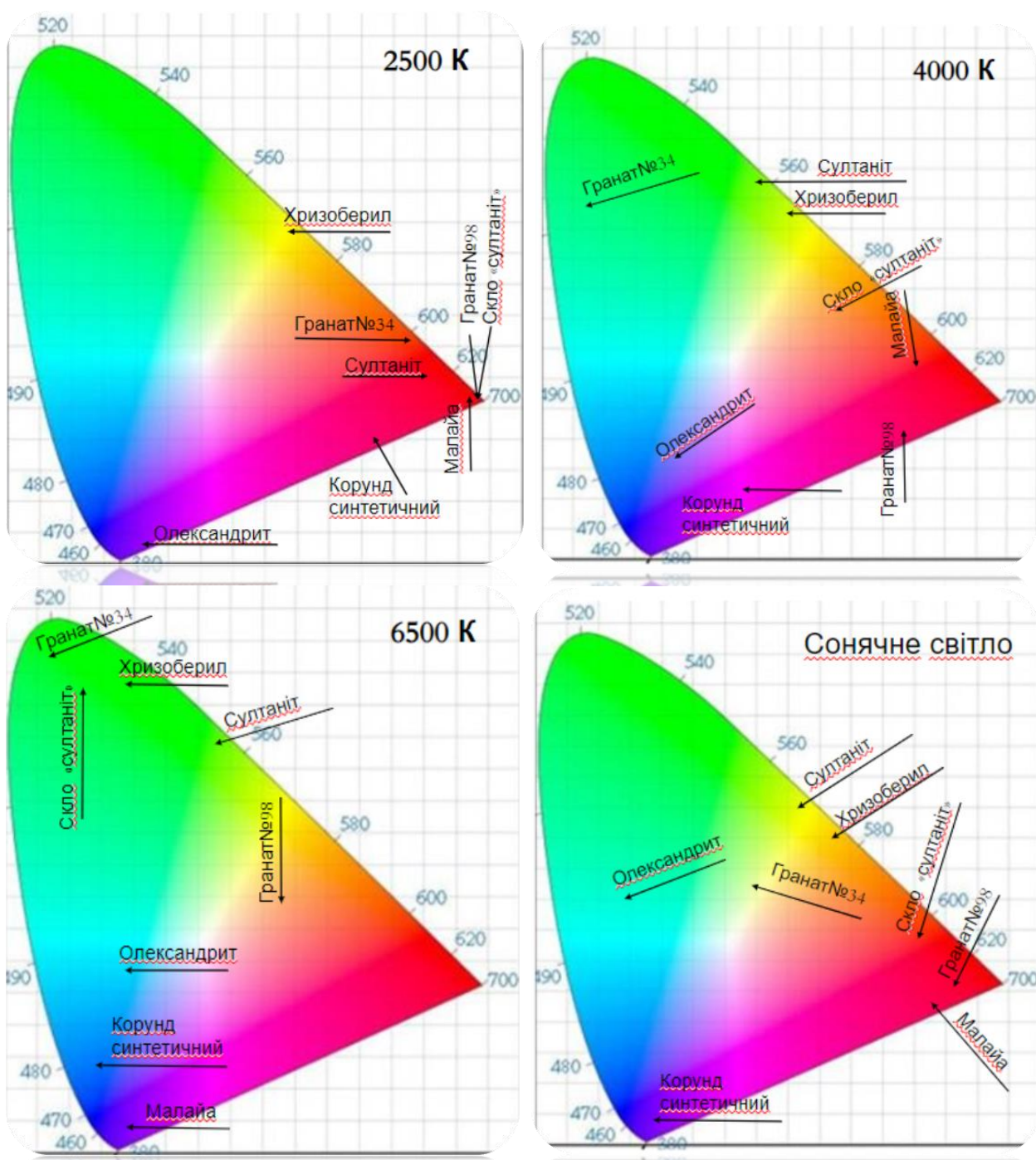


Рис. 3. Хроматичні діаграми моделей XYZ з довжинами хвиль(нм)

**Висновки:**

1. Найбільш різку зміну забарвлення викликають протилежні за кольоровою температурою джерела світла – лампа розжарювання, спеціальна гемологічна лампа і сонячне світло. Поступова заміна у побуті ламп розжарювання на жовті діодні лампи не дасть змоги спостерігати сильний реверс у кольорах, хоча зміна кольору, безумовно, буде помітна. У найбільш «програшній» ситуації будуть гранати зі змінами кольорів та синтетичний корунд «під олександрит» – їх кольори будуть більш наближеними один до одного і майже не демонструватимуть

сильних змін. У той же час такий штучний матеріал, як алексит (скло «під султаніт»), через наявність інших хромофорів, демонструє різку зміну кольорів при зміні освітлення, причому кольори майже співпадають при таких протилежних джерелах, як денне світло і лампа розжарювання.

2. На особливості зміни кольору впливає не лише наявність хромофорів, а й їх концентрація. Так, для олександритів співвідношення  $V^{3+}$  і  $Cr^{3+}$  1:100 дає синювато-зелені і фіолетові кольори, тоді як зниження  $Cr^{3+}$  зміщує колір у бік жовтого і коричневого, а висока концентрація  $V^{3+}$  виявляє стійкі зелені і сині кольори.

У той же час для гранатів співвідношення  $Mn^{2+}$  до  $V^{3+}$  і концентрація  $Cr^{3+}$  також має значення. Перевищення  $Mn^{2+}$  у понад 700 разів при низькому вмісті  $Cr^{3+}$  чітко відносить досліджуваний нами гранат до правої частини діаграми GIA зі зміною кольорів гранатів (зелено-коричневий у денному світлі і червонуватий під лампою 2500 K), тоді як зменшення цього значення надаватиме гранатам зелено-синіх і фіолетових кольорів. Високий вміст  $Cr^{3+}$  позбавляє Mn-вмісні гранати зелених відтінків.

3. Серед анізотропних каменів найбільш сильний плеохроїзм при різних джерелах освітлення очікувано продемонстрував олександрит, тоді як найскладнішим зразком для виявлення плеохроїзму став синтетичний корунд.

#### Перелік посилань

1. *Unusual Phenomenal Colored Stones. GIA Knowledge Sessions Webinar Series* (2021). Gemological Institute of America  
<https://www.youtube.com/watch?v=4S2EaocDG0k&list=PLWlzLnp9A9J0dF3TjLYqpqQ3hAZ0pNC9s&index=6>
2. Що таке кольорова температура діодних ламп? (2018). <https://www.light-group.com.ua/about/novyny/shcho-take-kolorova-temperatura-svitlodiodnykh-lamp/>
3. Taran, M. N., & Naumenko, I. V. (2016). Usambara effect in tourmaline: optical spectroscopy and colourimetric studies. *Mineralogical Magazine*, 80(5), 705–717.  
<https://doi.org/10.1180/minmag.2016.080.016>
4. Klumb, A.W. (2019). *The Usambara Effect and Other Colour-Change Effects in Gemstones*.  
<https://www.ssef.ch/the-usambara-effect-and-other-colour-change-effects-in-gemstones/>

#### ABSTRACT

**Purpose.** To explain the main factors of color transformations on specific samples of precious stones with a change in color, as well as their synthetic analogues and imitations.

**Methods.** The work uses X-ray fluorescence analysis, as well as general scientific methods of research – empirical and theoretical (analysis, generalization, comparison, explanation). During the research, lamps with different light spectra (different color temperatures) were used: an incandescent lamp, a yellow diode lamp, a special gemological lamp.

**Findings.** The content and concentration of chromophore ions were determined for samples of precious stones and their imitations with color changes, namely alexandrite, chrysoberyl, sultanite, Malaya garnet, garnets with color changes, as well as synthetic corundum and alexite (glass). The influence of the concentration ratio of chromophore ions on the color of alexandrites and garnets with color change is shown. Color change for anisotropic stones with pleochroism is shown. The colors of



anisotropic stones along the crystallographic axes were studied – two colors for uniaxial stones and three – for biaxial stones.

**The originality.** The change in color of the studied samples from the department's collection under the influence of four sources of illumination: daylight, an incandescent lamp, a yellow diode lamp, and a special gemological lamp was demonstrated. Chromatic charts are constructed with different color temperatures and wavelengths for each light source. It is shown that when the color temperature of light sources increases, the wavelengths of light in all samples, except for alexandrite, decrease.

**Practical implementation.** The data presented in the article demonstrate specific examples of the influence of factors on the change in the color of precious stones and provide an opportunity for additional explanations of this phenomenon for specialists, as well as expand its understanding by direct consumers of relevant services on the market. It is shown that with the gradual replacement of incandescent lamps with modern diode lamps, garnets with color changes and synthetic corundum "under alexandrite" will be in the most "losing" situation - their colors will be closer to each other and will hardly show strong changes. At the same time, such an artificial material as alexite (which is passed off as sultanite, in particular) will attract the attention of even uninformed buyers due to a sharp change in color, while the colors will almost match under such opposite sources as daylight and an incandescent lamp.

**Keywords:** *gemstones with color change, chromophore ion concentration ratio, color temperature, Usambara effect, alexandrite, sultanite, alexite.*