Разработка критериев для определения насыщенности цвета ювелирных камней

Роман Николаевич ЗУБОВ*

Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия, Республика Башкортостан, Уфа

Аннотация

Актуальность работы обусловлена необходимостью совершенствования спектральных методов определения цветовых характеристик ювелирных камней для повышения объективности и точности их оценки.

Цель работы: разработка критериев, которые позволят определять количественные показатели насыщенности цвета ювелирных камней на основе физико-математических принципов и изучения спектральных данных.

Методология исследования: изучение спектров пропускания ювелирных камней, выявление закономерностей и разработка физико-математического аппарата для количественной оценки показателя насыщенности цвета.

Результаты. Предложены критерии для оценки абсолютной и относительной насыщенности цвета ювелирного камня в виде отношения относительной величины пропускания света к квадрату разности длин волн в зоне полосы поглощения, обусловленной главным элементом-хромофором. Приведены результаты экспериментов и примеры, раскрывающие подходы к количественной оценке насыщенности цвета различных ювелирных камней с аллохроматической окраской с учетом спектральной чувствительности глаза.

Заключение. Измерение спектральных характеристик ювелирных камней позволяет проводить количественную оценку не только светлоты, но и показателей насыщенности цвета. Повышение точности указанных измерений возможно при разработке строгого соответствия принятых в геммологии цветовых тонов диапазонам длин волн видимого света и учета спектральной чувствительности человеческого глаза.

Ключевые слова: геммология, ювелирные камни, спектрометр, спектр пропускания, спектральная чувствительность, цветовой тон, насыщенность цвета, хромофор.

Введение

Среди принятых в геммологии трех основных характеристик цвета ювелирных камней – цветового тона (hue), темноты-светлоты (tone), насыщенности (saturation) последняя является наиболее сложной в оценке, особенно для темных ювелирных камней. Разработанная Геммологическим институтом Америки (GIA) система пластиковых эталонов GemSet, на смену которой пришло израильское программное обеспечение GemEWizard (31hue, 6tones, 6saturation – 1116 gem colors), значительно облегчили задачу оценки, но сложности с промежуточными цветами сохранились ввиду огромного многообразия цветовых тонов. Приведенная в статье [1] всесторонняя характеристика различных систем оценки цвета констатирует тот факт, что разные модели описывают все цветовое многообразие, но дискретно. Точная связь с физическими процессами, описывающими оптические явления, в том числе цветовые, отсутствует. Колориметрическая система оценки цвета CIERGB также используется при изучении цветных камней, например для классификации окраски турмалина в зависимости от параметров элементарной ячейки кристалла [2], хотя, как отмечают авторы [3], уже уступает место Международной системе для количественной оценки цвета МКО XYZ. В отличие от колориметрических систем спектральные данные объективны и не зависят от наблюдателя [4].

Вероятно, основной причиной сложившейся ситу-

ации стала действительно сложная проблема на стыке биологии и физики, касающаяся восприятия цвета человеческим глазом. Чувствительность глаза к излучениям различных длин волн неодинакова. Свойство глаза по-разному оценивать одинаковую лучистую энергию или мощность различных длин волн видимого спектра называется спектральной чувствительностью. Даже в видимой части спектра (380–780 нм) мы лучше воспринимаем желто-зеленый цвет (555 нм) – 100 %, в то время как свет с длиной волны 470 нм лишь на 9 %, а 650 нм – на 11 % [5]. Добавим влияние общей освещенности, индивидуальных особенностей наблюдателя, спектральных характеристик источника света, чтобы оценить сложность точного решения задачи. Усредненная кривая спектральной чувствительности глаза (рис. 1), принятая Международным соглашением еще в 1924 г., используется и сейчас при всех расчетах светового воздействия сложного по составу излучения.

Методы исследования

Спектрометр GL Gem Spectrometer Канадского института геммологии <https://www.cigem.ca> позволяет получать спектры пропускания и спектры поглощения света, прошедшего сквозь камень. Источником света служит галогенная лампа. Мы будем исследовать спектры

пропускания для цифровой обработки, которые наиболее явно отражают видимые человеческим глазом особенности цвета. Спектральная оценка также предлагается Е. А. Васильевым для бриллиантов [6]. В Голландии аналогичные работы также ведутся для бриллиантов, высокая стоимость которых делает «машинные» методы особенно востребованными [7]. Анализ спектров поглощения, в том числе для турмалинов, с целью оценки цвета был выполнен коллективом авторов, но он очень сложен [8].

Как было показано в предыдущей статье [9], на основе анализа спектров поглощения характеристики светлоты связаны с поглощением света в камне, которая описывается законом Бугера–Бэра. Насыщенность же связана с «чистотой» тона, отсутствием других цветовых «примесей», размывающих яркие тона, вплоть до потери конкретного тона и превращения его в серый цвет. Большинство хромофоров дают целую серию полос поглощения на спектрах, но наиболее важной из них является та, которая располагается рядом с областью основного цветового тона [9] и «отсекает» другие цвета спектра. Для изучения насыщенности цвета исследуем не спектры поглощения, а спектры пропускания света, представляющие собой комбинации выпуклых и вогнутых фрагментов кривых, простейшей аппроксимацией которых является кривая 2-го порядка или парабола. На рис. 2 представлены спектры пропускания двух розово-красных турмалинов различной насыщенности, которую можно визуальнo оценить по фото (рис. 3).

Основные расчетные уравнения

Анализируя спектры пропускания света, мы видим, что основной хромофор Mn^{3+} «формирует» полосу поглощения определенной части спектра вокруг длины волны 515–530 нм, справа и слева от которой находятся зоны пропускания [10], определяющие цвет (тон) ювелирного камня с аллохроматической окраской и имеющие вид, близкий к параболам, ветви которых направлены вниз, а вершины соответствуют координатам

$$(\lambda_1; T_1), (\lambda_2; T_2),$$

где λ_1, λ_2 – длины волн с максимальным пропусканием света; T_1, T_2 – соответствующие коэффициенты пропускания, доли ед. или %.

Аналогичное явление происходит и с другими элементами-хромофорами, атомы которых при формировании кристаллической решетки или при воздействии на нее [11] обеспечивают поглощение света определенных длин волн. Добавив к анализу точку с координатами $(\lambda_{xp}; T_{xp})$, характеризующую минимум пропускания света, мы сможем составить уравнение параболы, проходящей через две эти точки и симметричной относительно вертикальной оси.

Уравнения будут иметь вид:

$$T(\lambda) = a\lambda^2 + b\lambda + c,$$

где для левой от полосы поглощения параболы (рис. 2):

$$a_1 = -(T_1 - T_{xp})/(\lambda_{xp} - \lambda_1)^2; b_1 = 2\lambda_1(T_1 - T_{xp})/(\lambda_{xp} - \lambda_1)^2; c_1 = T_1 - \lambda_1^2(T_1 - T_{xp})/(\lambda_{xp} - \lambda_1)^2,$$

а для правой от полосы поглощения параболы (рис. 2):

Рисунок 1. Спектральная чувствительность человеческого глаза днем (1) и ночью (2).

Figure 1. Spectral sensitivity of human eye in the afternoon (1) and at night (2).

Рисунок 2. Спектры пропускания света для турмалинов 16,57 и 6,30 карата.

Figure 2. Transmittance spectra of tourmalines 16,57 and 6,30 carat.

Рисунок 3. Турмалины 16,57 и 6,30 карата с различной насыщенностью цвета.

Figure 3. Various color saturation for the tourmalines 16,57 and 6,30 carat.

$$a_2 = -(T_2 - T_{xp})/(\lambda_2 - \lambda_{xp})^2; b_2 = 2\lambda_2(T_2 - T_{xp})/(\lambda_2 - \lambda_{xp})^2; c_2 = T_2 - \lambda_2^2(T_2 - T_{xp})/(\lambda_2 - \lambda_{xp})^2.$$

Во всех определенных параметрах a , b , c есть общее выражение

$$H_i = a_i = (T_i - T_{xp})/(\lambda_{xp} - \lambda_i)^2, \quad (1)$$

которое определяет, пологими или крутыми будут ветви параболы к оси длин волн. Чем больше числитель (пропускание света) и чем меньше знаменатель (диапазон длин волн), тем более ярким и чистым будет видимый цветовой тон. Таким образом, эта величина может претендовать на характеристику насыщенности цвета H_i . Но величина T_i измеряется в долях или процентах, а длины волн видимого света λ_i , как правило, в нанометрах, поэтому удобнее перейти к относительным величинам. Для этого надо сопоставить параметр насыщенности (1) с его предельной величиной, определив H_i/H_{np} . Но если предельная величина числителя $(T_i - T_{xp})$ равна 1, то для разности длин волн $(\lambda_{xp} - \lambda_i)$ не все так однозначно. Во-первых, значения λ_i и λ_{xp} зависят от направления прохождения света относительно кристаллографической оси для анизотропных камней, поэтому придется брать среднее значение из множества измерений. Во-вторых, насыщенность будет стремиться к предельной при λ_i , стремящейся к середине диапазона длин волн данного цвета λ_{cp} , а λ_{xp} – к нижней $\lambda_{н.г}$ или верхней $\lambda_{в.г}$ границе цветового диапазона, где

$$\lambda_{cp} = (\lambda_{н.г} + \lambda_{в.г})/2.$$

В настоящее время не существует однозначно определенного соответствия длин волн для каждого оттенка, выделяемого по ТУ 117-3-0761-7-00 «Вставки обработанные из природных ограночных материалов для ювелирных изделий» или по классификации GIA. Кроме того, показания спектрометра не учитывают разную чувствительность человеческого глаза к разным длинам волн и в результате «картинка», видимая прибором, лишь приближенно отражает человеческое восприятие цвета.

И все же предельная насыщенность $H_{np} = 1/(\lambda_{xp} - \lambda_i)^2$ наглядно демонстрирует зависимость от положения зоны поглощения хромофора по отношению к зоне максимального пропускания света. Так, для хрома Cr^{3+} в хромовом турмалине $H_{np} = 1/(540-600)^2 = 278 \times 10^{12} \text{ нм}^{-2}$, а для железа в турмалине Fe^{3+} $H_{np} = 1/(540-715)^2 = 33 \times 10^{12} \text{ нм}^{-2}$, что наглядно проявляется в недостаточной яркости зеленого цвета. Для розово-красного турмалина, окраска которого вызвана марганцем Mn^{3+} , $H_{np} = 1/(660-530)^2 = 59 \times 10^{12} \text{ нм}^{-2}$.

Для выхода из сложившейся ситуации упростим задачу – будем определять разности $(\lambda_{xp} - \lambda_i)$ при вращении камня на столике прибора не менее 5–6 раз, а в качестве предельного будем принимать минимальное значение $(\lambda_{xp} - \lambda_i)$ из полученных измерений:

$$H_{np} = 1/(\lambda_{xp} - \lambda_i)_{\min}^2. \quad (2)$$

Данное допущение позволит изучать показатели относительной насыщенности цвета наряду с расчетом абсолютных значений насыщенности по выражению (1), т. е. отношения светопропускания к квадрату волнового диапазона. Таким образом, чем выше показатель относительной насыщенности, тем «стабильнее» положение длины волны λ_i и тем меньше меняется цвет при изменении направления прохождения света (при поворотах камня на столике прибора). Этот же эффект наблюдается и человеческим глазом, когда мы видим разную насыщенность цвета при поворотах ограненного камня, что затрудняет сравнение его с эталонами [12].

Основные результаты исследования и их обсуждение

Для подтверждения выдвинутых предположений проведем измерения показателей абсолютной и относительной насыщенности на образцах розово-красных и зеленых турмалинов, которые имеют достаточно высокое двупреломление, и на изотропных образцах – синих и розово-красных шпинелях, фото которых представлены на рис. 4, 5. Для красных шпинелей характерна полоса поглощения при 545 нм (Cr^{3+}), для синих шпинелей – полоса при 560 нм (Fe^{2+}) [13]. Результаты измерений сведены

Рисунок 4. Шпинели красные 3,90–2,09–1,28–1,99–3,34 карата и синие 3,79–1,68–6,93–2,91–4,26 карата соответственно (слева-направо).

Figure 4. Red spinels 3,90–2,09–1,28–1,99–3,34 carat and blue spinels 3,79–1,68–6,93–2,91–4,26 carat respectively (from the left to right).

Рисунок 5. Турмалины зеленые 4,57–3,54–8,13–8,31–9,45 карата и красные 5,46–16,57–11,3–8,12–6,30 карата соответственно (слева-направо).

Figure 5. Green tourmalines 4,57–3,54–8,13–8,31–9,45 carat and red tourmalines 5,46–16,57–11,3–8,12–6,30 carat respectively (from the left to right).

Результаты обработки спектров пропускания ювелирных камней на рис. 6–9.

Результаты обработки спектров пропускания ювелирных камней на рис. 6–9.

Вес, карат	λ_1 , нм	λ_{xp} , нм	λ_2 , нм	$T_1 - T_{xp}$	$T_2 - T_{xp}$	H_1 , нм ⁻² × 10 ¹²	H_2 , нм ⁻² × 10 ¹²	$H_1/H_{пр}$	$H_2/H_{пр}$	Примечание
Красные турмалины										
5,46	482	509	630	0,015	0,074	21,13	5,84	0,010	0,075	
16,57	450	514	598	0,142	0,310	34,05	43,47	0,122	0,225	
11,30	431	518	587	0,393	0,393	52,90	87,77	0,382	0,275	1,27 % и 79 %
8,12	463	541	641	0,311	0,558	51,86	55,46	0,292	0,522	7,0 % и 17%
6,30	428	531	652	0,393	0,900	37,05	66,78	0,385	0,793	
Диапазон цвета	Фиолетово- синий		Оранжево- красный				Фиолето- во-синий		Оранжево- красный	
Зеленые турмалины										
4,57	–	716	583	–	0,244	–	13,91	–	0,217	
3,54	474	745	554	0,176	0,264	2,38	7,22	0,170	0,244	
8,13	470	733	546	0,502	0,654	7,24	18,69	0,485	0,596	
8,31	–	715	542	–	0,687	–	22,66	–	0,645	
9,45	–	715	561	–	0,544	–	22,34	–	0,524	
Диапазон цвета	Зеленовато- синий		Желто- зеленый				Зеленова- то-синий		Желто- зеленый	
Красные шпинели										
3,90	485	548	621	0,108	0,095	27,70	16,89	0,084	0,071	
2,09	484	545	671	0,078	0,234	20,16	15,11	0,061	0,176	
1,28	471	539	638	0,465	0,568	97,52	61,86	0,427	0,312	
1,99	474	540	663	0,432	0,678	97,21	41,83	0,398	0,543	
3,34	495	536	696	0,018	0,621	10,63	24,33	0,016	0,525	
Диапазон цвета	Зеленовато- синий		Оранжево- красный				Зеленова- то-синий		Оранжево- красный	
Синие шпинели										
3,79	490	554	–	0,127	–	31,68	–	0,110	–	
1,68	490	577	–	0,284	–	38,52	–	0,211	–	
6,93	492	558	–	0,280	–	65,80	–	0,270	–	
2,91	492	558	–	0,376	–	87,01	–	0,345	–	
4,26	494	558	–	0,389	–	93,95	–	0,361	–	
Диапазон цвета	Сине- зеленый						Сине- зеленый

Рис. 6. Спектры пропускания света красных турмалинов 5,46 (а), 16,57 (б), 11,30 (в), 8,12 (г), 6,30 (д) карата соответственно.
Figure 6. Transmittance spectra of red tourmalines 5,46 (a), 16,57 (б), 11,30 (в), 8,12 (г), 6,30 (д) carat respectively.

в таблицу, где показаны итоговые средние арифметические значения всех показателей. Области спектров, выходящие за границы человеческого зрения 380–780 нм, не принимались в расчет, несмотря на наличие полос поглощения. Анализ полученных результатов для ювелирных камней нескольких видов с аллохроматической окраской различных цветов позволяет установить, что относительная насыщенность $H_i/H_{i\text{пр}}$ приблизительно соответствует принятой шестибальной шкале с грани-

цами 0–16,6 %–33,3 %–50 %–66,6 %–83,3 %–100 %, хотя, на наш взгляд, практически все значения относительной насыщенности получаются несколько заниженными. Причины этого явления предстоит выяснить, хотя наиболее вероятным является принятое допущение (2), а также спектральная чувствительность глаза. Показатели же абсолютной насыщенности имеют некоторые отклонения от ранжирования по относительной насыщенности.

Рисунок 7. Спектры пропускания света зеленых турмалинов 4,57 (а), 3,54 (б), 8,13 (в), 8,31 (г), 9,45 (д) карата соответственно.
Figure 7. Transmittance spectra of green tourmalines 4,57 (a), 3,54 (б), 8,13 (в), 8,31 (г), 9,45 (д) carat respectively.

Для большинства красных турмалинов и шпинелей характерна полоса пропускания света в фиолетово-синей области спектра, вследствие которой камни приобретают пурпурный оттенок. В этом можно убедиться и рассматривая сами спектры пропускания света на рис. 6–9. Возникает вопрос: поскольку мы определяем насыщенность по отдельным цветовым тонам, то как они складываются в общую насыщенность, свойственную конкретному образцу? Предположительно, здесь и будет

играть свою роль спектральная чувствительность глаза (рис. 1).

Так, для турмалина 11,3 карата насыщенности по фиолетово-синему цвету (431 нм) в 0,382 соответствует дневная чувствительность 0,0127 (1,27 %), а насыщенности по оранжево-красному цвету (587 нм) в 0,275 соответствует дневная чувствительность 0,790 (79 %). Для «соседнего» камня весом 8,12 карата насыщенности по фиолетово-синему цвету (уже 463 нм) в 0,292 соответствует дневная

Рисунок 8. Спектры пропускания света красных шпинелей 3,90 (а), 2,09 (б), 1,28 (в), 1,99 (г), 3,34 (д) карата соответственно.
Figure 8. Transmittance spectra of red spinels 3,90 (a), 2,09 (б), 1,28 (в), 1,99 (г), 3,34 (д) carat respectively.

чувствительность уже в 7,0 %, а по оранжево-красному цвету (уже 641 nm) при насыщенности 0,522 имеем чувствительность 17 %. При сопоставлении пары 1,27 и 79 с парой значений 7 и 17 очевидно, что роль коротковолнового излучения во втором случае весьма значительна, чем и обусловлен неоновый цвет камня.

Возможно, необходимо определять средневзвешенное значение насыщенности по отдельным цветовым тонам с учетом спектральной чувствительности глаза. Очевидно, что восприятие человеческого глаза существенно отличается от приборного, и этот вопрос требует отдельного исследования. Поэтому большинство исследований

используют колориметрические методы для определения насыщенности цвета, как например, в работе [14], где изучаются цветовые характеристики гранатов с александритовым эффектом в сравнении с содержанием в них хромофоров в системе CIE Lab. А одним из самых сложных современных устройств для оценки цвета можно считать разработанный коллективом авторов прибор для автоматической оценки цвета опалов [15] на основе колориметрических моделей RGB, XYZ, HSB.

Выводы

Как показали проведенные измерения на анизотропных и изотропных ювелирных камнях различных цветов,

Рисунок 9. Спектры пропускания света для синих шпинелей 3,79 (а), 1,68 (б), 6,93 (в), 2,91 (г), 4,26 (д) карат соответственно.
Figure 9. Transmittance spectra of blue spinels 3,79 (a), 1,68 (б), 6,93 (в), 2,91 (г), 4,26 (д) carat respectively.

предложенный показатель для оценки насыщенности цвета в виде выражения (1) удовлетворительно отражает ее изменение, имеет четкую физическую и математическую интерпретацию, однако требует уточнений в части абсолютных значений и сравнения с различными существующими эталонами.

Поскольку числитель выражения (1) экспоненциально связан со светлотой ювелирного камня [9], а знаменатель – с диапазоном длин волн, определяющим основной цветовой тон, то предложенный показатель насыщенности может претендовать на численную оценку всех цветовых параметров ювелирного камня с аллохроматической окра-

ской с учетом, разумеется, спектральной чувствительности человеческого зрения:

$$H = (\exp(-\alpha(i)t) - \exp(-\alpha(xp)t)) / (\lambda_{xp} - \lambda_i)^2, \quad (3)$$

где α – показатель поглощения соответствующей длины волны; t – толщина слоя вещества, через которое проходит свет. Выражение (3) получается из выражения (1) с использованием закона Бугера–Бэра и характеризует насыщенность цвета как отношение разности экспонент светлоты и квадрата диапазона соответствующих длин волн данного цветового тона. Это выгодно отличает интерпретацию насыщенности цвета от многочисленных существующих цветовых моделей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gemstone Color Measurements and Specifications, by Joel E. Arem, Ph.D., FGA. URL: <http://www.gemsociety.org/article/>
2. Коновалова А. Н., Лобацкая Р. М. Анализ цвета турмалинов для дизайна ювелирных изделий // Дизайн. Теория и практика. 2011. № 7. С. 1–22.
3. Денисов Б. Н., Гурьянова Е. М. Измерение колориметрических характеристик источников света // Учебный эксперимент в образовании. 2018. № 2(86). С. 83–92.
4. Кумпаненко И. В., Рошин А. В., Иванова Н. А., Блошенко А. В., Шалынина Н. А., Корнеева Т. Н. Химический анализ по цветометрическим данным: выбор колориметрических параметров для определения концентраций хромофоров // Российский химический журнал. 2013. Т. 57, № 1. С. 6–16.
5. Ложкин Л. Д. Цвет, его измерение и восприятие // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2012. Т. 15, № 3. С. 110–122.
6. Васильев Е. А. Регистрация спектров поглощения ограненных драгоценных камней // Записки Горного института. 2013. Т. 200. С. 163–166. URL: <http://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/download/732/760>
7. Royen J., Loots I. Automatic color grading. WTOCD, Lier, Belgium. URL: http://www.wtcd.be/nl/Projects/lumisense_auto_color.html
8. Ertl A., Kolitsch U., Dyar M., Hughes J., Rossman G., Pieczka A., Henry D., Pezzotta F., Prowatke S., Lenganer C., Korner W., Brandstatter F., Francis C., Prem M., Tillmanns E. Limitations of Fe²⁺ and Mn²⁺ site occupancy in tourmaline: Evidence from Fe²⁺ and Mn²⁺- rich tourmaline // American Mineralogist. 2012. Vol. 97. pp. 1402–1416. <https://doi.org/10.2138/am.2012.4028>
9. Зубов Р. Н. Количественная оценка цвета камней с аллохроматической окраской // Изв. УГГУ. 2018. Вып. 4(52). С. 50–56.
10. Reddy B. J., Frost R. I., Martens W. N., Wain D. I. Klopogge J.T. Spectroscopic characterization of Mn-rich tourmalines // Vibrational Spectroscopy. 2007. Vol. 44. pp. 42–49.
11. Лопатин О. Н., Николаев А. Г., Хайбуллин Р. Н. Кристаллохимические аспекты ионной имплантации минералов и их синтетических аналогов // Записки РМО. 2012. Т. 141, № 1. С. 61–70. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17674662>
12. Киселев Р. К. Необходимость обновления системы оценки цвета ограненного камня // Науч. вестник МГГУ. 2012. № 9. С. 30–37. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17964606>
13. Kleismantas A., Dauksyte A. The influence of Vietnam and Sri-Lanka spinel mineral chemical elements on colour // Chemija. 2016. Vol. 27, № 1. pp. 45–51. URL: <http://mokslozurnalai.lmaleidykla.lt/publ/0235-7216/2016/1/45%E2%80%939351.pdf>
14. Krzemnicki M. S., Hanni H. A., Reusser E. Colour-change garnets from Madagascar: comparison of colorimetric with chemical data // Journal of Gemmology. 2001. Vol. 27 (7). pp 395–408.
15. Wang D., Bischof L., Lagerstrom R., Hilsenstein V., Hornabrook A., Hornabrook G. Automated opal grading by imaging and statistical learning // IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics: systems. 2016. Vol. 46, № 2. pp. 185–201.

Статья поступила в редакцию 05 сентября 2019 года

Development of criteria for determining the color saturation of gemstones

Roman Nikolaevich ZUBOV*

Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia

Annotation

The urgency of the problem is conditioned by spectral methods development providing objectivity and accuracy of gemstones color grading.

The purpose of the work: working-out the criteria which allows to determine gemstones saturation based on physics-mathematics patterns and spectral data.

Methodology of the research: studying of colored gemstones transmittance spectra, discovery of the regularities and development of physics-mathematics methods for the color saturation grading.

Results. The absolute and relative criteria for gemstone saturation grading was suggested as ratio of difference between light transmittance to squared difference between wavelengths at the area of basic chromophore element. Experimental data and allochromatic gemstones saturation calculation examples were presented considering spectral sensitivity of human eye.

Summary. Gemstones absorption and transmittance spectra research allows to define tone and saturation gemstone color features. To improve tone and saturation definition accuracy, it is necessary to select standard hue of gemstones for wavelengths scale graduating along with spectral sensitivity of human eye.

Keywords: gemology, gemstone, spectrometer, transmittance spectra, spectral sensitivity, hue, tone, saturation, chromophore.

REFERENCES

1. Gemstone Color Measurements and Specifications, by Joel E. Arem, Ph.D., FGA. URL: <http://www.gemsociety.org/article/>
2. Konovalova A. N., Lobatskaya R. M. 2011, Analysis of tourmaline color for the design of jewelry. *Design. Theory and practice*, no. 7, pp. 1–22.
3. Denisov B. N., Guryanova E. M. 2018, Measuring colorimetric characteristics of the light sources. *Training experiment at education*, no. 2(86), pp.83–92.
4. Kumpanenko I. V., Roschin A. V., Ivanova N. A., Bloshenko A. V., Shalynina N. A., Korneyeva T. N. 2013, Chemical analysis by colorimetric data: selection of colorimetric parameters for chromophore concentration definition. *Russian chemical journal*, vol. 57, no. 1, pp. 6–16.
5. Lozhkin L. D. 2012, Color measurement and perception. *Physics of wave processes and radio-engineering systems*, vol. 15, no. 3, pp. 110–122.
6. Vasilyev E. A. 2013, Registration of the faceted gems absorption spectra. *Journal of Mining Institute*, vol. 200, pp. 163–166. URL: <http://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/download/732/760>
7. Royen J., Loots I. Automatic color grading. WTOCD, Liege, Belgium. URL: http://www.wtcd.be/nl/Projects/lumisense_auto_color.html
8. Ertl A., Kolitsch U., Dyar M., Hughes J., Rossman G., Pieczka A., Henry D., Pezzotta F., Prowatke S., Lenganer C., Korner W., Brandstatter F., Francis C., Prem M., Tillmanns E. 2012, Limitations of Fe²⁺ and Mn²⁺ site occupancy in tourmaline: Evidence from Fe²⁺ and Mn²⁺-rich tourmaline. *American Mineralogist*, vol. 97 (8–9), pp. 1402–1416. <https://doi.org/10.2138/am.2012.4028>
9. Zubov R. N. 2018, Quantitative evaluation of the color of gem stones with allochromatic color. *News of the Ural State Mining University*, issue 4(52), pp. 50–56.
10. Reddy B. J., Frost R. I., Martens W. N., Wain D. I., Klopogge J. T. 2007, Spectroscopic characterization of Mn-rich tourmalines. *Vibrational Spectroscopy*, vol. 44, pp. 42–49.
11. Lopatin O. N., Nikolaev A. G., Khaibullin R. I. 2012, Crystal-chemical aspects of the ionic implantation of minerals and their synthetic analogs. *Zapiski RMO* [Proceedings of the Russian Mineralogical Society], vol. 141, no. 1, pp. 61–70. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17674662>
12. Kiselev R. K. 2012, The need to update the evaluation system color cut stone. *Nauchnyy vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta. Gornye nauki i tekhnologii* [Mining Science and Technology], no. 9, pp. 30–37. (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17964606>
13. Kleismantas A., Daukys A. 2016, The influence of Vietnam and Sri-Lanka spinel mineral chemical elements on colour. *Chemija*, vol. 27, no. 1, pp. 45–51. URL: <http://mokslojurnalai.lmaledykla.lt/publ/0235-7216/2016/1/45%E2%80%9351.pdf>
14. Krzemnicki M. S., Hanni H. A., Reusser E. 2001, Colour-change garnets from Madagascar: comparison of colorimetric with chemical data. *Journal of Gemmology*, vol. 27 (7), pp. 395–408.
15. Wang D., Bischof L., Lagerstrom R., Hilsenstein V., Hornabrook A., Hornabrook G. 2016, Automated opal grading by imaging and statistical learning. *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics: systems*, vol. 46, no. 2, pp. 185–201

The article was received on September 05, 2019