

# Реконструкция спектра по координатам цвета методами анализа главных компонент и генетической оптимизации\*

Б. КРАНИЧ<sup>1</sup>, Ж. САВОЛИ<sup>2</sup>, А. ХОРВАТ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Веспрем, Венгрия.

<sup>2</sup> Университет им. Иштвана Сечени, Дьёр, Венгрия.

Email: balazskranicz@gmail.com, savolizs@revai.hu, horvatha@sze.hu.

## Аннотация

Реконструкция спектра излучения или спектрального коэффициента отражения на основе одних только значений координат цвета невозможна из-за бесконечного количества метамеров. Однако наличие дополнительной информации о типе источника света или поверхности позволяет произвести приблизительную реконструкцию. Этому вопросу было посвящено несколько работ, в которых использовался анализ главных компонент (АГК): воспользовавшись наборами образцов спектров излучения (или спектральных коэффициентов отражения), можно ограничить область поиска подходящего метамера. В данной работе представлен основанный на АГК новый метод оптимизации, более точный по сравнению с описанными ранее и позволяющий получить неотрицательные гладкие результаты. Использование заранее составленных таблиц позволяет значительно уменьшить как затраты времени, так и требуемый объём памяти. Этот метод позволяет получить хорошо реконструированный реальный спектр иллюминанта или спектральное распределение коэффициента отражения поверхности на основе координат цвета цифрового изображения.

**Ключевые слова:** реконструкция спектра, координаты цвета, анализ главных компонент, гладкие метамеры, иллюминанты, справочная таблица.

## 1. Введение

Одно из важнейших положений колориметрии состоит в том, что любой цветовой стимул можно однозначно описать тремя цифрами, то есть зна-

чениями координат цвета в колориметрической системе  $XYZ$  МКО или координат в любом другом подходящем цветовом пространстве ( $RGB$ ,  $Yxy$ ,  $L^*a^*b^*$ ,  $L^*u^*v^*$  и т.д.). Эти координаты цвета можно рассчитать на основе спектральных данных (спектра иллюминанта или спектрального распределения коэффициента отражения поверхности и спектра излучения источника света). Обратное неверно: заданному триплету  $XYZ$  соответствует бесконечное количество метамеров. Однако для многих светотехнических задач полезно было бы иметь возможность примерно реконструировать спектр на основе значений координат цвета, так как многие приборы измеряют только координаты цвета. Например, если имеются цифровое изображение поверхности и сведения об источнике света, то реконструкция спектрального распределения коэффициента отражения позволяет рассчитать координаты цвета этой поверхности при освещении её другим источником света. Подобным образом можно было бы рассчитать изменение цвета объекта при различных условиях освещения.

Один из актуальнейших вопросов светотехники связан с заменой окружающих нас источников света на более современные и эффективные. Проблема при этом состоит в том, что замена источника света оказывает сложное влияние на восприятие пространства внутри и вне помещений [1, 1a]. При помощи предлагаемого метода реконструкции можно произвести хорошую оценку изменений цвета реального пространства на основе трёхцветных цифровых изображений и информации о типах материалов и источников света. Подобная реконструкция спектра может использоваться при осуществляемом на основе цифровых изображений расчёте яркости в условиях ночного зрения. Аналогичные, но

более простые, расчёты были проведены в [2, 2a].

Для выявления хорошего способа реконструкции спектральных данных, колориметристы начали исследовать возможность точного или приблизительного описания спектров отражения поверхностей при помощи всего лишь нескольких цифр. Анализ главных компонент (АГК), основанный на методах математической статистики и линейной алгебры, оказался особенно действенным и интересным инструментом.

Применению АГК в колориметрии посвящён целый ряд работ, так что его математическое описание не является предметом этой статьи. Публикация [3] даёт общее представление о том, как этот анализ работает. Для эффективного применения этого метода необходимо наличие большого набора известных спектров. АГК позволяет получить собственные векторы и выявить главные компоненты, относящиеся к набору образцов. Во главе упорядоченного по степени важности списка будут находиться наиболее важные собственные векторы. Подробности можно найти в [4–9].

До настоящего времени некоторые исследователи использовали АГК для получения спектральных распределений всех элементов большого набора образцов при помощи нескольких базовых векторов и их весов. Подобным образом можно при помощи линейной комбинации нескольких наиболее важных собственных векторов с ожидаемой точностью полностью воспроизвести тысячи элементов набора образцов. Согласно результатам предшествующих исследований, использование первых трёх собственных векторов позволяет получить достаточно точные результаты, однако если требуется большая точность, то следует проводить реконструкцию с использованием дополнительных векторов. На рис. 1 представлены результаты использования первых трёх и первых пяти собственных векторов применительно к одному из рассмотренных нами образцов. В [10–12] и в [13] приводится более полная информация о роли собственных векторов, получаемых в результате анализа, и о среднем векторе соответственно.

В вышеупомянутых исследованиях описана реконструкция образцов, имеющих известные измерен-

\* Перевод с англ. Е.И. Розовского

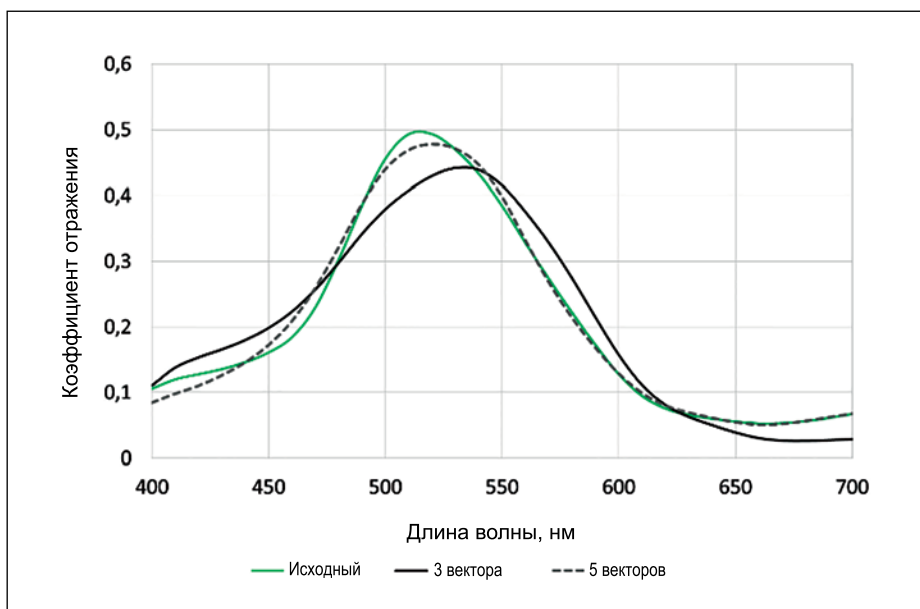


Рис. 1. Спектральные распределения коэффициента отражения: исходное (цветная линия), реконструированное при помощи 3-х векторов (чёрная линия) и реконструированное про помощи 5-ти векторов (пунктирная линия)

ные спектры. Вопрос в том, можно ли, зная только координаты цвета  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ , что-то сказать о спектрах цветных образцов, имеющих неизвестные распределения коэффициента отражения. В ряде исследований, посвящённых этому вопросу [14, 15], реконструкция спектра осуществлялась при помощи алгоритма, в котором использовались операции над псевдообратными матрицами. В других исследованиях использовался АГК. Трёх соответствующих координатам цвета собственных векторов, имеющих наибольшие собственные значения, достаточно для получения в результате реконструкции исходных значений  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  [16, 17]. Более точные спектры можно получить при большем ко-

личестве компонентов, однако при этом система уравнений становится неопределённой, так как если число компонентов будет больше трёх, то координаты цветности можно задать несколькими способами. Из-за этого критичного обстоятельства было решено, что в большинстве случаев будет достаточно трёх векторов.

Точность реконструкции была улучшена посредством разделения системы цветов Манселла, реконструкции поднаборов [18], применения адаптивного алгоритма АГК [19] и использования взвешенного АГК (ВАГК) [16]. Хотя любой вариант АГК позволяет с помощью трёх главных компонентов получить метамер, сходный с выбранным элементом на-

бора образцов, наш опыт показывает, что получаемый при этом реконструированный спектр имеет низкое качество, так как в нём присутствуют лепестки и пики. Более того, излучение иногда оказывается отрицательным, что физически невозможно.

В данной статье показано, что, используя для реконструкции более трёх собственных векторов, можно так выбрать один из нескольких возможных метамеров, что реконструированный спектр будет иметь все качественные особенности реального спектра, то есть в нём не будет отрицательных участков и сильных осцилляций. Кроме того, использование большего числа собственных векторов приводит к увеличению точности реконструкции элементов набора образцов.

Основная особенность нашего метода состоит в том, что для получения наиболее качественного метамера, нелинейная оптимизация должна осуществляться с использованием такого количества компонентов, которое несколько превышает их равное трём минимальное количество, приходящееся на каждую пару координат цветности. К счастью, эти сложные расчёты можно произвести заранее. Сначала следует зафиксировать три первых собственных вектора, полученных при помощи АГК для набора образцов, после чего нужно определить коэффициенты собственных векторов для каждого значения цветности из довольно плотной интерполяционной таблицы и сохранить их. Затем, если мы рассматриваем образец, спектр которого нам неизвестен, то следует, исходя из координат цветности образца, считать из табли-

цы значения коэффициентов собственных векторов. В результате мы можем быстро получить метамер, который согласуется с элементами набора образцов и имеет хорошее качество.

В отличие от предшествующих работ, в рамках этого метода реконструкция основана не на прямом использовании измеренных спектров из обучающего набора (*training set*), а на использовании координат цвета доступных образцов, наиболее значимых собственных векторов и вышеупомянутых коэф-

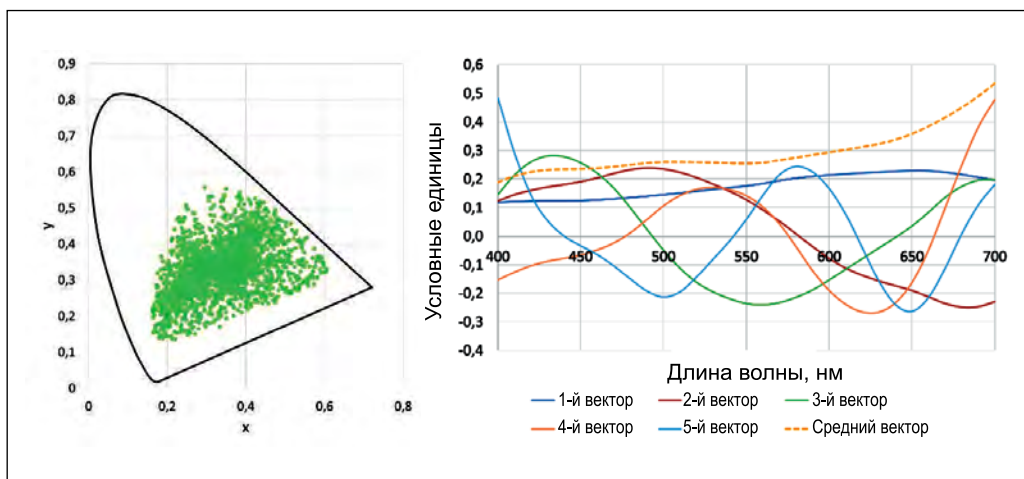


Рис. 2. Распределение образцов тканей на графике цветностей  $x$ ,  $y$  МКО. Средний вектор (пунктирная линия) и первые 5 собственных векторов для этих образцов

фициентов. Образцы из исходного обучающего набора служат только для определения собственных векторов.

И наконец, для простоты мы рассматривали не спектры излучения, а спектральные распределения коэффициентов отражения поверхностей. Поэтому мы исследовали спектры излучения, отражённого от поверхностей при освещении их различными иллюминантами с известными спектральными распределениями энергии. Более того, мы хотели бы знать, что происходит в случае, когда нам неизвестен спектральный состав иллюминанта. Рассматривались следующие иллюминанты МКО:  $E$ ,  $D65$ ,  $D50$ ,  $A$  и  $F11$ , а также белые светодиоды (СД) с люминофорами и трёхполосные белые СД с коррелированной цветовой температурой 5000 и 6504 К. Из-за ограничений на размеры статьи, мы можем продемонстрировать только реконструкцию применительно к иллюминанту  $E$  МКО.

## 2. Математическое описание оптимизации

При проведении расчётов мы работаем со спектрами излучения (спектральными распределениями коэффициентов отражения), имеющими заданное разрешение, вследствие чего вместо непрерывных функций мы используем конечномерные векторы. Пусть  $N$  – количество измерений этих векторов, и если, например, мы рассматриваем спектр в интервале 400–700 нм с шагом 10 нм, то  $N = 31$ .

Обозначим получаемые при помощи АГК и упорядоченные по убыванию собственные значения, как  $\tau_1 \geq \tau_2 \geq \dots \geq \tau_N \geq 0$ , собственные векторы, соответствующие этим собственным значениям, как  $v_1, v_2 \dots v_N$ , а средний вектор, как  $m$ . Линейная комбинация  $M$  собственных векторов и главные компоненты  $c_1, c_2 \dots c_M$  формируют следующий спектр:

$$f(c_1, c_2 \dots c_M) = \sum_{i=1}^M c_i \cdot v_i + m, \quad (1)$$

где  $f(c_1, c_2 \dots c_M)$  –  $M$ -мерный вектор.

При фиксированном значении  $M$  переменные  $c_1, c_2 \dots c_M$  определяют собой спектр, реконструированный в соответствии с уравнением (1). На следующем этапе мы формируем функцию, отражающую различие ме-

жду спектром этого типа и идеальным спектром. Это различие мало в случае неотрицательных гладких метамеров и становится всё более значительным по мере отклонения координат цвета от заданных или если функция сильно осциллирует или становится отрицательной. Соответствующие полученному спектру координаты цвета легко рассчитать при помощи функций сложения цветов:

$$\begin{aligned} X_0 &= \sum_{i=1}^N f_i \cdot S_i \cdot \bar{x}_i, & Y_0 &= \sum_{i=1}^N f_i \cdot S_i \cdot \bar{y}_i, \\ Z_0 &= \sum_{i=1}^N f_i \cdot S_i \cdot \bar{z}_i, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\bar{x}_i, \bar{y}_i, \bar{z}_i$  – дискретные варианты функций сложения цветов, имеющие такое же разрешение, как и спектр,  $S_i$  – дискретное представление спектрального распределения энергии иллюминанта. Очевидно, что значения  $X_0, Y_0$  и  $Z_0$  зависят от коэффициентов  $c_i$ , но для краткости мы на этом останавливаться не будем.

Для демонстрации того, насколько значения  $X_0, Y_0$  и  $Z_0$  отклоняются от заданных значений  $X, Y$  и  $Z$ , можно рассчитать сумму квадратов разностей между этими величинами:

$$\begin{aligned} d_0(c_1, c_2 \dots c_M) &= (X - X_0)^2 + \\ &+ (Y - Y_0)^2 + (Z - Z_0)^2. \end{aligned} \quad (3)$$

Если метамер удовлетворяет требованиям, то  $d_0$  равно нулю. Если  $M = 3$ , то описывающая метамер система уравнений имеет единственное решение. Многие исследования, в которых применялся АГК, останавливались на получении этого решения. Если  $M > 3$ , то возможно бесконечное количество решений, и можно выбрать наиболее реалистичное из них, воспользовавшись для этого ограничениями в части отрицательных значений и сильных осцилляций. Дополнительные сведения можно найти в [20].

Целевая функция, минимум которой считается соответствующим наиболее качественному метамеру, записывается следующим образом:

$$d(c_1, c_2 \dots c_M) = d_0 + P_n + P_v, \quad (4)$$

где  $d_0$  рассчитывается по уравнению (3), а  $P_n$  и  $P_v$  учитывают наличие отрицательных значений и осцилляций соответственно [20]. В общем слу-

чае,  $d$  представляет собой нелинейную функцию  $M$  переменных, минимум которой соответствует наилучшему для наших целей варианту. Другими словами, вектор  $(c_1, c_2 \dots c_M)$ , задающий положение экстремальных значений, представляет собой оптимальную весовую совокупность собственных векторов, которые использовались при реконструкции.

## 3. Метод оптимизации

Для того, чтобы определить минимум функции  $d(c_1, c_2 \dots c_M)$ , описываемой уравнением (4), мы воспользовались нашей собственной программой генетической оптимизации. Генетический алгоритм был выбран потому, что функция  $d$  имеет много локальных минимумов (в основном, по причине наличия учитывающего осцилляции члена), а градиентные методы в этих случаях обычно не позволяют найти абсолютный минимум.

В нашем генетическом алгоритме используются стандартные генетические операторы, например, мутация и вычёркивание, а для ускорения нахождения локальных максимумов в ней используется ступенчатый поиск (*hill-climbing steps*). Мы уже использовали эту программу для решения приближённых к производству задач оптимизации [21].

Программа оптимизации может начать расчёты и с самого начала, ничего не зная о возможном положении максимума в исследуемом пространстве, однако имеется возможность ввести информацию о том, что определённый элемент должен содержаться в рассматриваемой начальной генеральной совокупности. Последняя особенность очень полезна, так как если мы хотим составить результирующие таблицы, то приходится использовать программу поиска оптимальных коэффициентов  $c_i$  для нескольких схожих координат цветности  $(x, y)$ . В некоторых случаях, когда пары  $(x, y)$  близки друг к другу, оптимальные наборы коэффициентов также близки друг к другу.

Некоторые свободные параметры программы оптимизации, такие как вероятность мутаций, размер генеральной совокупности и т.д., были определены на предварительной стадии, на которой было выполнено большое количество пробных расчётов.



Рис. 3. Спектральные распределения коэффициента отражения: исходное (цветная линия), реконструированное при помощи 3-х векторов ( $M = 3$ ) и функции  $d_0$  (чёрная линия) и реконструированное при помощи 5-ти векторов ( $M = 5$ ) и функции  $d$  (пунктирная линия)

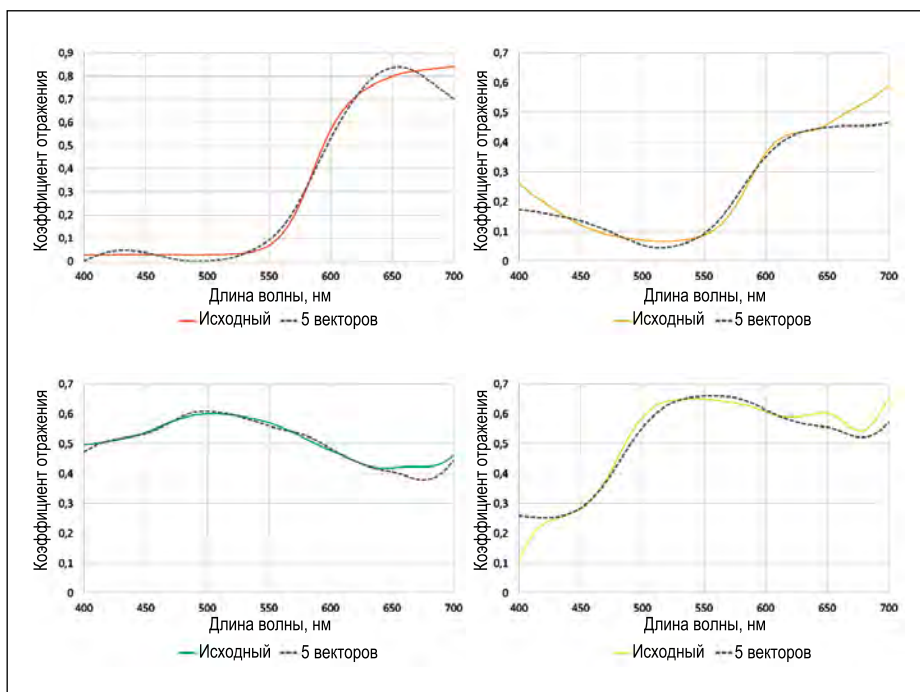
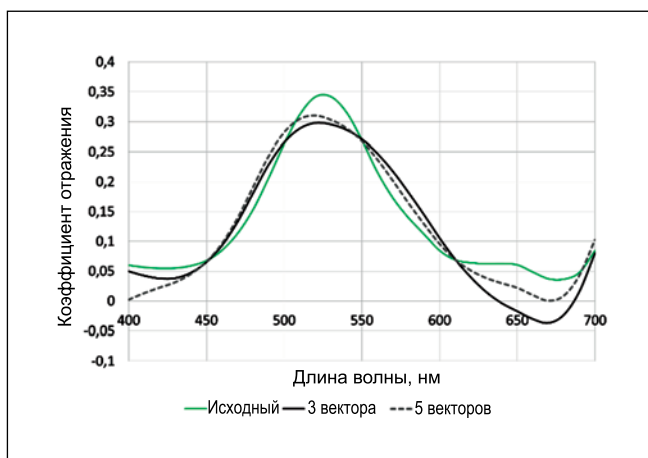


Рис. 4. Реконструкция спектральных распределений коэффициентов отражения четырёх образцов, отобранных из обучающего набора ( $M = 5$ ): исходный спектр – цветная линия, реконструированный спектр – пунктирная линия

#### 4. Исследование образцов тканей

Вначале мы использовали 2832 образца тканей. Коэффициенты отражения образцов задавались в диапазоне 400–700 нм с шагом 10 нм ( $N = 31$ ). Это предполагает 31-мерное пространство, так что собственные векторы были 31-мерными. Эти спектры использовались для формирования собственных векторов АГК  $v_i$ . АГК для совокупности образцов выполнялся при помощи программного обеспечения *Matlab*. На рис. 2 показаны распределение образцов тканей, а также пять собственных векторов и средний вектор  $m$ , который играет очень важную роль.

На следующем этапе упомянутая выше реконструкция была произведена применительно к нескольким выбранным случайным образцам тканей с целью получения идеальных коэффициентов  $c_i$ . Если  $M = 3$ , то мы получаем единственный метамер с хорошей степенью аппроксимации. Это метамер несколько искажён из-за наличия нежелательных членов, однако отклонение полученных в результате значений  $X_0$ ,  $Y_0$  и  $Z_0$  от заданных было меньше чем  $\dots^2$  тысячных. С другой стороны, при увеличении  $M$  стали очевидными преимущества нашего метода: мы получили

<sup>2</sup> Значение в оригинале не приведено. – Прим. пер.

столь же точные метамеры, но функции оказались более гладкими и исчез качественный недостаток, связанный с наличием у первоначальной функции отрицательных значений. Соответствующий пример приведён на рис. 3.

Так как задача является 31-мерной, то идеальной реконструкции нельзя ожидать даже при  $M = 5$ , однако с другой стороны, можно заметить, что использование 5-ти собственных векторов улучшает как количественные, так и качественные характеристики полученного метамера. Согласно предварительным расчётам, после  $M = 5$  дальнейшее увеличение  $M$  приводит к очень медленному улучшению точности и качества, одновременно значительно увеличивая время оптимизации. Поэтому целесообразно использовать именно это значение. На рис. 4 показаны выбранные случайным образом из нескольких десятков вариантов четыре реконструкции цветных образцов, осуществлённые с использованием полученных при помощи АГК наиболее важных собственных векторов и коэффициентов, которые были определены при помощи генетического алгоритма оптимизации. Можно заметить, что отклонения имеют место, в основном, на краях видимой области спектра. Так как на этих участках функции сложения цветов МКО имеют очень малые значения, то упомянутые отклонения влияют намного меньше, чем если бы они имели место внутри видимой области спектра.

Среднее значение показателя точности аппроксимации (*goodness of fit coefficient*), обеспечиваемой новым алгоритмом, составляет 0,9926. Максимальное значение этого показателя равно 0,9996. Эти данные говорят о том, что наш метод, то есть использование пяти собственных векторов и наложение ограничений на спектральные распределения коэффициентов отражения реальных образцов, обеспечивают большую точность реконструкции.

По-видимому, при приближении к насыщенным цветам, которые располагаются около границы графика цветности МКО, полностью неотрицательное решение нельзя получить даже с помощью оптимизации. Причина состоит в том, что у очень насыщенного цвета поверхности отсутствует реальная пара метамеров, или

этот цвет вообще не встречается в реальности, вследствие чего оптимизация способна сформировать только нереальные метамеры.

### 5. Быстрый поиск коэффициентов с помощью справочных таблиц

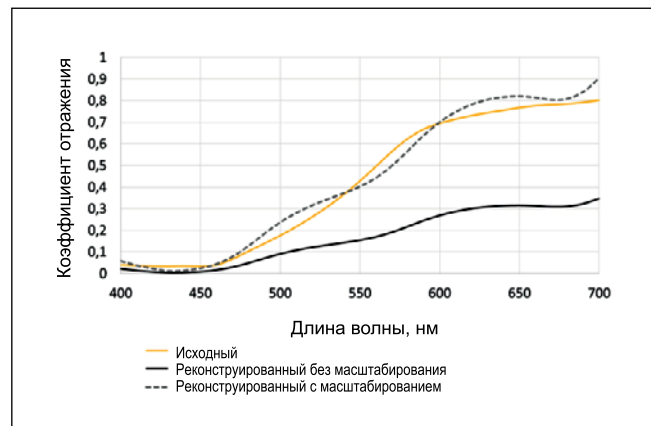
Если известны координаты цвета образца, то можно реконструировать спектр одного из его метамеров, который похож на неизвестный исходный спектр и имеет хорошее качество, обеспечиваемое описанным выше методом. Единственная проблема заключается в том, что необходимая оптимизация занимает очень много времени. При  $M = 5$  оптимизация одной тройки координат цвета на быстродействующем современном персональном компьютере занимает 5–10 мин. На практике это является существенным препятствием, например, если мы хотим провести реконструкцию на основе пикселей цифровой фотографии.

К счастью, АГК заданного набора образцов необходимо произвести только один раз. Если однажды провести оптимизацию применительно к большому количеству образцов и сохранить полученные коэффициенты  $c_i$ , то впоследствии можно на их основе очень быстро реконструировать спектр.

Что касается цифровых фотографий, то применительно к ним мы выбрали координаты цветности  $x$  и  $y$  и светлоту  $Y$ , хотя оптимизация возможна и с использованием других эквивалентных координат. Затем мы рассматриваем гипотетическую фотокамеру, у которой спектральные чувствительности цветовых каналов совпадают с функциями сложения цветов МКО. Такая же точность возможна и в случае реальной фотокамеры, но при этом следует знать её спектральную чувствительность.

Для выполнения поставленной задачи мы накладываем на график цветностей  $x, y$  МКО сетку с равным 0,01 по обеим осям размером ячеек

Рис. 5. Спектральные распределения коэффициента отражения, полученные с масштабированием и без масштабирования: исходное (цветная линия), реконструированное без масштабирования (чёрная линия) и реконструированное с масштабированием (пунктирная линия)



и определяем значения коэффициентов в каждой из точек сетки. Порядок действий при этом следующий. Сначала на основе координат цвета наблюдаемого образца определяются координаты цветности  $x$  и  $y$ :

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}, y = \frac{Y}{X+Y+Z}. \quad (5)$$

Так как информация о светлоте ( $Y$ ) в пространстве  $(x, y)$  отсутствует, то мы используем значение  $Y = 18,42$ , полученное применительно к области, занимаемой реальными цветными образцами в цветовом пространстве  $x, y, Y$ . Это значение  $Y$  аналогично с равным  $L^* = 50$  светлотному фактору в цветовых пространствах  $CIELAB$  и  $CIELUV$ . Это то значение, при котором диаметр области, отображающей реальные цветные образцы (цветовое тело) становится, похоже, наибольшим для этих цветовых

пространств. На следующем этапе мы определяем значения  $X'$  и  $Z'$ , соответствующие  $Y' = 18,42$ :

$$X' = \frac{Y'}{y} \cdot x, Z' = \frac{Y'}{y} \cdot (1 - x - y). \quad (6)$$

Хотя на самом деле мы и не получим коэффициенты  $c_i$ , соответствующие исходным значениям  $X, Y$  и  $Z$ , тем не менее, умножив спектральное распределение коэффициента отражения, которое было получено в результате линейной комбинации, проведённой с использованием этих коэффициентов  $c_i$ , на  $Y'/Y$ , мы с хорошей степенью аппроксимации получим спектр, соответствующий исходным значениям координат цвета  $X, Y$  и  $Z$ . На рис. 5 показаны немасштабированный спектр, соответствующий координатам цвета  $X', Y'$  и  $Z'$ , и масштабированный спектр, соответствующий исходным координатам цвета  $X, Y$  и  $Z$ .

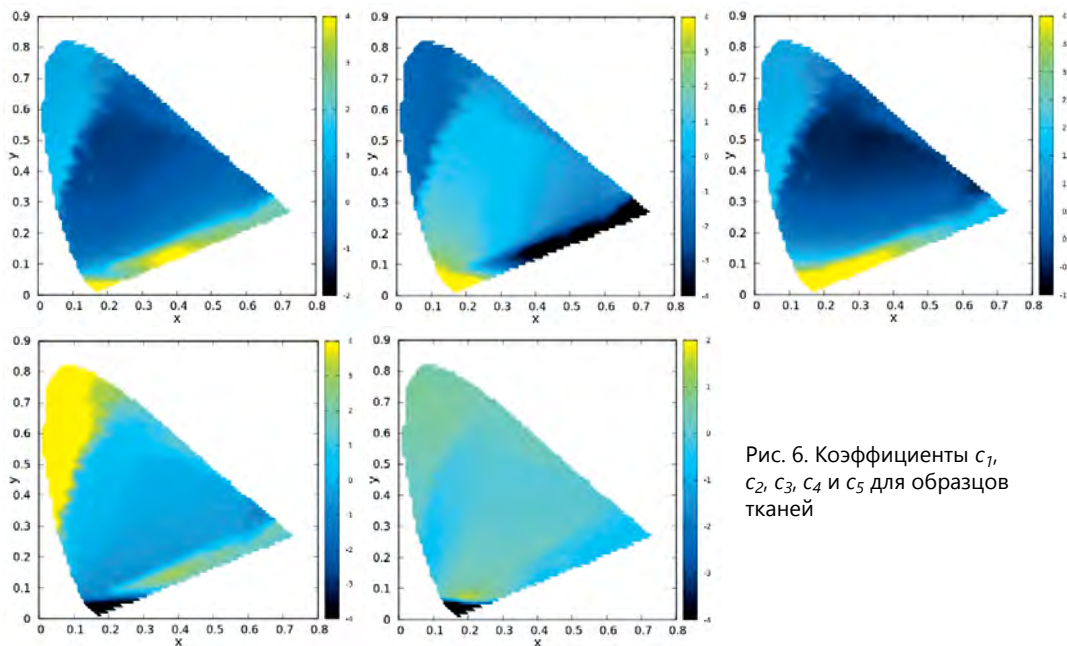


Рис. 6. Коэффициенты  $c_1, c_2, c_3, c_4$  и  $c_5$  для образцов тканей

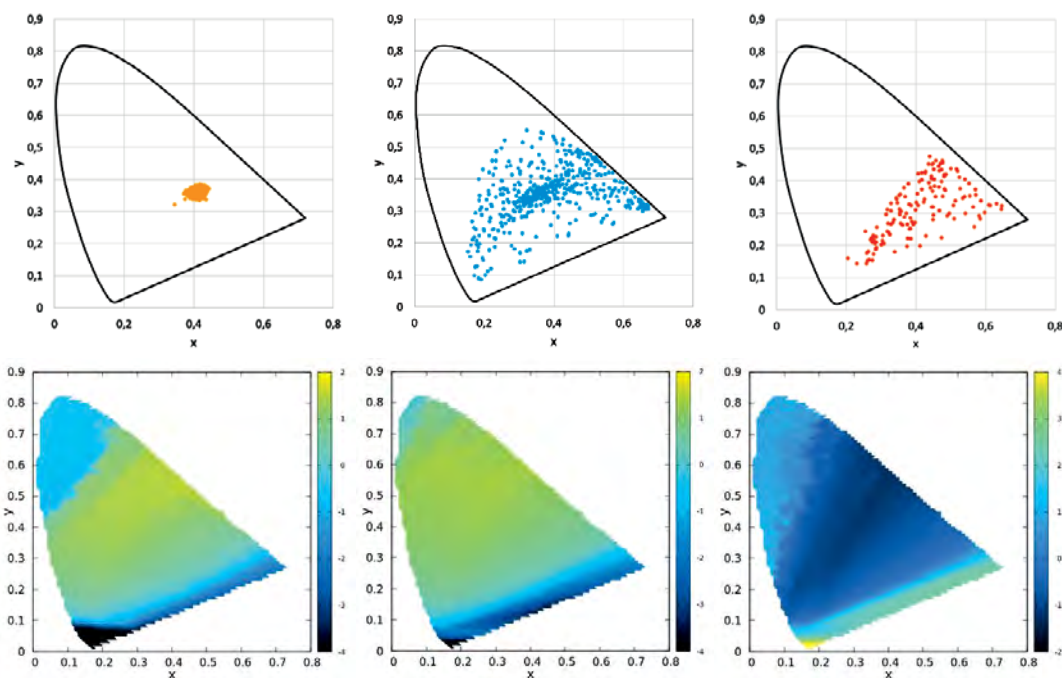


Рис. 7. Распределения образцов кожи, красок и цветков на графике цветностей  $x, y$  МКО и соответствующие им коэффициенты  $c_i$

ной интерполяции соседних значений.

Формирование справочных таблиц осуществляется в два этапа. Вначале, после расчётов, выполняемых в пределах всего поискового пространства с выбранной случайным образом начальной генеральной совокупностью (*population*), производится оптимизация. Полученные в результате справочные таблицы используются на втором этапе оптимизации. В этом случае исходная генеральная совокупность содержит коэффициенты, соответствующие соседним элементам таблиц, сформированным на первом этапе. Этот этап уменьшает вероятность сохра-

нения результата, соответствующего локальному минимуму, так как предполагается, что оптимальные коэффициенты, соответствующие расположенным рядом друг с другом точкам, практически совпадают.

На рис. 6 приведены обозначенные разными цветами коэффициенты  $c_i$  для образцов тканей. Можно заметить, что положения коэффициентов на графике цветностей  $x, y$  МКО несколько осциллируют. Осцилляции составляют примерно 1–2%, и их влиянием на реконструированный спектр можно пренебречь.

## 6. Что нужно для реализации метода

Для быстрого получения конечных результатов следует хранить следующие данные:

- средний вектор, определённый при помощи АГК, и первые  $M$  векторов. А это  $(M + 1) \cdot N = 6 \cdot 31 = 186$  значений с плавающей запятой;
- $M$  таблиц размером  $75 \times 85$  с разрешением 0,01. А это  $M \cdot 75 \cdot 85 = 5 \cdot 75 \cdot 85 = 31875$  значений с плавающей запятой.

Даже если мы храним данные с двумя знаками после запятой, то это означает 256 кБайт данных, что очень мало по сравнению с объёмами памяти современных компьютеров, даже переносных.

### Средние значения $\Delta E_{ab}^*$ , среднеквадратичного отклонения и показателя точности аппроксимации для спектров, полученных с масштабированием на основе значений $(x, y)$

$\Delta E_{ab}^*$ , излучатель А МКО	0,0110
$\Delta E_{ab}^*$ , излучатель Е МКО	2,1072
$\Delta E_{ab}^*$ , излучатель D65 МКО	0,5059
Среднеквадратичное отклонение	0,0414
Показатель точности аппроксимации	0,9922

Этим способом мы получили спектры дюжины образцов, используя при этом только координаты цветности  $x$  и  $y$  этих образцов и определённое заранее значение  $Y$ . Усреднённые по реконструированным спектрам значения  $\Delta E_{ab}^*$ , среднеквадратичного отклонения и показателя точности аппроксимации приведены в табл. 1.

С использованием масштабирования были получены хорошие результаты, аналогичные полученным ранее и намного лучшие, чем результаты, которые были получены с использованием классического АГК или ВАГК, и это относится ко всем параметрам (табл. 2).

Коэффициенты, соответствующие заданным точкам пространства  $(x, y)$ , сохраняются в справочных таблицах, причём для хранения всех данных тре-

буются пять блоков размером  $75 \times 85$  (в соответствии с размером цветового пространства  $(x, y)$  МКО). Реконструкцию можно производить при помощи этих таблиц, пяти первых собственных векторов АГК, среднего вектора и значений  $X, Y$  и  $Z$  цветного образца или пикселя, спектр которого неизвестен.

Теперь коэффициенты  $c_i$ , принадлежащие парам  $x, y$ , можно считать из этих сформированных таблиц. Эти коэффициенты следует подставить в уравнение (1), после чего полученный в результате спектр надо масштабировать описанным выше образом.

Если нужная пара  $x, y$  не соответствует ни одной ячейке справочной таблицы, то искомые коэффициенты можно получить при помощи линей-

Таблица 1



Величины, описывающие точность реконструкции спектра на основе данных, представленных в [16] для прочих образцов тканей при освещении их стандартным излучателем D65 МКО\*

	Новый алгоритм		АГК [16]		вАГК [16]	
	Средн.	Макс.	Средн.	Макс.	Средн.	Макс.
$\Delta E_{ab}^*$ , излучатель A МКО	1,3674	3,0269	3,200	9,740	1,820	5,040
$\Delta E_{ab}^*$ , излучатель E МКО	0,0100	0,0230	Нет данных	Нет данных	Нет данных	Нет данных
$\Delta E_{ab}^*$ , излучатель D65 МКО	0,3926	0,8852	Нет данных	Нет данных	Нет данных	Нет данных
Среднеквадратичное отклонение	0,0300	0,0412	0,073	Нет данных	0,059	Нет данных

\* Согласно таблице, в [16] приведены данные не для излучателя D65, а для излучателя A. – Прим. пер.

Объём требуемых расчётов также невелик. Мы можем получить  $x$  и  $y$  из значений  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  посредством менее чем 10-ти операций. Требуемые значения  $c_i$  можно получить при помощи интерполяции содержащихся в таблицах данных, что при  $M = 5$  означает менее чем 100 операций. Зная  $c_i$ , можно решить уравнение (1), затратив на это  $M \cdot N \cdot 2 + N = 341$  операцию, так что на реконструкцию на основе координат цвета потребуется менее чем 1000 операций.

Так что важной особенностью этого метода является то, что после проведения АГК и составления справочных таблиц, реконструкция спектра требует очень небольшого объёма памяти и занимает мало времени. Потребность в ресурсах останется реальной, даже если для достижения большей точности увеличить значения  $M$  и  $N$ .

## 7. Использование других наборов цветных образцов

Возникает вопрос, а какими будут коэффициенты и реконструированный спектр, если вместо образцов тканей использовать другие образцы. Предполагается, что при использовании других обучающих наборов тем же самым значениям  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  будут соответствовать другие спектры. Мы провели анализ применительно к 168-ми образцам цветков, 565-ти образцам красок и 9533-ём образцам кожи человека (рис. 7) и сформировали справочные таблицы. Для того, чтобы размеры статьи оставались в разумных пределах, на рис. 7 показано только распределение коэффициентов  $c_i$ . У разных наборов образцов они явно разные.

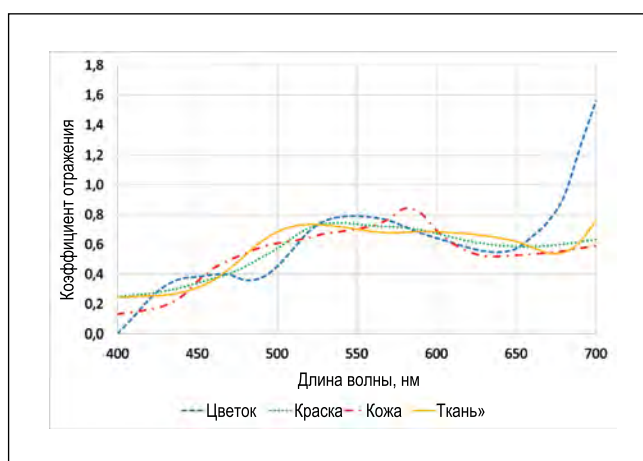


Рис. 8. Спектры, реконструированные применительно к заданным координатам цвета с использованием разных обучающих наборов<sup>3</sup>

Второй вопрос состоит в том, как обусловленные использованием разных наборов данных изменения собственных векторов и коэффициентов  $c_i$  влияют на реконструированный спектр. Другими словами, если заданы координаты цветности  $x$  и  $y$  и соответствующие этим координатам цветности спектры были получены с использованием четырех наборов образцов и масштабирования, то насколько реконструированные спектры отличаются друг от друга? Соответствующий пример приведен на рис. 8, где показан реконструированный спектр для  $x = 0,37$ ,  $y = 0,41$ .

На рис. 8 видно, что заданным значениям координат цвета соответствуют разные спектры, которые зависят от использовавшегося обучающего набора. Реконструированные спектры образцов тканей демонстрируют меньшие осцилляции, чем спектры образцов красок и цветков, что определяется их особенностями. Дополнительные сведения можно найти в [22].

В целом, мы можем реконструировать спектр на основе координат

цветности цветного образца с неизвестным спектром и определить его особенности, если неизвестными образцами были кожа, краска или цветок. Конечно, этот метод можно сделать более точным, если увеличить количество наборов данных или увеличить количество образцов, входящих в существующие наборы.

## 8. Выводы

Основной целью этого исследования являлось выявление возможности такого определения спектра метамера для цветного образца с неизвестным спектром, чтобы полученные результаты были максимально

<sup>3</sup> Авторы везде используют термин «reflectance», то есть «коэффициент отражения», который не должен быть больше единицы, однако на рис. 8 спектральное распределение коэффициента отражения, реконструированное с использованием набора образцов цветков, при больших длинах волн превышает 1, что никак не комментируется. – Прим. пер.

близок к реальному спектру и имел хорошее качество. Поэтому применительно к заданному иллюминанту мы использовали пять, а не три собственных векторов АГК и воспользовались генетическим алгоритмом для получения на основе этих векторов коэффициентов, описывающих наименее осциллирующие и по возможности неотрицательные метамеры. Наш метод позволяет получить соответствующие сетке на графике цветности  $x, y$  МКО коэффициенты, которые необходимы для получения в дальнейшем спектров различных цветных образцов. Результаты могут храниться в имеющей малый объём памяти компьютера, и для их использования требуется произвести очень мало расчётов. Очевидно, что наш метод обеспечивает возможность определить спектр в тех случаях, когда не хватает данных для реализации других способов оптимизации. При наличии некоторой информации о содержании картинки этот метод позволяет произвести примерную реконструкцию спектров даже при помощи переносных компьютеров. Результаты расчётов показывают, что этот метод реконструкции спектров применим к разным иллюминантам [20].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Habel, J., Žák, P.* The present and future of lighting engineering, *Light & Engineering*// –2012.– Vol. 20, No. 2.– P. 5–11.
- 1а. *Жак, П., Хабел, Й.* Настоящее и будущее светотехники// *Светотехника.* – 2012.– № 2.– С. 74–77.
2. *Horváth, A., Dömötör, G.* Computational Simulation of Mesopic Vision Based on Camera Recordings// *Light & Engineering.* – 2014.– Vol. 22, No.1.– P. 61–67.
- 2а. *Дёмётёр Г., Хорват А.* Компьютерное моделирование сумеречного зрения на основе видеозаписей// *Светотехника.* – 2014.– № 4.– С. 33–38.
3. *Tzeng, D.Y., Berns, R.S.* A Review of Principal Component Analysis and Its Application to Color Technology// *Color Research and Application.* – 2005.– Vol. 30, No. .– P. 84–98.
4. *Maloney, L. T.* Evaluation of linear models of surface spectral reflectance with small numbers of parameters// *Journal of Optical Society of America.* – 1986. Vol. 3.– P. 1673–1683.
5. *Jaaskelainen, T., Parkkinen, J., Toyooka, S.* Vector-subspace model for color representation// *Journal of Optical Society of America.* – 1990.– Vol. 7.– P. 725–730.
6. *Vrhel, M.J., Gershon, R., Iwan, L.S.* Measurement and analysis of object reflectance spectra// *Color Research and Application.* – 1994.– Vol. 19.– P. 4–9.
7. *García-Beltrán, A., Nieves, J.L., Hernández-Andrés, J., Romero, J.* Linear bases for spectral reflectance functions of acrylic paints// *Color Research and Application.* – 1998.– Vol. 23.– P. 39–45.
8. *Tajima, J.* A huge spectral characteristics database and its application to color imaging device design// *Proc. of the 6<sup>th</sup> IS&T/SID Color Imaging Conference, IS&T, Springfield, VA, 1998.* – P. 86–89.
9. *Hardeberg, J.Y., Schmitt, F., Brettel, H.* Multispectral color image capture using a liquid crystal tunable filter// *Opt. Engineering.* – 2002.– Vol. 41.– P. 2533–2548.
10. *Maloney, L.T., Wandell, B.A.* Color constancy: a method for recovering surface spectral reflectance// *Journal of Optical Society of America.* – 1986.– Vol. 3.– P. 29–33.
11. *D’Zmura, M.* Color constancy: surface color from changing illumination// *Journal of Optical Society of America.* – 1992.– Vol. 9.– P. 490–493.
12. *Dannemiller, J.L.* Spectral reflectance of natural objects: how many basis functions are necessary?// *Journal of Optical Society of America.* – 1992.– Vol. 9, No. 4.– P. 507–515.
13. *Worthey, J.A., Brill, M.H.* Principal Components Applied to Modeling: Dealing with the Mean Vector// *Color Research and Application.* – 2004.– Vol. 29, No. 4.– P. 261–266.
14. *Zhao, Y., Berns, R.S.* Image based spectral reflectance reconstruction using Matrix R method// *Color Research and Application.* – 2007.– Vol. 32.– P. 343–351.
15. *Babaei, V., Amirshahi, S.H., Agahian, F.* Using weighted pseudo-inverse method for reconstruction of reflectance spectra and analyzing the dataset in terms of normality// *Color Research and Application.* – 2011.– Vol. 36.– P. 295–305.
16. *Farnaz, A., Seyed, A.A., Seyed, H.A.* Reconstruction of reflectance spectra using weighted principal component analysis// *Color Research and Application.* – 2008.– Vol. 33, No. 5.– P. 360–371.
17. *Simone, B.* Reflectance spectra recovery from tristimulus values by adaptive estimation with metametric shape correction// *Journal of Optical Society of America.* – 2010.– Vol. 27, No. 8.– P. 1868–1877.
18. *Zhang, X., Xu, H.* Reconstructing spectral reflectance by dividing spectral space and extending the principal components in principal component analysis// *Journal of Optical Society of America.* – 2008.– Vol. 25.– P. 371–378.
19. *Mansouri, A., Sliwa, T., Hardeberg, J.Y., Voisin, Y.* An adaptive-pca algorithm for reflectance estimation from color images// *Proc. of the 19<sup>th</sup> IEEE International Conference on Pattern Recognition, 2008.* – P. 1–4.
20. *Sávöli, Zs., Kránicz, B., Horváth, A.* Spectral reconstruction in case of different illuminants// *Annals of Faculty Engineering Hunedoara – Int. Journal of Engineering, University Politehnica Timisoara, 2016, Vol. 14.1.* – P. 45–54.
21. *Horváth, A., Horváth, Z.* Optimal shape design of Diesel intake ports with evolutionary algorithm. M Feistauer (szerk.) *Numerical Mathematics and Advanced Applications, ENUMATH 2003*
22. *Sávöli, Zs., Horváth, A., Kránicz, B.* Spectral reconstruction with genetic optimization in case of different sample sets// *Acta Technica Jaurinensis, Széchenyi István University, Győr.* – 2016.– Vol. 9, No. 1.– P. 54–64.



**Балаш Кранич (Balázs Kránicz),**  
Ph.D. Соавтор многочисленных научных публикаций, имеет патенты в области колориметрии. Преподавал в Университете Паннонии, Веспрем, Венгрия



**Жолт Саволи (Zsolt Sávöli).**  
Окончил Сегедский университет им. Аттилы Йожефа, Венгрия. Аспирант Университета им. Иштвана Сечени (колориметрия)



**Андраш Хорват (András Horváth).**  
Ph. D. (1999 г.). Окончил Университет им. Лоранда Этвёша (Будапешт, Венгрия) по специальности «Физика» (1992 г.). Доцент физико-химического факультета Университет им. Иштвана Сечени