

МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНАЯ ФОТОРЕГИСТРАЦИЯ КЛАРИФИКАЦИОННОГО ЭФФЕКТА ПРИ RGB-СВЕТОДИОДНОМ ОСВЕЩЕНИИ

Арапов С.Ю., Дубинин И.С., Арапова С.П., Москвичёв С.А.
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
пр. Мира, 32, Екатеринбург, Свердловская обл., 620002, Россия,
тел.: (343) 375-46-30, e-mail: arapov66@yandex.ru

Аннотация — эффект кларификации заключается в увеличении визуально-воспринимаемой насыщенности цветов отражающих объектов при специальном освещении. Регистрация данного эффекта принципиально недоступна для подавляющего большинства фото-видео аппаратуры из-за существенного различия строения функций сопоставления цвета электронных фотосенсоров и зрительной системы человека. В работе приводятся решение данной задачи с помощью мультиспектральной фотосъёмки. Проведено визуальное сравнение оригинала со снимками, полученными по мультиспектральной и стандартной технологиям с колориметрической коррекцией по освещению. Результаты работы позволяют рекомендовать мультиспектральный метод для точной регистрации и репродуцирования визуально-воспринимаемых эффектов.

MULTISPECTRAL PHOTOGRAPHIC RECORDING OF CLARIFICATION EFFECT IN RGB-LED LIGHTING¹

Arapov S.Yu., Dubinin, I.S., Arapova S.P., Moskvichev S.A.
Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin
pr. Mira, 32, Yekaterinburg, Sverdlovsk region, 620002, Russian Federation
ph.: (343) 375-46-30, e-mail: arapov66@yandex.ru

Abstract — the effect of the clarification is to increase a visually perceived color saturation of the reflective objects in special light conditions. Registration of this effect is fundamentally inaccessible to the vast majority of photo and video equipment due to the significant differences of the structure of the color matching functions of the electronic photo-sensors and the human visual system. The paper presents the solution to this problem using multispectral photography. The visual comparison of the original with images obtained by multispectral and standard technology with colorimetric correction coverage. The results allow us to recommend multi-spectral method for accurate recording and reproduction of visually perceived effects.

I. Введение

Началом обсуждения эффекта кларификации (увеличения насыщенности цветов отражающих объектов), скорее всего следует считать работу Тронтона [1], где обсуждались источники трихроматического искусственного освещения. В ней делается вывод о том, что трёхполосный осветитель длинами волн около 450, 540 и 610 нм является оптимальным решением, позволяющим получить наилучшее соотношение затрат энергии и визуально-воспринимаемой яркости. При этом цветопередача элементов наблюдаемой сцены остаётся корректной. Нежелательным признаётся использование в излучателях полосы около 500 нм из-за кларификации, квалифицирующейся как вредное явление, приводящее к ошибкам цветового восприятия. «Трёхполосные» люминесцентные лампы с преобладанием излучения 450, 540 и 610 нм в настоящее время широко распространены. Им соответствуют стандартные осветители F10–F12 Международной комиссии по освещению (МКО). Эффект кларификации упоминается также Хантом в п. 10.13 монографии [2].

Массовое производство и распространение светоизлучающих диодов (СИД) дало возможность рассмотреть эффект кларификации (ЭК) с другой стороны — как полезное явление, которым можно управлять. У большинства RGB СИД, из соображений расширения цветового охвата, максимумы излучения приходятся на 450, 510 и 630 нм, что неизбежно приводит к возникновению ЭК. Причины этого явления обсуждались в [3, 4]. В работах [5–7] рассматривались вопросы связанные с управлением величиной ЭК. В [8] рассмотрено

практическое применение ЭК в медицинских диагностических целях, в сочетании с методами мультиспектральной съёмки (МСС). Следует отметить, что, хотя во всех упомянутых работах идёт речь об одном и том же эффекте, в современных [5, 7, 8] сам термин «кларификация» не упоминается. Вероятно, сопутствующая терминология, стабилизируется позднее, по мере расширения научного интереса к ЭК.

В процессе экспериментов [3, 4, 6] было обнаружено, что даже очень заметный ЭК практически

не регистрируется цифровыми фотокамерами (ЦФК). Целью данной работы является объяснение причин невозможности обычной цифровой фоторегистрации эффекта кларификации и решение этой задачи с помощью мультиспектральной съёмки.

II. Проблема корректной фоторегистрации кларификационного эффекта

Причина незаметности ЭК на фотоснимках, сделанных стандартной ЦФК, становится очевидной из анализа функций сопоставления цвета (ФСЦ) камеры и человека. На рис. 1 представлены ФСЦ стандартного наблюдателя (МКО 1931), ФСЦ ЦФК пех 5N (Sony) и спектр вызывающего ЭК освещения из работы [6]. Поскольку спектр освещения (1 на рис. 1, в) состоит из трёх узкополосных спектров СИД, спектры стимулов отражающих предметов будут выглядеть аналогично, но в зависимости от окраски различаться соотношением высоты трёх пиков R, G, B.

Степень насыщенности стимула определяется соотношением между интегральными сигналами от сенсоров (отрезки S_r и S_g на рис 1, а, 1, б). Например, насыщенный красный цвет подразумевает высокий уровень сигнала в красном канале при минимальных уровнях в зелёном и синем. Очевидно, что спектры типа 1 на рис. 1, в будут восприниматься очень насыщенными при существенном доминировании одного из пиков.

При спектральном расширении реакции камеры (рис. 1, б) и стандартного наблюдателя (рис. 1, а), будут отличаться ввиду различий в структуре ФСЦ. В первую очередь это касается зелёных и красных стимулов. У стандартного наблюдателя насыщенность будет снижаться, ввиду существенного роста уровня сигнала в соседнем канале. Это явление известно как «нежелательное стимулирование колбочковых рецепторов» [2] (п.2.5).

У камеры максимумы ФСЦ r и g разнесены на большее расстояние и их перекрытие менее значительно, поэтому расширение не приводит к такому существенному снижению насыщенности. Структура подобная рис. 1, б характерна для большинства современных ЦФК, поэтому они «видят мир насыщенным» практически при любом спектре освещения и освещение по типу рис. 1, в не приводит к дополнительному увеличению насыщенности.

Из рис. 1, а следует, что для стандартного наблюдателя из-за перекрытия кривых \bar{x} и \bar{y} возможна только «красно-зелёная» кларификация. Этот вывод подтверждается в экспериментах [3–5, 7]. В то же время для камеры пех 5N (рис. 1, б) при определённом освещении может возникать «жёлто-синяя» кларификация.

Получение от ЦФК цветовых реакций на стимулы эквивалентных человеческому восприятию можно лишь тогда, когда ФСЦ ЦФК или их линейная комбинация повторяют ФСЦ зрительной системы человека (условие Лютера-Айвса [2], п.7.4.1). ФСЦ рис. 1, б не удовлетворяют этому условию. Вопросы оценки погрешностей измерения цвета для колориметров с различными ФСЦ рассматриваются в [9].

Решение описанной проблемы возможно с помощью методов МСС. Например, при использовании мультиспектральной системы описанной в работе [10], с помощью линейной комбинации ФСЦ для 11-и сенсоров можно получить достаточно точную аппроксимацию ФСЦ \bar{x} , \bar{y} , \bar{z} (рис. 2).

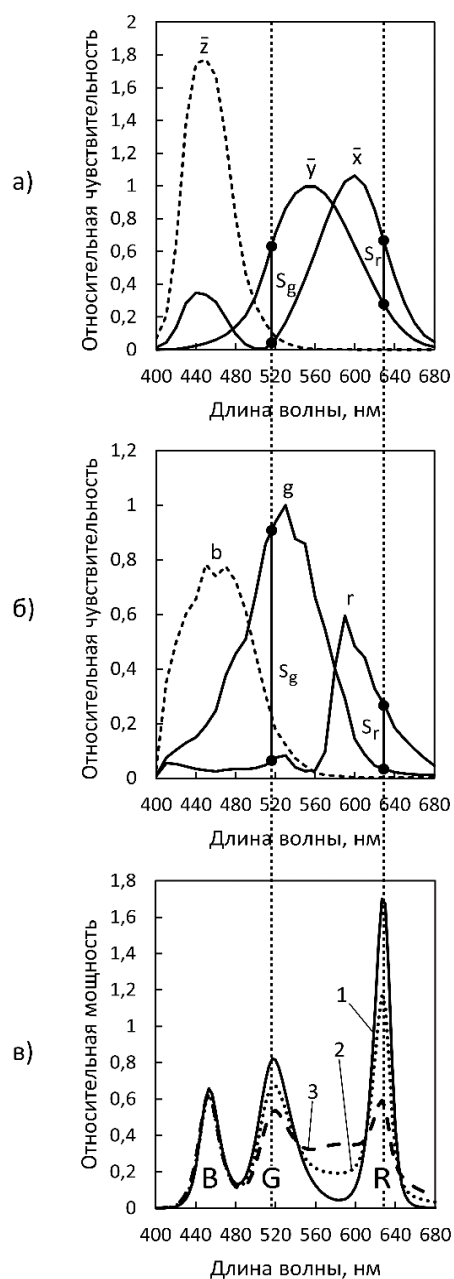


Рис. 1 Возникновение эффекта кларификации:

а) ФСЦ стандартного наблюдателя \bar{x} , \bar{y} , \bar{z} (МКО 1931); б) ФСЦ камеры пех 5N (Sony); в) спектры освещения, 1 — $R_a = 35$, 2 — $R_a = 67$, 3 — $R_a = 96$, R, G, B — пики на спектре, формируемые соответствующими СИД. Отрезки S_r и S_g показывают «уровень насыщенности» для монохроматического стимула единичной мощности.

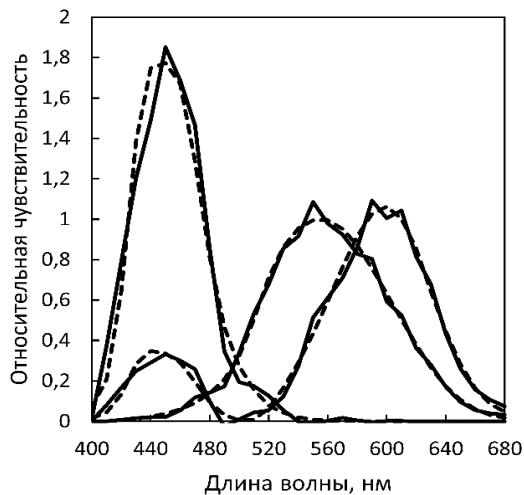


Рис. 2 Аппроксимация ФСЦ \bar{x} , \bar{y} , \bar{z} стандартного наблюдателя (МКО 1931, показаны на графике пунктиром) с помощью набора сенсоров мультиспектральной системы:

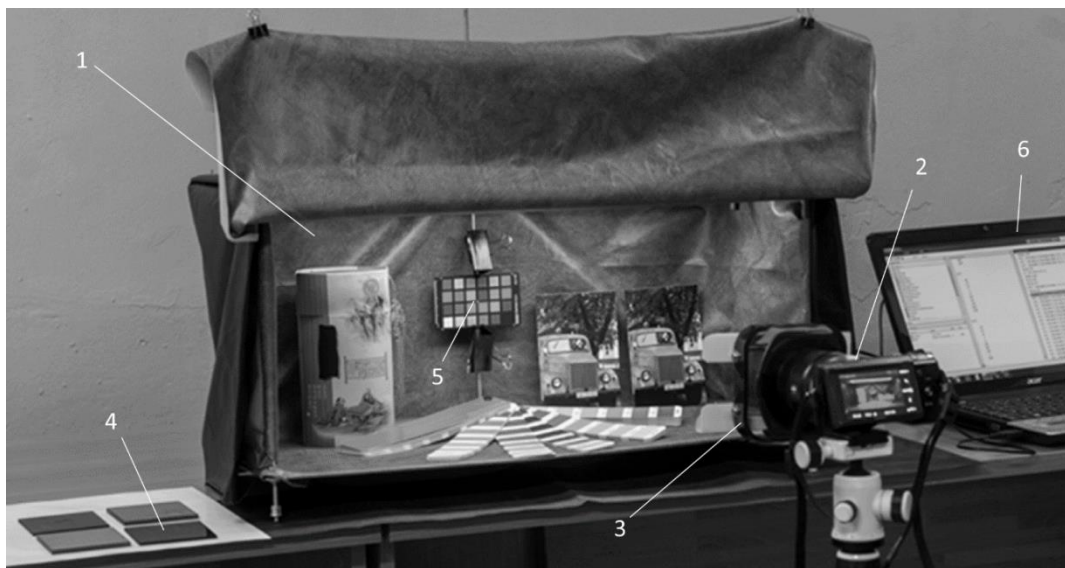


Рис. 3 Схема съёмочного процесса
1 — осветительный бокс, 2 — цифровая фотокамера, 3 — держатель для фильтров, 4 — светофильтры, 5 — стандартная шкала ColorChecker, состоящая из 24 полей, 6 — управляющий компьютер. В осветительный бокс помещены предметы для наблюдения эффекта кларификации

III. Описание эксперимента

В эксперименте использовался типовой для подобного рода исследований набор устройств, предметов и материалов — осветительный бокс, ЦФК, набор светофильтров, состоящая из 24 полей стандартная шкала ColorChecker (CCh), спектрофотометр, управляющий компьютер, различные предметы для наблюдения ЭК. Расположение перечисленных элементов экспериментальной системы представлено на рис. 3.

Осветительный бокс (ОБ) подробно описан в работе [6]. Излучающие элементы бокса — СИД RGBW. Регулировка яркости СИД каждого цвета производится широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) электропитания. Управление спектральным составом освещения внутри бокса автоматизировано. Управляющая программа позволяет задавать уровень яркости освещения, его коррелированную цветовую температуру $T_{кц}$ и индекс цветопередачи R_a (степень проявления ЭК). Характерный вид спектров освещения в ОБ приведён на рис. 1, в.

Система МСС в данном эксперименте аналогична использованной в работе [10] с двумя изменениями — осветитель с равномерным спектром заменён на ОБ и вместо пех-5N использована ЦФК пех-7 (Sony). Набор светофильтров и комбинации светофильтров с каналами матрицы ЦФК, отобранные для синтеза мультиспектрального изображения (МСИ), остались неизменными. Камера пех-7, по сравнению с пех-5N, выигрывает по разрешению сенсора и уровню шумов.

Спектры освещённости и коэффициента отражения полей шкалы CCh измерялись спектрофотометром i1Pro (X-Rite) в комплексе с открытым программным обеспечением Argyll CMS.

Эксперимент заключался в проведении МСС предметов и шкалы CCh, расположенных ОБ, при различных настройках освещения. Технологическая схема проведения эксперимента представлена на рис. 4.

При настройке освещения оставались неизменными освещённость и $T_{кц} = 5000K$. Уровень ЭК (R_a) принимал одно из значений: «низкий» уровень ЭК ($R_a = 96$), «средний» уровень ЭК

($R_a = 67$), «высокий» уровень ЭК ($R_a = 35$). Для каждого варианта настройки производился замер спектра освещения в ОБ.

После определения спектров освещения в ОБ помещались предметы, шкала CCh, и проводилась МСС для каждого из перечисленных уровней ЭК. В каждом случае, кроме съёмки через сменяемые фильтры, делался дополнительный снимок без фильтра. Управление камерой осуществлялось в ручном режиме.

Все спектральные измерения и сама МСС проводилась в затемнённом помещении для исключения внешнего светового фона.

Каждый полученный RAW-файл с использованием открытого программного пакета LibRAW конвертировался в четыре файла формата TIFF, соответствующим Байеровским группам пикселей R, G1, G2, B. Из полученных файлов отбирались необходимые комбинации и после совмещения по

контрастным элементам объединялись в мультиспектральное изображение для дальнейшей обработки.

IV. Методы обработки полученных снимков

Поскольку цель данной работы — колориметрически корректная регистрация ЭК, результатом обработки данных МСС стало изображение, содержащее в пикселях значения координат цвета X, Y, Z . Такое изображение может быть легко преобразовано в стандартное пространство RGB с широким цветовым охватом (например, Pro Photo). Изображение, закодированное в стандартном цветовом пространстве, удобно для хранения и воспроизведения различными устройствами.

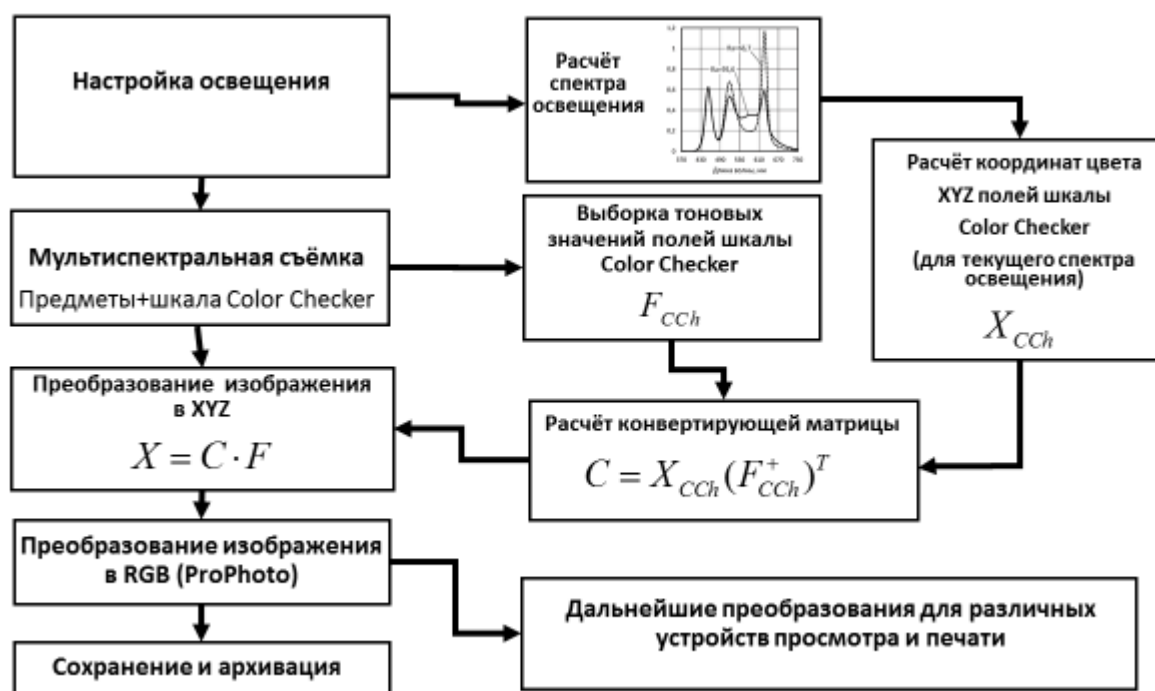


Рис. 4 Технология обработки результатов мультиспектральной съёмки (МСС)

Очевидный способ преобразования пикселей мультиспектрального изображения в координаты цвета X, Y, Z заключается в построении аппроксимации ФСЦ стандартного наблюдателя набором сенсоров мультиспектральной системы (рис. 2), однако этот подход предъявляет высокие требования к точности ФСЦ используемой ЦФК и фильтров. В данной работе опробован алгоритм обработки, не требующий знания спектральных характеристик ЦФК.

Первый шаг алгоритма — расчёт цветовых координат X, Y, Z полей шкалы CCh для каждого включённого в эксперимент спектра освещения. Расчёт X, Y, Z производится в варианте «относительной колориметрии». Полученные значения объединяются в матрицу $X_{CCh} (24 \times 3)$.

Второй шаг алгоритма — извлечение из мультиспектрального изображения усреднённых тоновых значений из пикселей, относящихся к полям шкалы CCh. Усреднение в данной работе делается по зонам размером 10×10 пикселей

располагающимся в центрах полей. При высоких значениях световых потоков, характерных для широкополосных светофильтров распределение тоновых значений в отдельных пикселях хорошо описывается нормальным законом. В этом случае погрешность среднеарифметической оценки обратно пропорциональна квадратному корню из количества пикселей. Таким образом среднее по зоне из 100 пикселей даёт в 10 раз более точную оценку тоновых значений чем один пиксель. Полученные значения объединяются в матрицу T_{CCh} . Данная матрица составлялась в двух вариантах — для 11-и каналов мультиспектрального изображения (24×11) и для трёх стандартных каналов (24×3) сенсора ЦФК.

Третий шаг алгоритма — построение конвертирующей матрицы соответствующей линейному оператору отображения тоновых значений мультиспектрального изображения в координаты цвета X, Y, Z . Это несложно сделать, если предъявить к нему требование максимально точного воспроизведения цветов полей шкалы CCh:

$$C = (T_{CCh}^+ X_{CCh})^T, \quad (1)$$

где C — конвертирующая матрица, $(...)^+$ — операция псевдообращения матрицы (Мура-Пенроуза).

Четвёртый шаг алгоритма — конвертирование всего изображения. Для каждого пикселя выполняется преобразование:

$$X = CT, \quad (2)$$

где X — вектор-столбец цветовых координат пикселя, T — вектор-столбец тоновых значений пикселя. Полученное таким образом XYZ-изображение удобно использовать в качестве исходного материала для анализа цветовых различий как у отдельных элементов, так и между снимками.

Пятый шаг алгоритма — преобразование XYZ-изображения в стандартное цветовое пространство RGB, удобное для дальнейшей обработки и визуализации стандартными средствами. С целью максимального сохранения цветовой информации в данной работе использовался icc-профиль ProPhoto, тоновые значения в каналах сохранялись в 16-и битной кодировке.

V. Результаты

Как следует из второго раздела данной работы, проявление должно ЭК происходить преимущественно в красно-зелёном оппонентном направлении цветового восприятия. В экспериментах [4, 5, 7, 8] зафиксирован именно такой эффект. Это определило выбор объектов для МСС при различном уровне ЭК. Фрукты, овощи и в особенности мясные продукты показали значительное увеличение насыщенности красных оттенков. Степень проявления эффекта можно легко регулировать [6]. Перечисленные обстоятельства делают интересным применение ЭК при разработке систем рекламно-выставочного освещения для торговых предприятий.

Результаты МСС с использованием 11-и каналов при трёх вариантах уровня ЭК представлены на рис. 5–6. Для сравнения там же приведены изображения, также рассчитанные по описанному алгоритму, но только для трёх стандартных RGB-каналов ЦФК, и изображения «без обработки». Изображения «без обработки» конвертировались в Tiff из RAW-файла без какой-либо коррекции за исключением установки соответствующего параметрам освещения баланса белого ($T_{кц} = 5000K$), цветовое пространство — ProPhoto.



Рис. 5 Фотографии эффекта кларификации на примере сырокопчёных мясных продуктов

На фотографиях указаны значения индекса цветопередачи R_a и количество спектральных каналов, задействованных при обработке по предложенному алгоритму. Наиболее точное соответствие визуально-воспринимаемым цветам в правой колонке, наибольший уровень кларификации — на правом верхнем изображении.

Из всех изображений в программе Photo Shop вырезались тематические фрагменты (фрукты, мясные продукты) и объединялись в подборки-коллажи. Дальнейшая обработка заключалась в контролируемом ручном уменьшении насыщенности полученных коллажей для наиболее полного вхождения его цветов в целевое цветовое пространство при относительном колориметрическом типе рендеринга. Целевыми пространствами для данной работы выбраны: в электронной версии — sRGB IEC61966-2.1, в печатной версии — ISO coated v2 300 (ECI).

Оценка колориметрической точности расчётов изображений проведена по 24 полям шкалы CCh, не использованной в коллажах. Значения цветовых различий между контрольными данными, и извлечёнными и пикселей XYZ изображения приведены в табл. 1.

Таблица 1
Цветовые отличия ΔE_{ab}^* цветов изображений от контрольных значений по набору полей шалы CCh при расчёте изображения по 3 и 11 каналам для различных уровней проявления ЭК

Уровень эффекта кларификации	3 канала ΔE_{ab}^* среднее (макс./мин.)	11 каналов ΔE_{ab}^* среднее (макс./мин.)
Высокий ($R_a = 35$)	3,36 (8,48/1,10)	2,24 (4,76/0,09)
Средний ($R_a = 67$)	3,13 (7,07/1,10)	2,14 (6,94/0,08)
Низкий ($R_a = 96$)	3,21 (6,97/1,32)	2,06 (5,04/0,07)

Из табл. 1 видно, что цветовое отличие полей на изображении от контрольных значений при расчёте изображения по 11-и каналам во всех случаях ниже чем для расчёта по 3-м каналам.

Из визуального сравнения элементов коллажей на рис. 5–6 следует, что при стандартной съёмке на ЦФК без специальной коррекции ЭК на фотографиях незначителен. В тоже время максимальное изменение цветов полей CCh, полученное по контрольным спектрофотометрическим замерам, составляет $\Delta E_{ab}^* = 12,67$ при переходе от «низкого» уровня ЭК к «среднему», и $\Delta E_{ab}^* = 26,87$ при переходе от «низкого» уровня ЭК к «высокому».



Рис. 6 Фотографии эффекта кларификации на примере сырокопчёных яблок и помидоров

На фотографиях указаны значения индекса цветопередачи и количество спектральных каналов, задействованных при обработке по предложенному алгоритму. Наиболее точное соответствие визуально-воспринимаемым цветам в правой колонке, наибольший уровень кларификации — на правом верхнем изображении.

Коррекция путём пересчёта цветов всего изображения по «привязке» к стандартной шкале CCh (с помощью описанного алгоритма), даёт результат ближе к визуально наблюдаемому. Аналогичный расчёт по 11-и каналам даёт ещё большую точность.

VI. Выводы

Предложен метод фоторегистрации визуально-воспринимаемых эффектов с помощью мультиспектральной технологии съёмки с применением широкополосных поглощающих светофильтров. Используемый алгоритм обработки изображений не требует знания функций сопоставления цвета цифровой фотокамеры.

Проведён эксперимент по мультиспектральной фотосъёмке эффекта кларификации предложенным методом. Зафиксировано существенное увеличение визуально-воспринимаемой насыщенности красных и зелёных цветов у некоторых продовольственных товаров — сырокопчёное мясо, помидоры, яблоки. Степень проявления эффекта легко регулируется.

Мультиспектральная съёмка обладает преимуществами по сравнению с обычной фотографией при регистрации специфических эффектов, связанных с визуальным восприятием.

VII. Литература

- [1] Thornton W.A. Three-Color Visual Response // J. Opt. Soc. Am. 1972. Vol. 62, № 3. P. 457–459.
- [2] Hunt R.W.G. The Reproduction of Colour. 6 edition. Chichester, West Sussex, England; Hoboken, NJ: Wiley, 2004. 724 p.
- [3] Арапова С.П., Арапов С.Ю., Москвичёв С.А. Применение эффекта кларификации в полиграфии // Информация: передача, обработка, восприятие : материалы международной научно-практической конференции (Екатеринбург, 12–13 января 2016 г.). Екатеринбург: УрФУ, 2016. С. 82–90.
- [4] Арапова С.П. и др. Автоматизированный просмотровый комплекс для исследований цветопередачи при RGB-светодиодном освещении // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. 2014. № 5. С. 45–54.

полиграфии и издательского дела. 2016. № 6. С. 3–11.

- [5] 5. Миллер К. и др. Зрительный эксперимент по определению предпочтительной насыщенности цвета // Светотехника. 2015. № 5. С. 12–18.
- [6] Арапова С.П., Арапов С.Ю., Суворова Ю.Л. Метод управления индексом цветопередачи для светодиодных модулей RGBW // Информация: передача, обработка, восприятие : материалы международной научно-практической конференции (Екатеринбург, 12–13 января 2016 г.). Екатеринбург: УрФУ, 2016. С. 91–103.
- [7] Лебедева С.М., Лузина Ю.А. Исследование эффекта «приукрашивания» цвета разноспектральными излучениями // Светотехника. 2016. № 1. С. 25–30.
- [8] Wang H.-C., Chen Y.-T. Optimal lighting of RGB LEDs for oral cavity detection // Opt. Express. 2012. Vol. 20, № 9. P. 10186–10199.
- [9] Мартынюк М.В. Оценка границ областей метамерии для набора светочувствительных приёмников // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2012. № 3 (96). С. 81–90.
- [10] Арапов С.Ю., Арапова С.П., Тягунов А.Г. Экспериментальный комплекс мультиспектральной фотосъёмки на основе стандартной цифровой камеры // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. 2014. № 5. С. 45–54.