

УДК 681.511.22, 535.66

Компенсация пространственной неравномерности и вариаций мощности импульсного освещения при мультиспектральной съёмке

Арапов С. Ю. *, Дубинин И. С., Арапова С. П.

*Уральский федеральный университет,
ул. Мира, 32, Р041, Екатеринбург, Россия, 620002*

Аннотация. В статье предлагаются методические улучшения в процесс обработки мультиспектральных изображений, полученных при импульсном освещении. Учитывается влияние как неравномерности освещения, так и нестабильности энергии отдельных импульсов. Уровень «чёрного» определяется по отдельному «чёрному» кадру. Для определения уровня «белого» в исследуемых точках применяется интерполяция вместо фильтрации. Точность восстановления спектрального коэффициента отражения существенно улучшилась по сравнению с рядом предшествующих работ.

Ключевые слова: мультиспектральное изображение, спектр отражения, цветовое отличие.

Compensation of spatial and temporal non-uniformity of the pulse illumination in multispectral photography

Arapov S. Yu. *, Dubinin I. S., Arapova S. P.

Ural Federal University, Mira, 32, R041, Ekaterinburg, Russia, 620002

Abstract. The article suggests methodological improvements in the processing of multispectral images obtained under pulsed illumination. The effect of non-uniform illumination and the instability of the energy of individual pulses takes into account. The black level is determined by a separate black shot. To determine white level in the examination points, interpolation is applied instead of filtering. The accuracy of the reconstruction of spectral reflectance was significantly improved in comparison with several previous works.

Keywords: multispectral image, reflectance spectra, color difference.

Введение

Применяемые в системах мультиспектральной съёмки (МСС) светофильтры как правило ухудшают освещённость сенсора по сравнению с традиционными трихроматическими цифровыми фотокамерами (ЦФК). Это, в свою очередь ведёт к увеличению уровня шумов и необходимости более длительной экспозиции. Поглощающие фильтры мультиспектральной камеры (МСК), обычно обладают меньшей полосой пропускания по сравнению со стандартными фильтрами R, G, B. Узкополосные светофильтры на интерференционном принципе обеспечивает лучшую спектральную избирательность, но ещё сильнее усугубляют обозначенную проблему. Кроме того, для таких фильтров, как настраиваемых, так и с фиксированной полосой, характерна заметная неоднородность спектра пропускания по полю кадра. Как показано в работе [1], это может ухудшать спектральную и колориметрическую точность таких систем.

В работе [2] в качестве решения предлагается использование импульсного освещения (ИО) на основе ксеноновой лампы-вспышки (КЛВ). Это позволяет избежать повышения уровня непрерывной освещённости, что может быть вредно для объекта МСС и оператора МСК. Спектр КЛВ довольно равномерно распределён по видимому диапазону и близок к естественному освещению, что несомненно является положительным моментом. В какой-то мере с таким подходом может конкурировать применение светоизлучающих диодов [3,4], однако такая система МСС требовательнее к светоизоляции снимаемой сцены. В тоже время в [2] отмечен основной недостаток ИО — к пространственной неравномерности добавляется временная нестабильность. Предлагаются варианты устранения влияния этого фактора и оценивается их результативность.

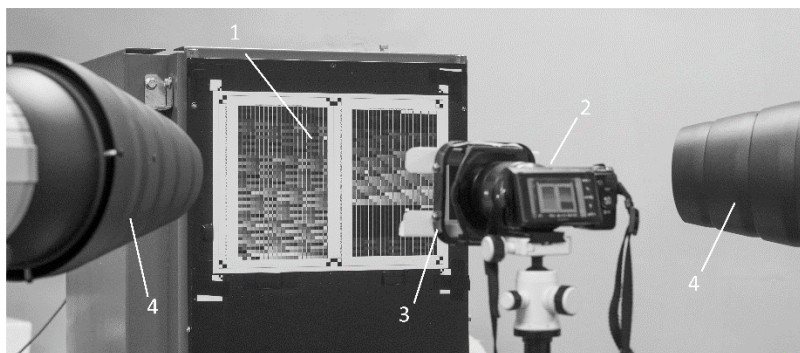
В работе [5] так же описан эксперимент по МСС с применением ИО. В отличие от [2] в [5] использованы более широкополосные поглощающие светофильтры, применён другой метод обработки данных [6] с теоретической оценкой случайной погрешности, проведена съёмка объектов, полученных автотипным способом. Однако точность полученных результатов оказалась недостаточна для полноценного практического применения рассмотренной системы МСС. Проведённый анализ первичных экспериментальных данных показал, что имеет место как пространственная неравномерность, так и временная нестабильность ИО.

Таким образом целью данной работы является модернизация и адаптация решений предложенных в работе [2] к имеющемуся экспериментальному оборудованию с последующей экспериментальной проверкой эффективности компенсации неравномерности освещения и вариаций мощности ИО.

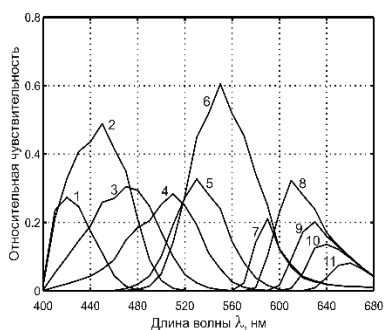
1. Методика проведения эксперимента

Мультиспектральная фотосъёмочная установка, на которой проводилась экспериментальная часть данной работы, представлена на рис. 1, а). ИО создаётся

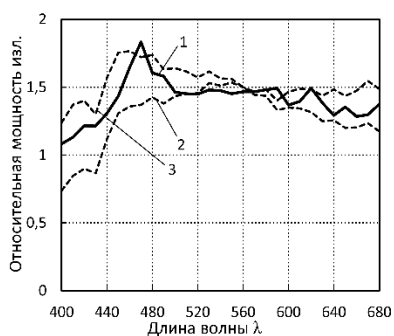
двумя КЛВ Hensel. Вакуумный стол фиксирует объекты съёмки, которая производится ЦФК NEX-5N с держателем для светофильтров. Фильтры меняются вручную. Сочетания сменных фильтров и фильтров матрицы ЦФК образуют фильтры «виртуальных сенсоров» МСК. На рис. 1, б), 1, в) приведены их спектральные характеристики, а также спектр ИО.



а)



б)



в)

Рис. 1. Организация эксперимента. а) общий вид и схема установки: 1 — тестовая шкала зафиксированная на вакуумном столе, 2 — цифровая камера, 3 — держатель фильтров, 4 — студийные вспышки с коллиматорами и тубусами; б) спектральные характеристики 11-и виртуальных сенсоров мультиспектральной камеры (МСК); в) спектр освещения: 1 — вспышка Hensel; 2, 3 — спектры стандартных осветителей D50 и D65(для сравнения).

По сравнению с держателем на магнитах [5], вакуумный стол значительно лучше фиксирует объект-оттиск в определённой плоскости. Он устраняет его локальные деформации, тем самым улучшая фокусировку и равномерность распределения освещения.

Геометрия освещения в эксперименте полностью совпадает с использованной в [5]. Две КЛВ Hensel снабжённые тубусами с сотовыми коллиматорами, освещают образец под углом 45° , ось оптической системы МСК совпадает с нормалью к поверхности образца.

Эксперимент заключается в последовательной съёмке экспериментальных объектов через набор фильтров. ЦФК работает в ручном режиме с фиксированным временем экспозиции. Экспериментальные объекты — тестовая шкала профилирования (ТШ) из 1944 полей формата А6 (идентичная использованной в работах [4, 5]), незапечатанный лист бумаги аналогичного формата и стандартная шкала ColorChecker (CCh) из 24 полей. Кроме перечисленного делается отдельный «чёрный кадр» с закрытой крышкой объектива, который служит для оценки уровня чёрного.

2. Обработка полученных изображений

Технология обработки полученных изображений в большинстве работ, посвящённых МСС, имеет схожие черты. Все действия с отснятым материалом условно можно разделить на три этапа — предварительная обработка, коррекционные преобразования, целевое преобразование полученных изображений. Калибровку системы МСС, пожалуй, следует считать отдельным от этой технологической линии этапом. Калибровка может происходить как прямо в процессе МСС для разовых экспериментов [1,4,5,7,8], так и проводиться заранее [2], а затем использоваться в процессе текущей эксплуатации МСК.

Предварительный этап обработки включает в себя конвертацию отснятого материала из нативного RAW-формата ЦФК в какой-либо стандартный, для дальнейшей обработки. Обычно при этом не используется автоматическое вычитание уровня чёрного из-за повышенных требований к точности этого преобразования. Полученные изображения затем совмещаются в МСИ, и кадрируются.

Коррекционный этап начинается с вычитания уровня чёрного из тоновых значений (ТЗ) в пикселях МСИ. В нашем эксперименте этот уровень определялся как среднее арифметическое ТЗ по полю чёрного кадра. Такая оценка вполне разумна, поскольку распределение ТЗ в чёрном кадре оказалось очень близко к нормальному. Далее следует коррекция различных видов неравномерности — распределения освещённости, пропускания оптической системы МСК, спектральных характеристик фильтров, мощности импульсов КЛВ.

Заключительный этап целевого преобразования откорректированных МСИ в данной работе, как и калибровочный, технологически полностью совпадает с работой [5], где используются расчётные формулы, полученные в [6].

Отдельного внимания заслуживает этап коррекции. Основной тонкостью является то, что результаты коррекции одного недостатка экспериментальных данных могут оказывать влияние на коррекцию другого. Чтобы избежать этого в [2], например, применялся отдельный независимый фотосенсор мощности импульса КЛВ. Его данные использовались для коррекции вариаций освещённости в целом. В данной работе была выбрана следующая последовательность коррекции ТЗ в МСИ — сначала устранялось влияние вариаций мощности импульса КЛВ, затем одновременно устранялись последствия неравномерности распределения освещения и свойств оптической системы МСК в поле кадра.

3. Коррекция влияния вариаций мощности импульсов вспышки

В основе данного этапа лежит априорное предположение о том, что распределение освещённости в поле кадра неравномерно, но его форма сохраняется, в то время как абсолютные значения могут меняться из-за неодинаковости мощности отдельных импульсов КЛВ. Другим необходимым предположением является одинаковость спектрального коэффициента отражения во всех незапечатанных точках всех листов бумаги, использованных в эксперименте. Эти предположения вполне разумны, учитывая постоянство материальных свойств оптических элементов системы и бумаги в течении эксперимента.

Из всего этого следует, что, для различных кадров, независимо от содержания изображения, ТЗ в пикселях с одинаковыми координатами должны быть также одинаковыми (с точностью до уровня шума) если они приходятся на незапечатанную бумагу. При этом в пределах одного кадра ТЗ незапечатанной бумаги могут меняться из-за неравномерности освещения. Всего было выбрано восемь точек, которые во всех МСИ попадали на незапечатанную бумагу. Тогда для произвольного канала в МСИ можно записать систему уравнений:

$$\begin{cases} \langle t_i^0 \rangle = c \langle t_i^K \rangle \\ i = \overline{1,8} \end{cases}, \quad (1)$$

где $\langle t_i^0 \rangle$ — усреднённое ТЗ пикселей из зоны, взятой в окрестности i -ой точки принятого за «опорное» МСИ, $\langle t_i^K \rangle$ — аналогичное значение из такой же точки, но только в «корректируемом» МСИ, c — искомый поправочный коэффициент, зависящий от соотношения мощностей импульсов КЛВ в моменты съёмки данного слоя в опорном и корректируемом МСИ. Система уравнений (1) избыточна и коэффициент можно найти методом наименьших квадратов. На рис. 2 приведена наглядная иллюстрация описанного процесса на примере слоя, соответствующего первому сенсору (рис. 1, б), в трёх МСИ.

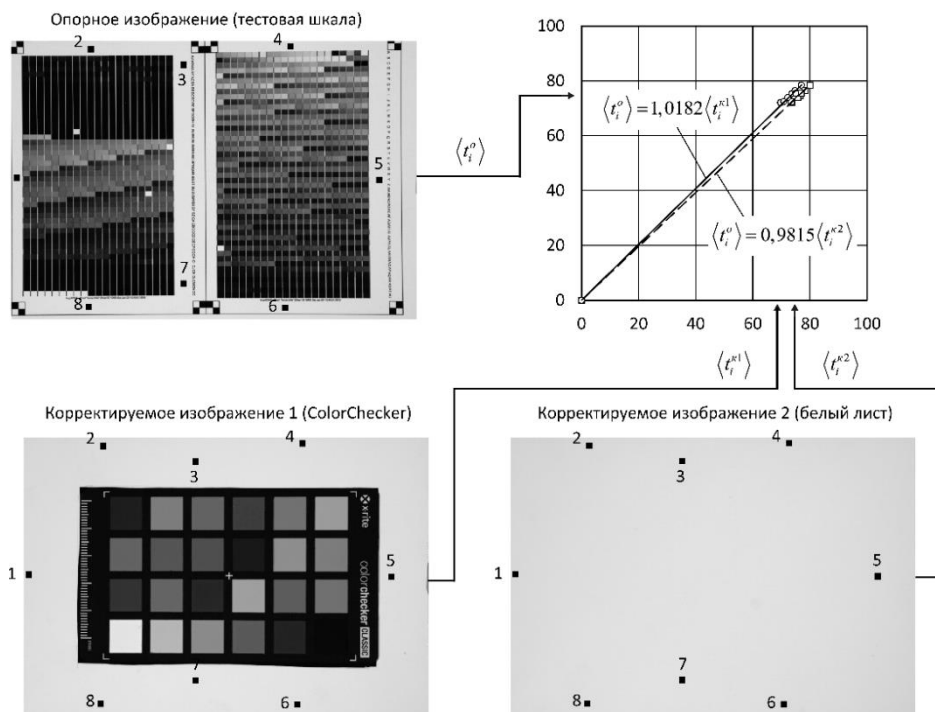


Рис. 2. Пример определения поправочных коэффициентов для коррекции вариаций мощности импульсов КЛВ. Цифрами 1–8 обозначены контрольные точки, попадающие на незапечатанную бумагу во всех МСИ, там же чёрным цветом показана квадратная зона усреднения ТЗ

Из графиков на рис. 2 следует, что у корректируемых изображений имеют место разнонаправленные отклонения экспозиции примерно на 2 %. Корректируемое изображение 1 (СCh) недоэкспонировано и ТЗ в нём следует умножить на 1,0182, а корректируемое изображение 2 (белый лист) наоборот переэкспонировано и ТЗ в нём следует умножить на 0,9815.

Представленная технология коррекции ТЗ в экспериментально полученных МСИ минимизирует своё влияние на последующие этапы обработки. Поскольку поиск поправочного коэффициента производится в виде наилучшей квадратичной оценки, экспериментальные точки сохраняют «степени свободы», т.е. имеют возможность отклонения от найденной оценки за счёт шумов в изображении, неравномерности освещения и, возможно, других факторов.

Подобная корректировка вариаций экспозиции рассмотрена в работе [2], однако детали процесса опущены, приводится лишь информация о использовании для этого ТЗ одного из полей снимаемой шкалы. Прямое сравнение с предложенным нами подходом невозможно, однако сопоставление результатов в рамках самой работы [2] говорит о том, что такая коррекция не менее эффективна чем использование отдельного датчика.

4. Коррекция пространственной неравномерности освещения

Учёт пространственной неравномерности освещения опирается на ТЗ из МСИ незапечатанного листа бумаги. Технология этого этапа коррекции проиллюстрирована на рис. 3.

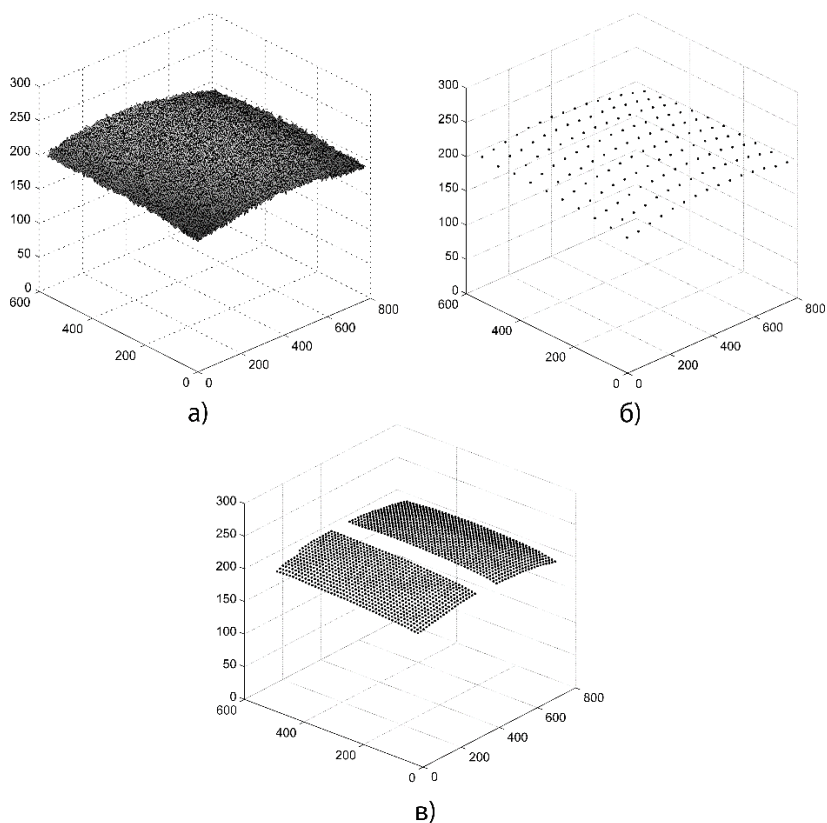


Рис. 3. Определение поправок, корректирующих неравномерность освещённости:

- а) ТЗ в МСИ белого листа без сглаживания; б) ТЗ в выбранных опорных точках; в) интерполированные ТЗ «уровня белого» в полях ТШ.

На рис. 3, а видна неравномерность, также заметны шумы. Перед расчётом поправки для произвольной точки изображения требуется сглаживание. ТЗ в корректируемых МСИ пропорциональны коэффициенту отражения, и поэтому поправка к ним должна быть мультипликативной. С другой стороны, эта поправка (впрочем, как и поправка на вариацию импульса КЛВ) есть функция случайных величин (ТЗ из МСИ белого листа) и, следовательно, сама является случайной

величиной. В большинстве работ по МСС, и в том числе в [2], эта поправка определяется с помощью простейших вариантов усредняющей фильтрации. Вполне разумно предположить, что она распределена по нормальному закону, как и сами ТЗ. Поскольку произведение двух независимых нормально распределённых случайных величин не является нормально распределённой случайной величиной [9], то умножение ТЗ на поправку с высокой дисперсией может привести не только к повышению уровня шумов, но и искажению их распределения. Последний момент очень важен так как используемый метод обработки МСИ [6] предполагает нормальное распределение ТЗ.

Наиболее простым способом преодоления этого препятствия представляется максимально возможное сглаживание шумов в МСИ белого листа, призванное максимально нивелировать «случайность» ТЗ. Однако чрезмерная фильтрация может также привести и к сглаживанию итогового распределения освещённости. В данной работе использован гибридный подход. Сначала, путём усреднения по квадратному окну вокруг каждой точки, определялись опорные ТЗ в узлах довольно редкой равномерной сетки (рис. 3, б). Затем (рис. 3, в), с помощью линейной интерполяции, находились ТЗ уровня белого в точках расположения полей ТШ («Опорное изображение» на рис. 2), либо полей ССh («Корректируемое изображение 1» на рис. 2). Коррекция ТЗ полей этих шкал производилась делением на соответствующий уровень белого.

5. Результаты

В таблице 1 приведено сравнение результатов данной работы с предшествующими в отношении цветовых различий ΔE_{ab} . В первом пункте таблицы приведены результаты аппроксимации спектров отражения с помощью использованного при реконструкции функционального базиса [10]. В работах [5, 6, 8] этот базис хорошо зарекомендовал себя при решении аналогичных задач. Точность результатов, полученных с его помощью в ряде практических случаев, не ниже чем при полиномиальной аппроксимации [11], и даже при использовании главных компонент [8]. Приведённые данные взяты из работы [5], Их можно считать естественным пределом точности решения нашей задачи реконструкции.

Результаты данной работы приведены в п. 2 табл. 1, для сравнения взяты результаты предыдущей съёмки на том же оборудовании из [5]. Сравнение п. 2 и 3 табл. 1, показывает, что в отношении значений ΔE_{ab} результаты данной работы сопоставимы по точности для шкалы ССh, и существенно лучше для ТШ. При этом они получены на существенно меньшем объёме калибровочного набора — шесть полей вместо нескольких десятков. Таким образом применение предложенной технологии коррекции ТЗ можно считать оправданным.

Таблица 1. Сравнительная оценка цветовых различий между реконструированными и контрольными спектрами в работах 2, 5

№ п/п	Источник информации	Калибровка (шкала / кол. полей)	Цветовое различие, ΔE_{ab}				
			Шкала CCh		Тестовая шкала (ТШ)		
			средн	макс	формат	средн	макс
1	Аппроксимация, работа [5]	CCh / 24	0,17	0,39	—	0,22	0,59
2	Данная работа	CCh / 6	1,34	2,91	A6	3,97	12,71
3	Работа [5]	CCh / 24	1,39	2,69	A4	6,99	17,30
		ТШ / 44	—	—		7,51	28,67
		ТШ / 144	—	—	A6	4,10	16,23
		ТШ / 244	—	—		4,35	14,00
4	Работа [2] (с корр.)	—	1,33*	2,36*	TE221**	2,16*	8,15*

* — для оценки цветового различия использовалась формула ΔE_{00}

** — стандартная цветовая шкала TE221, содержит 283 поля, данные о размере отсутствуют

Следует так же отметить, что приведённые значения цветовых различий с некоторой долей условности можно считать сопоставимыми с работой [2] (п. 4 в табл. 1). Непосредственное сравнение затруднено тем, что использование ΔE_{00} формулы в некоторых случаях даёт меньшие цветовые различия по сравнению с ΔE_{ab} , особенно в насыщенных цветах. Это ведёт к снижению в первую очередь максимального, а как следствие и среднего значения в табл. 1. Кроме того стандартная шкала TE221 не является автотипным оттиском. Так же из [2] не ясен объём калибровочного набора полей, так как основное внимание уделяется устранению неодинаковости энергий импульсов вспышки.

Выводы

Предложенная методика коррекции тоновых значений в мультиспектральном изображении дала положительный эффект. Калибровочный набор сокращён с нескольких десятков до шести полей стандартной шкалы, при более высокой точности.

Достигнутый прогресс позволяет надеяться на получение решений, пригодных для промышленного применения. Это возможно при дальнейшем совершенствовании экспериментального оборудования и метода обработки данных.

Список литературы

1. Imai F.H., Rosen M.R., Berns R.S. Comparison of Spectrally Narrow-Band Capture Versus Wide-Band with a Priori Sample Analysis for Spectral Reflectance Estimation // *Color Imaging Conf.* 2000. Vol. 2000, № 1. P. 234–241.
2. Brauers J., Helling S., Aach T. Multispectral Image Acquisition with Flash Light Sources // *J. Imaging Sci. Technol.* 2009. Vol. 53, № 3.
3. Shrestha R., Hardeberg J.Y. An experimental study of fast multispectral imaging using LED illumination and an RGB camera // *Color and Imaging Conference. Society for Imaging Science and Technology*, 2015. Vol. 2015. P. 36–40.
4. Мультиспектральная фотосъемка с использованием многоканального светодиодного кластера / С. Ю. Арапов [и др.] // *Компьютерный анализ изображений: Интеллектуальные решения в промышленных сетях (CAI-2016): сборник научных трудов по материалам I Международной конференции (УрФУ, Екатеринбург, 5–6 мая 2016 г.)*. Екатеринбург: Издательство УМЦ УПИ, 2016. С. 7–10.
5. Применение мультиспектральной фотосъемки для считывания шкал цветового контроля процесса печати / С. Ю. Арапов [и др.] // *Компьютерный анализ изображений: Интеллектуальные решения в промышленных сетях (CAI-2016): сборник научных трудов по материалам I Международной конференции (УрФУ, Екатеринбург, 5–6 мая 2016 г.)*. Екатеринбург: Издательство УМЦ УПИ, 2016. С. 17–22.
6. Оценка погрешности реконструкции спектров отражения тестовых полей по данным мультиспектральной фотосъемки / С. Ю. Арапов [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела*. 2015. № 3. С. 68–77.
7. Мультиспектральная фотосъемка с помощью стандартной цифровой фотокамеры / Е. Н. Шавкуненко [и др.] // *Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Информационные технологии, телекоммуникации и системы управления»*: сборник докладов (Екатеринбург, УрФУ 15 декабря 2014 г.). Екатеринбург: УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2015. С. 127–134.
8. Псевдоинверсная обработка данных мультиспектральной фотосъемки в стационарных зонах изображения / А. Ш. Сыдыхов [и др.] // *Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Информационные технологии, телекоммуникации и системы управления»*: сборник докладов (Екатеринбург, УрФУ, 15 декабря 2014 г.). Екатеринбург: УрФУ, 2015. P. 179–185.
9. Springer M.D., Thompson W.E. The Distribution of Products of Beta, Gamma and Gaussian Random Variables // *SIAM J. Appl. Math.* 1970. Vol. 18, № 4. P. 721–737.
10. Моделирование спектров отражения на основе базиса из функций типа интеграла ошибок / С. Ю. Арапов [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела*. 2012. № 6. С. 017–029.
11. Моделирование спектров отражения суперпозицией полиномов / Д. А. Тарасов [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела*. 2012. № 5. С. 059–066.