

## ОБ АЛГОРИТМЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ КРИВОЙ ТОНОВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ПРИ СОЗДАНИИ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

© Ирина Львовна Артюшина<sup>1</sup>, Алексей Иосифович Винокур<sup>1,2</sup>,  
Алексей Владимирович Глазков<sup>1</sup>, Виталий Львович Крупенин<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Московский Политехнический Университет, Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

<sup>3</sup>ИМАШ РАН, Москва, Россия

[alex.vinokour@gmail.com](mailto:alex.vinokour@gmail.com)

**Аннотация.** Рассматриваются технические аспекты создания карты большого участка поверхности земли на основе монтажа последовательности малых элементарных снимков. Предлагается алгоритм построения кривой тоновоспроизведения сенсора, необходимый для согласования участков карты по яркости и контрасту. Исходными данными являются снимки участка поверхности, имеющие разную яркость за счет разных условий экспонирования. Дается тестовый пример, в котором эффективность алгоритма подтверждается практическим восстановлением цифрового снимка. Алгоритм может быть использован для обеспечения правильной (без искажений) градационной передачи объектов съемки и рекомендуется для автоматизации процесса создания аэрокосмических изображений.

**Ключевые слова:** кривая тоновоспроизведения, аэрокосмическая съемка, экспозиция, градационная передача.

## ABOUT TONE CURVE RECONSTRUCTION ALGORITHM FOR AUTOMATING CREATION OF AEROSPACE IMAGES

© Irina L. Artyushina<sup>1</sup>, Aleksey I. Vinokur<sup>1,2</sup>, Aleksey V. Glazkov<sup>1</sup>, Vitaly L. Krupenin<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russian Federation

<sup>3</sup>IMASH RAN, Moscow, Russian Federation

[alex.vinokour@gmail.com](mailto:alex.vinokour@gmail.com)

**Abstract.** The technical aspects of creating a map of a large area of the earth's surface based on the installation of a sequence of small elementary images are considered. An algorithm is proposed for constructing the tone curve of the sensor, which is necessary for matching the map sections in terms of brightness and contrast. Initial data are images of the surface area, having different brightness due to different exposure conditions. A test case is given in which the efficiency of the algorithm is confirmed by the practical restoration of a digital snapshot. The algorithm can be used to ensure the correct (without distortion) gradation transfer of objects and is recommended to automate the process of creating aerospace images.

**Keywords:** tone reproduction curve, aerospace survey, exposure, gradation.

**1. Введение.** В различных областях управления территориями, транспортом, а также в сельском хозяйстве, широко применяется аэрокосмическая регистрация изображений

поверхности земли при борьбе с пожарами, наводнениями, для прогнозирования урожая, анализа ситуаций на автомобильных и железных дорогах и т.д.

Съемка производится с самолетов, вертолетов, спутников и т.п. Результатом является карта - изображение большого участка поверхности земли. Карта формируется из большого количества снимков, каждый из которых в общем случае имеет свою яркость и масштаб. Для объединения изображений в карту необходимо производить их монтаж, обеспечивая согласование по масштабу, резкости, градациям и цвету. Все эти задачи основаны на знании кривой тоновоспроизведения, то есть свойств сенсора реагировать на различные по яркости участки объекта съемки. Используемые стандартные данные часто не соответствуют реальным условиям съемки или просто отсутствуют.

Наиболее близкими задачами являются создание панорамы и использование HDR технологии [1, 2] при съемке широкоугольных и высококонтрастных объектов. Панорамирование решает задачи сшивки границ по совмещению деталей, а HDR позволяет выравнивать изображения по яркости и обеспечивать проработку деталей. Вместе с тем для обеспечения точных соотношений яркостей в аэрокосмическом изображении необходимо знание кривой тоновоспроизведения. Построение алгоритмов определения этой характеристики процесса съемки по сюжетным изображениям – весьма актуально. В настоящей статье (см. также [3, 4]) предлагается оригинальный алгоритм вычисления кривой тоновоспроизведения.

**2. Методика анализа.** Регистрация цифрового изображения поверхности земли производится с помощью матрицы или линейки, содержащих светочувствительные элементы. Каждый из них описывается градационной характеристикой, предполагается одинаковой для всех элементов. Зависимость эффекта (для простоты будем считать, что фотографический эффект описывается какой-либо цветовой координатой) от логарифма экспозиции принято называть характеристической кривой. При фиксированной экспозиции зависимость фотографического эффекта от яркости объекта съемки принято называть кривой тоновоспроизведения. При решении прямой задачи кривая тоновоспроизведения считается заданной. В нашем случае решается обратная задача и кривую тоновоспроизведения требуется найти.

В качестве исходных данных мы имеем два снимка поверхности земли, полученные в общем случае с различными экспозициями (см. рис.1). Иначе говоря, мы обладаем информацией о значении цветовой координаты для каждого пикселя изображения. Механизм формирования цифровых изображений понятен из рис.2. В качестве цветовой координаты выбран логарифм яркости пикселя  $IgY$ . Вопрос выбора цветовой координаты является принципиальным. Дело в том, что в модели формирования изображения мы используем характеристическую кривую сенсора, и оперируем двумя величинами – цветовой координатой и логарифмом экспозиции. В действительности какие-либо прямые (измеренные) данные о величинах логарифмов экспозиции нам недоступны. Задача как раз в том и заключается, чтобы по величинам цветовой координаты двух снимков восстановить величины логарифмов экспозиций для каждого значения цветовой координаты, то есть восстановить кривую тоновоспроизведения, как зависимость цветовой координаты снимка от цветовой координаты соответствующего участка поверхности земли. Преимущество выбранных нами логарифмических величин заключается в простой интерпретации операций сложения и вычитания. Другие используемые в колориметрии величины (яркость, гамма преобразованные координаты и др.) этим свойством не обладают.

Начнем с рассмотрения прямой задачи. Пусть  $y=f(x)$  – характеристическая кривая сенсора, выраженная в логарифмах яркости;  $x$  – логарифм яркости участка земной поверхности;  $y$  – логарифм яркости соответствующего пикселя изображения;  $z$  – экспозиционный параметр, выраженный в логарифмах экспозиции. Имеем:

$$\begin{aligned} y^{(1)} &= f(x + z_1) \\ y^{(2)} &= f(x + z_2) \end{aligned} \quad (1)$$

где  $z_1$  – первый экспозиционный параметр;  $z_2$  – второй экспозиционный параметр.

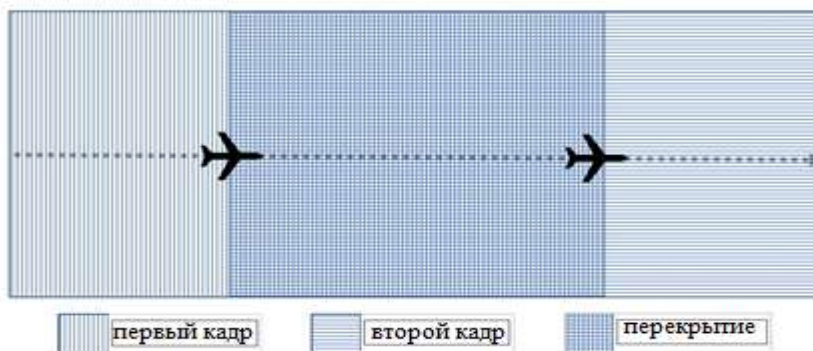


Рис.1. Схема съемки.

Типичная характеристическая кривая обычно имеет так называемый прямолинейный участок, на котором функция  $f$  может быть аппроксимирована линейной функцией. При малой разнице экспозиций  $z_1$  и  $z_2$  естественно ожидать, что будет существовать множество пикселей, значения логарифмированных яркостей которых для обоих снимков лежат на прямолинейном участке. Это позволит написать уравнения для оценки экспозиционного сдвига:

$$\begin{aligned} y^{(1)} &= \gamma(x + z_1) + b \\ y^{(2)} &= \gamma(x + z_2) + b \end{aligned} \quad (2)$$

Где  $\gamma$  – коэффициент контрастности,  $b$  – постоянная составляющая.

Вычитая из второго уравнения первое и разрешая его относительно  $z_2 - z_1$  получим

$$z_2 - z_1 = \frac{1}{\gamma} (y^{(2)} - y^{(1)}), \quad (3)$$

Таким образом, с точностью до множителя экспозиционный сдвиг может быть вычислен по экспериментальным данным. Это позволяет восстановить кривую тоновоспроизведения.

### 3. Последовательность действий.

**3.1. Подготовка изображений.** Выделяем интересующую нас область, для которой строится цифровое изображение. Это область – изображение одного и того же участка поверхности земли на двух снимках. Считаем, что с использованием современных методов и программных средств обработки аэрокосмических изображений вопрос попиксельного совмещения решен [1, 5]. В общем случае имеется разность в яркостях первого и второго изображения, связанная с изменением экспозиционных условий съемки [6].

Для того, чтобы неоднородности объекта съемки в виде мелких деталей и контуров не повлияли на решение градиационной задачи, следующим этапом является предварительная и согласованная обработка обоих изображений, направленная на выделение (детектирование) тех пар пикселей, которые лежат в областях плавного изменения яркостей. Это может быть

проделано с помощью частотной фильтрации или выделения областей с незначительным изменением яркости путем удаления участков с мелкими деталями и контурами [1, 7-11].

**3.2. Подготовка исходных данных.** Переходим к обработке оставшейся информации. Предполагаем, что каждый пиксель кодируется в координатах RGB. Переходим к координатам XYZ. Здесь существенно, что исходное кодирование имеет, как правило, 256 уровней. Мы же должны перейти к представлению в виде с плавающей запятой, чтобы при расчетах избежать больших потерь точности и даже ошибок.

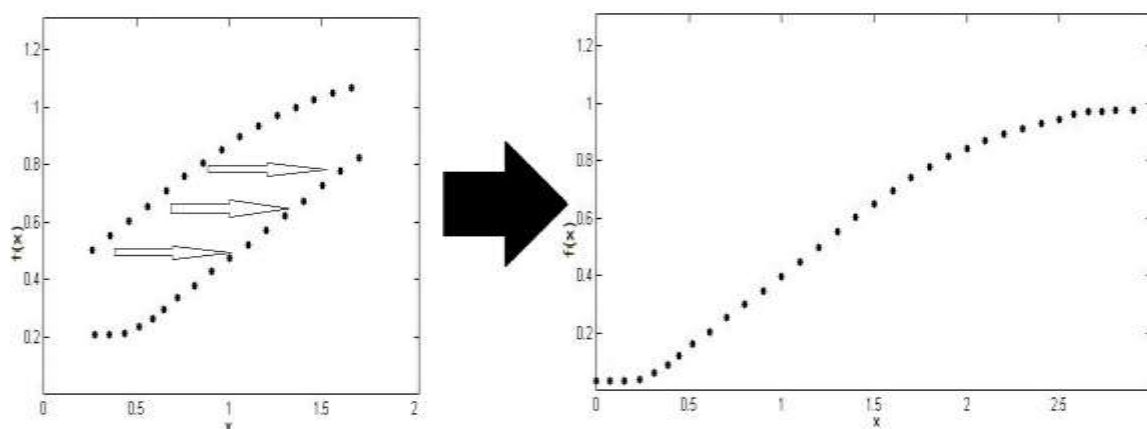
Выделяем координату, отвечающую за яркость, в соответствии с ранее описанной моделью [3], проводим ее логарифмирование и нормирование. Нормирование заключается в вычитании из всего массива данных минимального значения логарифма яркости.

Для каждой точки цифрового изображения формируем пару значений логарифмированных яркостей. Первое значение относится к изображению с меньшей экспозицией, а второе - с большей. Каждой паре присваивается номер, который позволяет упорядочить последовательность пар. Требуем выполнения следующих условий:

$$y_k^{(1)} \leq y_{k+1}^{(1)} \ \& \ y_k^{(2)} \leq y_{k+1}^{(2)}, \quad (4)$$

где  $k$  – номер пары.

Точки, для которых пары значений равны, отождествляются и входят в последовательность только один раз. Таким образом мы получили упорядоченную последовательность пар логарифмированных яркостей. На рис.6 приведено типичное распределение этих значений в координатах  $y^{(1)}, y^{(2)}$ .



**Рис. 2.** План формирования двух логарифмических последовательностей яркости и кривой тоновстроизведения.

Для получения кривой тоновстроизведения сдвигаем верхнюю кривую вправо, так чтобы ее прямолинейный участок совместился с прямолинейным участком нижней кривой. Таким образом, получаем кривую тоновстроизведения. Интервал изменения аргумента равен сумме максимального значения логарифмированной яркости  $\square u$  и экспозиционного сдвига  $z$ . Необходимая последовательность вычислений представлена на рис.3.

**4. Пример использования алгоритма.** Для проверки предлагаемого алгоритма использован известный фотоснимок аэрофотографа Casper Kowalski (URL: <http://www.anzenberggallery.com/category/landscape>). На рис 4 представлены два снимка одного и того же участка земной поверхности, снятые с разными экспозициями.

На рис. 5 представлены гистограммы логарифмированных значений яркостей каждого снимка. Гистограммы позволяют определить максимальное и минимальное значение логарифмов двух снимков.

Их разность равна динамическому диапазону кривой тоновоспроизведения с точностью до постоянного множителя  $\gamma$ . В нашем случае динамический диапазон равен 1,0 логарифмических единиц.

На рис. 6 совместное распределение значений логарифмированных яркостей  $y^{(1)}$  и  $y^{(2)}$  представлено в виде множества точек, каждая из которых соответствует одному пикселю цифрового изображения исследуемого участка поверхности земли.

Это распределение позволяет оценить разность экспозиций двух снимков  $\gamma(z_2 - z_1)$  как максимальное отклонение от прямой  $y^{(1)} = y^{(2)}$ . В нашем случае в логарифмических единицах она равна 0,24.

Восстановленная кривая тоновоспроизведения представлена на рис. 7. С ее помощью получено изображение участка поверхности земли, созданное с использованием двух снимков, рис. 4.

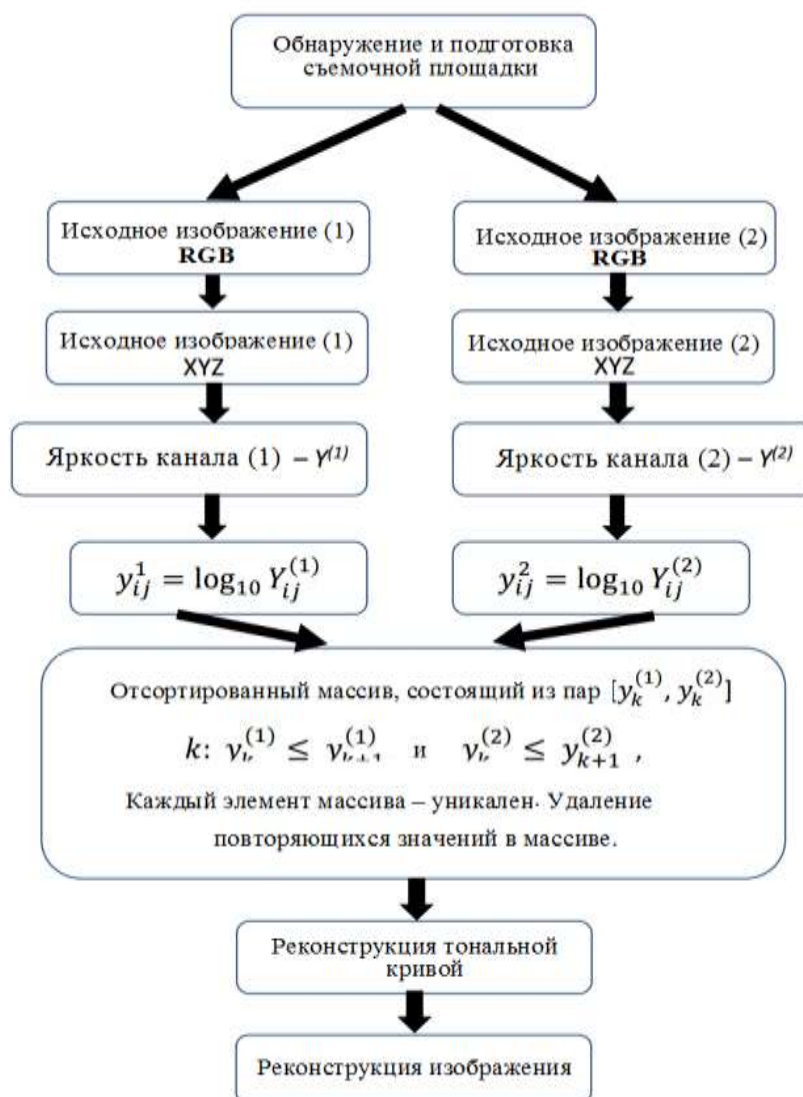


Рис. 3. Последовательность операций.

Сравнение восстановленной кривой с практически используемой проведено после уравнивания динамических диапазонов обеих кривых. Среднеквадратичное отклонение равно 0,02. Что позволяет говорить о высокой точности предлагаемого алгоритма.

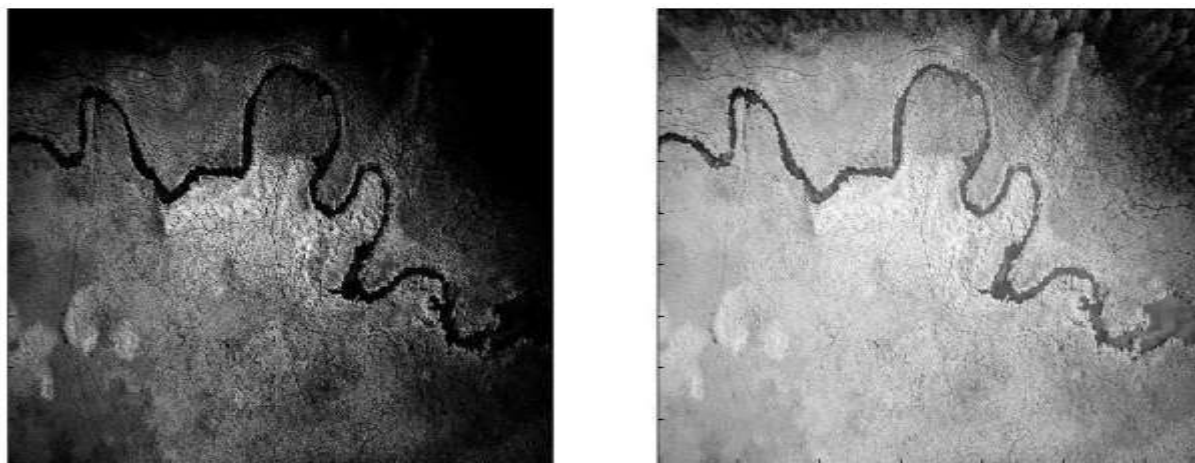


Рис.4. Два изображения некоторого фрагмента земной поверхности.

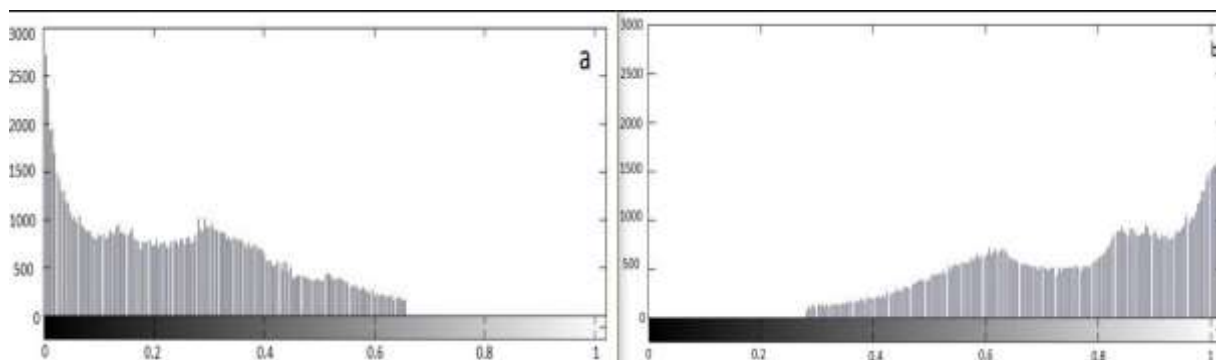


Рис.5. Гистограммы значений логарифма яркости: рис. а - относится к изображению с меньшей экспозицией, рис. б - с большей экспозицией.

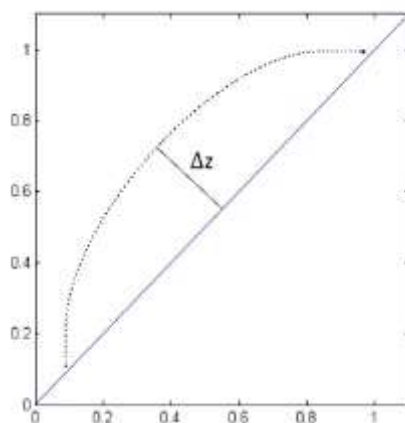
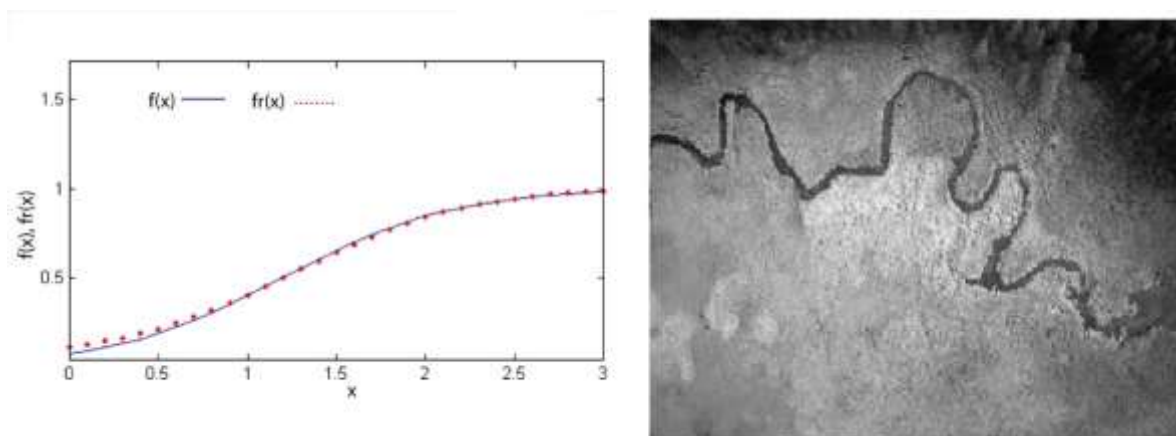


Рис. 6. Типичное распределение пар значений логарифма яркости первого и второго снимков в координатах  $y^{(1)}$  и  $y^{(2)}$ ;  $\Delta z$  - экспозиционный сдвиг.



**Рис.7.** Реконструированная тональная кривая и восстановленное изображение земной поверхности.

**5. Заключение.** Разработан алгоритм построения кривой тоновоспроизведения аэрокосмической съемки. Расчеты проводятся на основе обработки двух цифровых изображений участка земной поверхности, отличающихся по уровню яркости в силу различных экспозиционных условий регистрации. Отсутствие дополнительной информации о светочувствительных свойствах сенсора позволяет провести восстановление кривой тоновоспроизведения с точностью до множителя. Эта особенность не снижает полезности результата, так как полученное цифровое изображение при любом процессе визуализации требует согласования динамических диапазонов систем регистрации и визуализации. Полученная функция может быть использована для обеспечения правильной (без искажений) градационной передачи объектов съемки. Экспериментальное опробование подтверждает эффективность подхода. Алгоритм рекомендуется для автоматизации создания аэрокосмических изображений.

### Список литературы

1. Reinhard E., Ward G., Pattanaik S. and Debevec P. High Dynamic Range Imaging: Acquisition, Display and Image-Base Lighting. - San Francisco: Morgan Kaufmann Publisher, 2006. - 522 p.
2. Takao J., Masahiro O. Multiple Exposure Fusion for High Dynamic Range Image Acquisition// IEEE Transactions on image processing. - 2012. - Vol. 21, No. 1. - P 358-365.
3. Артюшина И.Л., Винокур А.И., Крупенин В.Л. К проблеме восстановления характеристической кривой регистрирующего устройства. // Вестник научно-технического развития. - 2015. - № 8(96). - С. 11-17.
4. Artyushina Irina, Vinokur Aleksey, Krupenin Vitaly Tone curve reconstruction algorithm for automating creation of aerospace images // 16<sup>th</sup> International Scientific Conference “Engineering for rural development”, Elgava, Latvia. Proceedings, 2017. - Vol.16. – P. 569-574.
5. Артюшина И.Л., Винокур А.И., Ноздрачёв С.А. Алгоритм согласования динамических диапазонов в информационных системах обработки изображений // Мир техники кино. - 2012. - № 26. - С. 25-27.
6. Akhtariyev R., Vinokur A. Quality evaluation algorithms for HDR image generation //Printing future days. - 2011. - Chemnitz, Germany. - P. 171-175.
7. Артюшина И.Л., Ахтариёв Р.Ж., Винокур А.И. Методы регистрации и воспроизведения высококонтрастных оригиналов в системах с ограниченным динамическим диапазоном //

- Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. - 2009. - № 4.- С. 9-15
8. Vinokur A.I. Information Technologies in Culture and Education // Image Processing Issues. Modern Applied Science. – 2015. -Vol. 9(5). - P.314-322.
  9. Salih Y., Malik A. A Comparative Study of Various Tone Mapping Methods// International Journal of Computer, Electrical, Automation, Control and Information Engineering. - 2011. - Vol. 5. - No. 10. - P. 1121-1126.
  10. Артюшина И.Л., Винокур А.И. Информационные системы: проблемы регистрации и воспроизведения изображений // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. - 2011. - № 4. - С. 75-82.
  11. Чибучичев Л.Г., Финошин Д.Л. Метод создания условного кадра, состоящего из множества микрокадров, полученных съемочными системами «Канопус-В» и БКА// Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2015. - № 6. - С. 48-52.

### References

1. Reinhard E., Ward G., Pattanaik S. and Debevec P. High Dynamic Range Imaging: Acquisition, Display and Image-Based Lighting. - San Francisco: Morgan Kaufmann Publisher, 2006. - 522 p.
2. Takao J., Masahiro O. Multiple Exposure Fusion for High Dynamic Range Image Acquisition. IEEE Transactions on image processing, 2012. - vol. 21, No. 1. - P. 358-365.
3. Artyushina I. L., Vinokur A. I. Krupenin V.L. To the problem of recovering the characteristic curve of the recording device //Bulletin of scientific and technical development. – 2015. - No 8(96). - P. 11-17 (In Russian).
4. Artyushina Irina, Vinokur Aleksey, Krupenin Vitaly Tone curve reconstruction algorithm for automating creation of aerospace images // 16<sup>th</sup> International Scientific Conference “Engineering for rural development”, Elgava, Latvia. Proceedings, 2017. - Vol.16. - P. 569-574.
5. Artyushina I. L., Vinokur A.I., Nozdrachev S.A. Algorithm for matching dynamic ranges in information processing systems of images//World of Technique of Cinema. – 2012. - No 26. - P. 25-27 (In Russian).
6. Akhtariev R., Vinokur A. Quality evaluation algorithms for HDR image generation. Printing future days. - 2011, Chemnitz, Germany. – P. 171-175.
7. Artyushina I. L., Ahtariev R.Z., Vinokur A.I.. Methods for recording and reproducing high-contrast originals in systems with a limited dynamic range. // Proceedings of the institutions of higher education. Issues of the graphic arts and publishing: 2009. - No 4. - P. 9-15 (In Russian).
8. Vinokur A.I. Information Technologies in Culture and Education: Image Processing Issues. Modern Applied Science. - 2015. - vol. 9(5). - P.314-322.
9. Salih Y., Malik A. A Comparative Study of Various Tone Mapping Methods. International Journal of Computer, Electrical, Automation, Control and Information Engineering. – 2011. - vol. 5, No. 10. – P. 1121-1126.
10. Artyushina I. L., Vinokur A.I. Information systems: image recording and visualization problems). Proceedings of the institutions of higher education. Issues of the graphic arts and publishing. – 2011. - No 4. - P. 75-82 (In Russian).
11. Chibushev L.G., Finoshin D.L. Method of creating reference frame consisting of microframes, obtained from «Kanopus-V» and BKA survey systems) // Proceedings of the institutions of higher education. Geodesy and aerial photography. – 2015. - No. 6. - P. 48-52 (In Russian).