

## МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ ПАНОРАМНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПО МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫМ ДАННЫМ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА, УЧИТЫВАЮЩИЙ ДИСТОРСИЮ КАМЕРЫ

А. А. ЛОМАКО<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко БГУ,  
ул. Курчатова, 7, 220045, г. Минск, Беларусь

Работа посвящена исследованию и модификации существующих методов объединения ряда изображений, получаемых с использованием мультиспектральной камеры, установленной на беспилотном летательном аппарате, в единое панорамное изображение в целях его дальнейшей тематической обработки. Предложен обобщенный метод для автоматизированного решения данной задачи на основе существующих детекторов и дескрипторов особых областей изображений, а также разработанного метода фильтрации совпадений особых областей. Проведен анализ по выбору оптимальных детекторов и дескрипторов особых точек для задач сшивки изображений участков лесного массива. Установлено, что комбинация методов ORB и FREAK показывает лучшие результаты в поиске и описании особых точек для указанных выше задач, чем методы BRISK, SURF и ORB. Особое внимание уделено важности определения и коррекции дисторсии камеры, используемой при получении данных, изложены применяемый метод и результаты коррекции дисторсии. Оценено влияние дисторсии съемочной аппаратуры на среднеквадратичное отклонение смещения между особыми точками при совмещении данных. Показано, что предложенный метод автоматического получения панорамных мультиспектральных изображений при решении задачи сшивки ряда мультиспектральных изображений позволяет осуществлять сшивку изображений со средней точностью до 5 пк.

**Ключевые слова:** компьютерное зрение; коэффициенты дисторсии; панорамное изображение; детекторы точек; дескрипторы точек.

## CONSIDERING CAMERA DISTORTION PANORAMIC IMAGES FORMING METHOD FOR UNMANNED AERIAL VEHICLE MULTISPECTRAL DATA

А. А. LAMAKA<sup>a</sup>

<sup>a</sup>A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems, Belarusian State University,  
7 Kurčatava Street, Minsk 220045, Belarus

The work is devoted to the study and modification of existing methods for merging a number of images obtained using a multispectral camera installed on an unmanned aerial vehicle into a single panoramic image for the purpose of its further thematic processing. A generalised method based on the existing detectors and descriptors of special areas of images was

### Образец цитирования:

Ломако АА. Метод формирования панорамных изображений по мультиспектральным данным беспилотного летательного аппарата, учитывающий дисторсию камеры. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика*. 2022;2:60–69.  
<https://doi.org/10.33581/2520-2243-2022-2-60-69>

### For citation:

Lamaka AA. Considering camera distortion panoramic images forming method for unmanned aerial vehicle multispectral data. *Journal of the Belarusian State University. Physics*. 2022;2: 60–69. Russian.  
<https://doi.org/10.33581/2520-2243-2022-2-60-69>

### Автор:

Алексей Андреевич Ломако – научный сотрудник лаборатории дистанционной фотометрии отдела аэрокосмических исследований.

### Author:

*Aliaksei A. Lamaka*, researcher at the laboratory of remote photometry, department of aerospace research.  
[alekseylomako@gmail.com](mailto:alekseylomako@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0002-8535-8882>

proposed for the automated solution of this issue, as well as the developed method for filtering matches of special areas. An analysis was carried out to select the best detectors and descriptors of special areas for the tasks of merging images of forest areas. It has been determined that the combination of ORB and FREAK methods show better results in detecting and describing specific points to perform the above tasks, than BRISK, SURF and ORB methods. Particular attention is paid to the importance of determining and correcting camera distortion used in data acquisition, the method used and the results of distortion correction are described. The effect of camera distortion to the displacement between singular points standard deviation in the case of data alignment is estimated. It is shown that the proposed automatic obtaining panoramic multispectral images method makes it possible to connect images with an average accuracy of up to 5 pixels when solving connection of multispectral images set issues.

**Keywords:** computer vision; distortion coefficients; panoramic image; point detectors; point descriptors.

## Введение

Одним из приоритетных направлений при изучении природных явлений в настоящее время являются исследования с использованием данных дистанционного зондирования Земли. К таким исследованиям относятся измерения, проводимые с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с малых высот [1]. Отличительная особенность подобных измерений – необходимость предварительной обработки данных перед проведением их тематической обработки. В ситуации, когда в качестве съемочной аппаратуры используются фотоаппараты или мультиспектральные камеры, под предварительной обработкой понимается широкий спектр операций, одна из целей которых состоит в получении единого изображения, являющегося результатом сшивки ряда изначально зарегистрированных изображений. В зависимости от высоты съемки набор этих операций может различаться. Однако независимо от высоты съемки все подобные эксперименты имеют общие черты, такие как необходимость учета оптических параметров съемочной аппаратуры и необходимость сшивки последовательно зарегистрированных изображений.

В последнее десятилетие среди методов построения панорам – цельных изображений, полученных путем сборки из нескольких отдельных снимков, – все чаще вместо корреляционного анализа и фазового корреляционного анализа, основанного на быстром фурье-преобразовании изображений [2], используются методы, базирующиеся на выделении так называемых особых точек, т. е. областей, изображение каждой из которых можно отличить от изображения всех соседних с ней областей. Для этого применяются специальные алгоритмы – детекторы. Численные характеристики особых точек при таком подходе определяются с помощью других алгоритмов – вычислителей дескрипторов, где дескриптор – это некая математическая конструкция (как правило, вектор), определенным образом описывающая особую точку и позволяющая сравнивать различные точки между собой [3].

Существует широкий спектр детекторов особых точек. В литературе выделяют следующие детекторы: детектор Харриса – Ши – Томаши, детектор пятен, детекторы признаков FAST (*features from accelerated segments test*), SIFT (*scale invariant feature transform*), SURF (*speed-up robust features*), Star, BRIEF (*binary robust independent elementary features*), BRISK<sup>1</sup> и ORB (*oriented FAST and rotated BRIEF*) [3]. Большинство этих алгоритмов обладают собственными вычислителями дескрипторов, однако существуют и специфические вычислители дескрипторов, например FREAK (*fast retinal keypoint*) [3]. В публикациях [4–6] авторами осуществлялся анализ по поиску наиболее информативных детекторов для решения конкретных задач. Большинство исследователей отмечают хорошие результаты, получаемые с использованием детектора особых точек SURF, а также высокую скорость при работе с детектором FAST. В статье [7] были обозначены сложности со сшивкой большого числа изображений методом SIFT, обусловленные наличием дисторсии у камер. Однако вышеописанные исследования не уделяют внимания распознаванию особых областей в сложных условиях сшивки изображений лесного массива, полученных с малых высот. Хотя проблема дисторсии камер и упоминается, но включить коррекцию дисторсии в процесс обработки изображений не предлагается.

Целью настоящего исследования являлась разработка автоматизированного метода формирования панорамного цифрового изображения на основе связанного ряда изображений, полученных с использованием установленной на БПЛА мультиспектральной камеры. Это предполагало определение набора наилучших алгоритмов поиска особых точек и вычисления дескрипторов для задачи сшивки цифровых изображений лесного массива. Большинство программных пакетов не справляются с решением данной задачи в автоматическом режиме. Кроме того, вследствие существенного влияния дисторсии на результаты сшивки в качестве первого этапа предварительной обработки мультиспектральных изображений стояла задача коррекции дисторсии.

<sup>1</sup>BRISK – это не акроним, а написание о методе BRIEF (*brief* – краткий, *brisk* – проворный).

## Приборы и методы исследования

Описанные в статье исследования проводились на данных, полученных с использованием БПЛА DJI Phantom 4 Multispectral<sup>2</sup> (SZ DJI Technology Co., Ltd., Китай). Программа управления БПЛА позволяет задавать площадь съемки, после чего БПЛА выполняет последовательную съемку, совершая полет галсами. Частота галсов зависит от заданного перекрытия кадров и высоты полета. В ходе эксперимента осуществлялись полеты на высоте от 80 до 120 м. Измерения проводились в октябре 2021 г. в Минской области. Входными данными мультиспектральной камеры являются RGB-изображения, а также изображения в пяти спектральных каналах:  $(450 \pm 16)$  нм (синий),  $(560 \pm 16)$  нм (зеленый),  $(650 \pm 16)$  нм (красный),  $(730 \pm 16)$  нм (красный край) и  $(840 \pm 26)$  нм (ближний ИК).

Для сшивки данных применялся предлагаемый метод формирования панорамных изображений. Общая структура метода сшивки изображений, полученных с использованием БПЛА, включает несколько этапов: коррекцию дисторсии во входных данных, привязку каналов друг к другу (в случае необходимости), сшивку изображений в общий панорамный снимок. Этот метод можно использовать на данных как мультиспектральных камер (без внесения изменений), так и других камер (с внесением определенных коррекций в состав алгоритма).

При проведении исследований применялась библиотека OpenCV на языке программирования C++ с использованием фреймворка Qt.

**Коррекция дисторсии в мультиспектральных изображениях.** Первой задачей, которую важно решить, является определение параметров дисторсии камеры и учет дисторсии для коррекции зарегистрированных изображений. Как известно, существуют два вида дисторсии [3]: радиальная (связана с неправильной формой линзы) и тангенциальная (обусловлена дефектами сборки камеры в целом). Преобразование координат можно описать в виде полинома с коэффициентами ряда Тейлора и зависимостью от расстояния между точкой кадра и осью объектива. Для радиальной дисторсии

$$\begin{aligned}x_{\text{corr}}^r &= x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6), \\y_{\text{corr}}^r &= y(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6),\end{aligned}\quad (1)$$

где  $r$  – расстояние от точки кадра до оси объектива;  $k_i$ ,  $i = \overline{1, 3}$ , – коэффициенты ряда Тейлора, связанные с радиальной дисторсией;  $x, y$  – координаты пиксела до проведения коррекции дисторсии;  $x_{\text{corr}}^r, y_{\text{corr}}^r$  – координаты пиксела после проведения коррекции радиальной дисторсии.

Для тангенциальной дисторсии

$$\begin{aligned}x_{\text{corr}}^t &= x + \left[ 2p_1 xy + p_2 (r^2 + 2x^2) \right], \\y_{\text{corr}}^t &= y + \left[ p_1 (r^2 + 2y^2) + 2p_2 xy \right],\end{aligned}\quad (2)$$

где  $p_i$ ,  $i = \overline{1, 2}$ , – коэффициенты ряда Тейлора, связанные с тангенциальной дисторсией;  $x_{\text{corr}}^t, y_{\text{corr}}^t$  – координаты пиксела после проведения коррекции тангенциальной дисторсии.

Коэффициенты  $k_1, k_2, k_3, p_1, p_2$  в формулах (1) и (2) и являются искомыми коэффициентами дисторсии. При этом для каждого из каналов мультиспектральной камеры указанные коэффициенты определяются независимо.

Для решения поставленной задачи в исследовании применялся метод калибровки по шахматной доске с расположенными в белых квадратах графическими кодами (ChArUco [3]). За счет графических кодов данный метод позволяет использовать при калибровке только часть общей поверхности: алгоритм всегда распознает, какой именно участок был зарегистрирован. Это преимущество крайне важно в условиях, когда при регистрации данных оператору видно изображение лишь в одном из каналов, и в некоторых каналах в таком случае может быть зарегистрирована только часть калибровочной доски (в различных камерах объективы каналов могут быть по-разному разнесены друг относительно друга). В эксперименте использовалась доска формата A1 размерности  $12 \times 8$  квадратов.

**Связывание каналов мультиспектральных изображений.** Зачастую каналы мультиспектрального изображения при наложении не совпадают идеально, в результате чего в совмещенном мультиспектральном изображении наблюдается сдвиг, который приводит к визуальной размытости изображения. Это обусловлено тем, что поля зрения каждого из каналов камеры немного развернуты друг относительно друга.

В связи с этим вторым шагом метода является связывание каналов мультиспектрального изображения с целью минимизировать величину сдвига между ними. Под связыванием в данном случае понимается

<sup>2</sup><https://www.dji.com/p4-multispectral>.

привязка всех спектральных каналов к RGB-изображению. Такой вариант выбран в силу того, что преобразованное в оттенки серого RGB-изображение включает в себя широкую спектральную область, пересекающуюся с большинством нуждающихся в привязке спектральных каналов.

Процесс связывания каналов, в свою очередь, также можно разделить на этапы.

*Этап 1.* Чтение RGB-изображения.

*Этап 2.* Преобразование RGB-изображения в градации серого.

*Этап 3.* Поиск и фильтрация особых областей в этом изображении с помощью детектора областей, а также вычисление дескрипторов особых областей с помощью вычислителя дескрипторов.

В качестве методов поиска особых областей в работе использовались алгоритмы SIFT, BRIEF, SURF, BRISK, ORB. Для вычисления дескрипторов областей, как правило, применялись вычислители, входящие в состав детекторов. В случае детектора ORB также использовалось его сочетание с вычислителем дескрипторов FREAK.

*Этап 4.* Чтение изображения спектрального канала.

*Этап 5.* Поиск и фильтрация особых областей в изображении спектрального канала с помощью ранее использованного детектора областей, а также вычисление дескрипторов особых областей с помощью вычислителя дескрипторов.

*Этап 6.* Поиск совпадений среди особых областей двух изображений (использовалось сопоставление прямым перебором, а также метод Хэмлинга).

*Этап 7.* Фильтрация совпадений по особым признакам.

Алгоритмы поиска совпадений среди особых областей двух изображений настроены в библиотеке OpenCV таким образом, что  $N$  особых точек первого изображения связываются с  $N$  особыми точками второго изображения, после чего часть наименее близких связей отбрасываются. Однако в ситуации с анализом изображений лесных массивов присутствует существенный процент ошибочных соответствий, которые обладают схожими дескрипторами. В этом случае необходим дополнительный этап фильтрации совпадений особых областей. В качестве способа фильтрации предлагается ввести критерий отбора по особым признакам. Каждая особая область имеет координаты собственного центра в изображении. Если совместить начала координат двух изображений, можно считать, что совпадающие особые области в двух изображениях находятся в одной системе координат. В этом случае можно выделить две метрики, характеризующие смещение центра особой области от кадра к кадру. Первая метрика – длина отрезка, соединяющего центры совпадающих областей:

$$R = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}, \quad (3)$$

где  $x_2, y_2$  – координаты центра особой области во втором изображении;  $x_1, y_1$  – координаты центра особой области в первом изображении.

Вторая метрика, которую предлагается ввести, – это угол наклона отрезка, соединяющего центры особых областей:

$$\alpha = \arctg\left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right). \quad (4)$$

По всему набору совпадений особых областей двух изображений определяются моды  $R_M$  и  $\alpha_M$  метрик, описанных в формулах (3) и (4) соответственно. В таком случае критерием для отбора  $i$ -го соответствия может считаться попадание значений обеих метрик этого соответствия в некие доверительные интервалы, выбираемые экспериментально:

$$\begin{cases} |R_M - R_i| < \epsilon_R, \\ |\alpha_M - \alpha_i| < \epsilon_\alpha, \end{cases}$$

где  $\epsilon_R$  – максимально допустимое отклонение длины отрезка, соединяющего совпадения, от моды распределения по всему списку совпадений;  $\epsilon_\alpha$  – максимально допустимое отклонение угла наклона отрезка, соединяющего совпадения, от моды распределения по всему списку совпадений;  $R_i, \alpha_i$  – значения метрик  $i$ -го соответствия.

*Этап 8.* Определение смещения между изображениями по отфильтрованному списку совпадений и гомографическое преобразование изображения спектрального канала.

Далее осуществляется переход к следующему спектральному каналу (при его наличии) и повторяются этапы 4–8.

**Объединение изображений в панорамный снимок.** Следующим шагом в обработке является сшивка последовательно полученных в ходе полета БПЛА снимков в панорамное изображение. Данная часть



метода во многом повторяет связывание каналов мультиспектрального изображения. Здесь также используются поиск и фильтрация особых областей с вычислением дескрипторов, но сопоставляются особые области двух преобразованных в оттенки серого RGB-изображений. В сопоставлении каналов нет необходимости, так как все каналы привязаны к RGB-изображениям на предыдущем этапе.

Особенностью сшивки изображений по сравнению со связыванием каналов при проведении исследования являлось отсутствие необходимости применения гомографического преобразования для объединения изображений. Это обусловлено наличием в БПЛА DJI Phantom 4 Multispectral гиросtabilизации.

Также важно отметить, что в данной работе при добавлении нового изображения к панораме часть изображения (25 % в случае с выбранным перекрытием), наиболее близкая к уже созданной на предыдущих этапах панораме, удалялась. Таким образом отбрасывались краевые точки изображения, что особенно важно при регистрации участков леса с малых высот.

## Результаты и их обсуждение

Для калибровки мультиспектральной камеры БПЛА DJI Phantom 4 Multispectral по параметрам дисторсии были зарегистрированы 78 изображений мира под различными углами съемки. С математической точки зрения достаточно 10 изображений. Однако на практике рекомендуется регистрировать не менее 20 изображений [3]. В настоящем эксперименте такое большое количество изображений понадобилось вследствие того, что каждый спектральный канал анализировался независимо. Зачастую, если в одном канале качество изображения было хорошим, в другом канале изображение могло оказаться смазанным. Результаты процедуры калибровки для каналов камеры БПЛА DJI Phantom 4 Multispectral представлены в таблице.

Результаты процедуры калибровки камеры DJI Phantom 4 Multispectral  
DJI Phantom 4 Multispectral camera calibration results

Спектральный канал	RGB	450 нм	560 нм	650 нм	730 нм	840 нм
Ошибка репроекции, пк	0,48	0,44	0,44	0,44	0,43	0,43

Ошибка репроекции в таблице – это сумма квадратов расстояний между вычисленными (спроецированными) положениями образов точек пространства на плоскости снимка и фактическим их положением на снимке [3]. На практике было установлено, что при определении параметров дисторсии удовлетворительной является ошибка репроекции около 0,5 пк и менее (при величинах ошибки репроекции порядка 0,8–1,0 пк уже наблюдаются существенные искажения изображений). Важно отметить, что дальнейшие шаги по сшивке изображений следует совершать только после коррекции дисторсии. Искажения на изображениях проявляются вследствие дисторсии даже при использовании высококачественных камер.

Одной из наиболее важных частей исследования был выбор метода поиска особых областей в изображениях, метода вычисления дескриптора и метода сравнения дескрипторов. Первоначальная оценка качества работы различных методов проводилась путем сравнения мод особых метрик, которые получались в результате сопоставления изображений. Как правило, моды отличаются несущественно (не более чем на 1 %), и может сложиться впечатление, что результат сшивки не сильно зависит от выбора обозначенных выше методов. Однако в некоторых случаях отличия мод оказывались все же достаточно существенными. На основе предварительных оценок было принято решение для выбора методов провести анализ гистограмм распределения особых метрик, построенных на основе совмещения изображений с использованием различных методов. Анализ выполнялся для десяти пар изображений. На рис. 1 представлены гистограммы распределения длин отрезков, соединяющих центры совпадающих областей, построенные с помощью методов поиска особых областей BRISK, SURF и ORB для одной пары изображений. Для вычисления дескрипторов областей применялись вычислители, входящие в состав детекторов. Совместно с детектором ORB также использовался вычислитель дескрипторов FREAK. На рис. 2 представлены гистограммы распределения углов наклона отрезков, соединяющих центры особых областей, полученные с помощью аналогичных методов. На всех гистограммах было проанализировано по 3000 особых областей.

Для построения гистограмм распределений (см. рис. 1 и 2) из всего исследованного ряда была выбрана пара изображений, сшивка которых, по визуальным оценкам, производится наихудшим образом. В данном случае на гистограммах можно увидеть, что некоторые методы (ORB) не справляются с задачей выделения корректной моды смещения, а результат работы других методов (BRISK, SURF) вызывает сомнения, поскольку мода в распределении выделяется несущественно. В этой ситуации наилучшим образом себя проявляет комбинация детектора ORB и вычислителя дескрипторов FREAK.

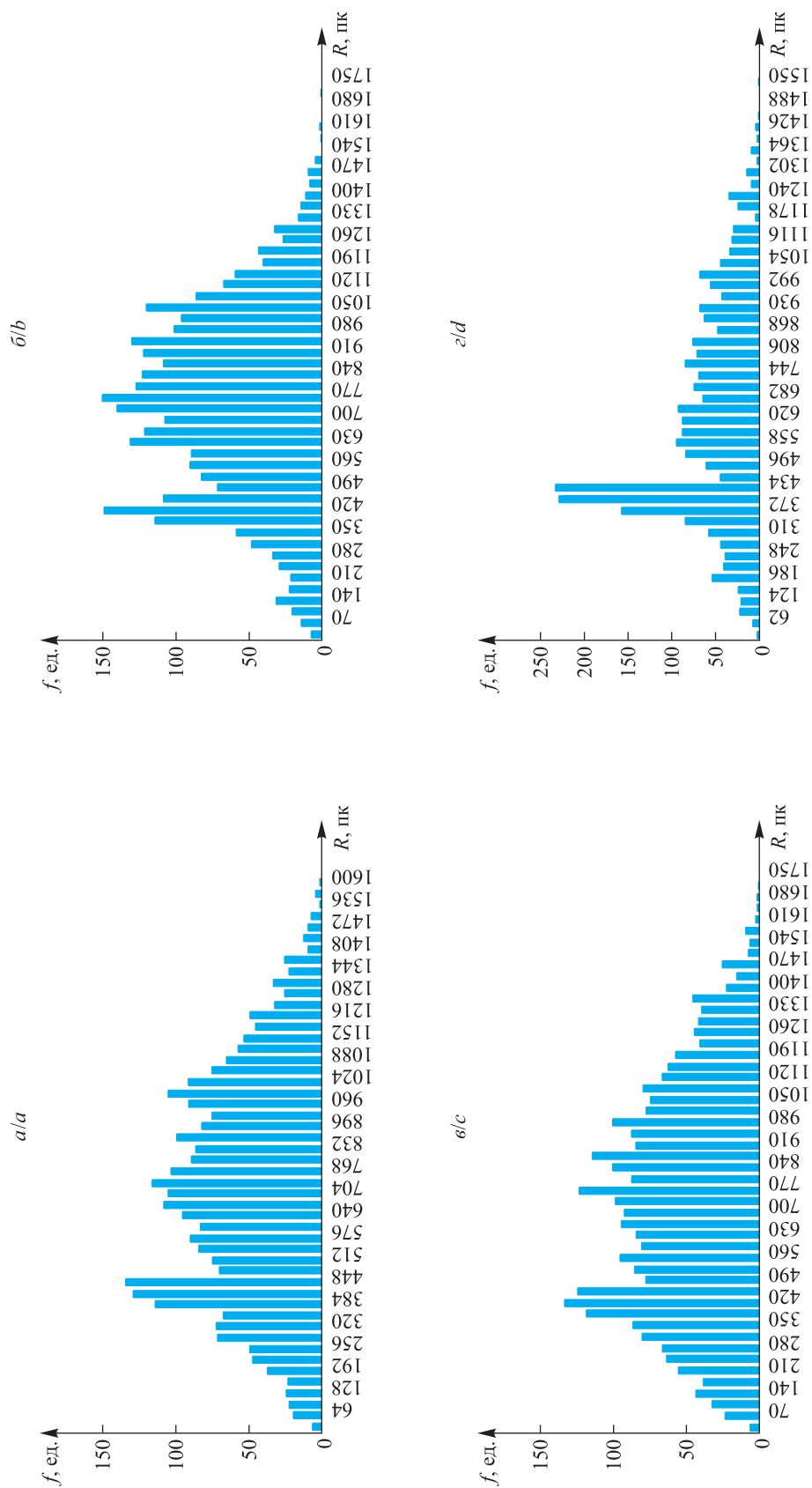


Рис. 1. Гистограммы распределения длин отрезков, соединяющих центры совпадающих областей, построенные с помощью различных детекторов и вычислителей дескрипторов:  
 $a$  – BRISK;  $b$  – ORB;  $c$  – SURF;  $d$  – комбинация методов ORB и FREAK

Fig. 1. Histograms of the distribution of the lengths of the segments that connect matches built using various detectors and descriptor calculators:  
 $a$  – BRISK;  $b$  – ORB;  $c$  – SURF;  $d$  – ORB and FREAK combination

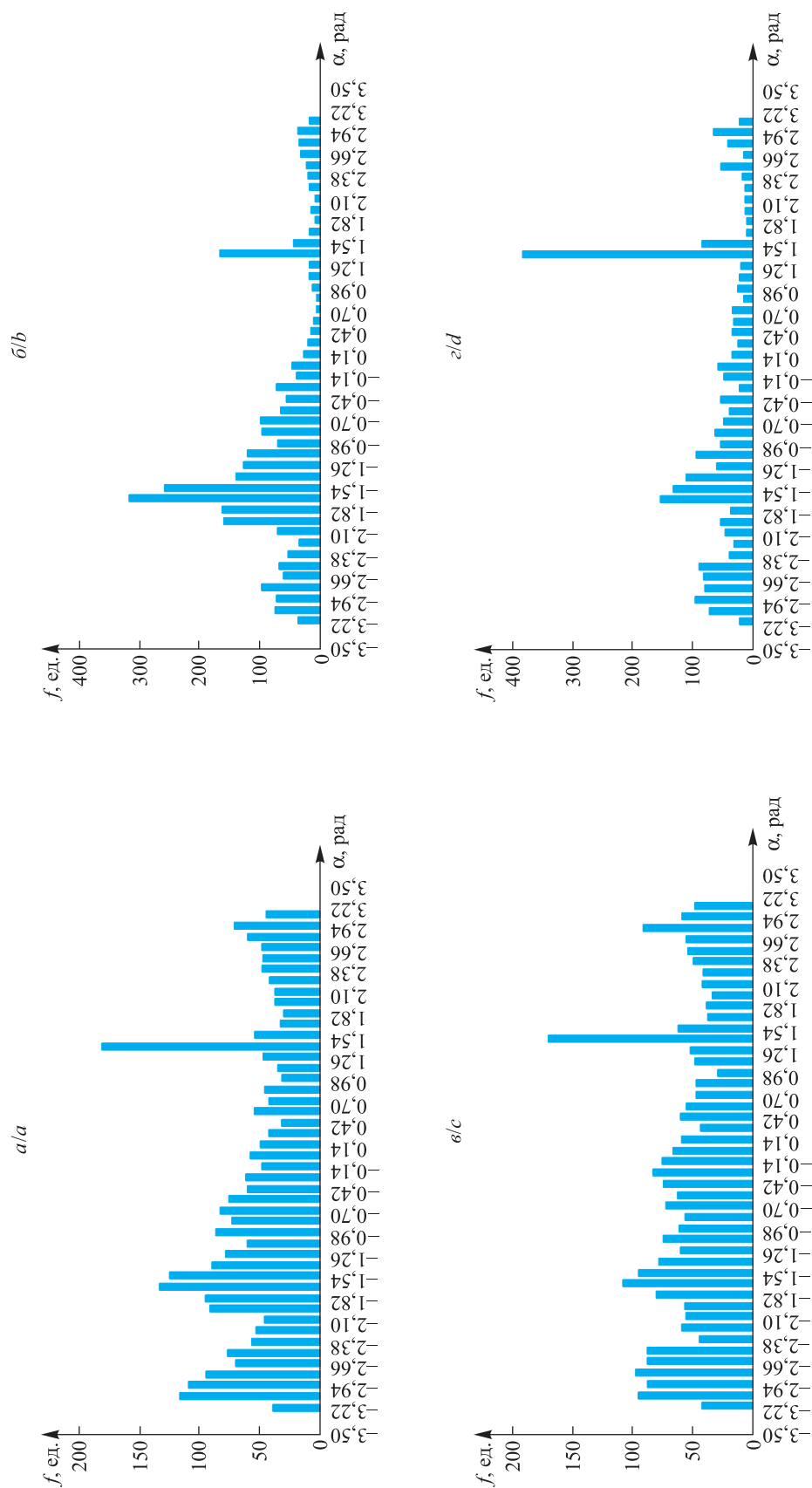


Рис. 2. Гистограммы распределения углов наклона отрезков, соединяющих центры особых областей, построенные с помощью различных детекторов и вычислителей дескрипторов:  
 $a$  – BRISK;  $b$  – ORB;  $c$  – SURF;  $d$  – комбинация методов ORB и FREAK

Fig. 2. Histograms of the distribution of the slope angles of the segments that connect matches built using various detectors and descriptor calculators:  
 $a$  – BRISK;  $b$  – ORB;  $c$  – SURF;  $d$  – ORB and FREAK combination

Преимущество комбинации методов ORB и FREAK сохраняется при анализе всего ряда данных. Качество выделения особых областей определялось как выраженность моды (процент совпадений особых точек в пиковом интервале от общего числа совпадений по паре изображений). При использовании комбинации методов ORB и FREAK в проанализированных данных этот параметр был на 26; 23 и 21 % выше, чем при использовании методов BRISK, SURF и ORB соответственно.

Также стоит отметить, что на результат поиска особых областей влияет и метод сравнения дескрипторов. В ходе анализа выявлено, что метод Хэмлинга в среднем на 3 % повышает пик в распределении особых признаков по сравнению с методом прямого перебора. Таким образом, в дальнейшем процессе обработки использовалась комбинация методов ORB и FREAK, а также метод сравнения дескрипторов Хэмлинга.

Результат совмещения каналов мультиспектрального изображения представлен на рис. 3 в виде сопоставления изображения исходного состояния одного из каналов и мультиспектральных изображений до и после совмещения (наложение всех каналов с прозрачностью 50 %).

Как видно из рис. 3, четкость изображения после процедуры совмещения каналов близка к четкости в каналах исходного изображения и существенно выше четкости исходного мультиспектрального изображения (эксперименты по определению численных значений изменения четкости изображений на текущий момент не проводились). Таким образом, описанный метод позволяет избегать существенных потерь четкости при формировании мультиспектрального изображения. В то же время стоит отметить, что некоторые потери четкости все же присутствуют. Основной вклад в такие потери вносит канал с центральной длиной волны 840 нм. Как описано выше, суть алгоритма состоит в привязке особых точек изображений каналов к особым точкам RGB-изображения, преобразованного в оттенки серого. Однако фактически в спектральном отношении RGB-изображение и канал с центральной длиной волны 840 нм не имеют области пересечения, поэтому слабо коррелируют между собой. Например, в ИК-области коэффициенты спектральной яркости растительности существенно выше, чем в видимой области, из-за чего изображения в каналах 840 и 450 нм существенно отличаются.

При переходе к этапу объединения изображений в мультиспектральное панорамное изображение описанный метод показывает хорошие результаты, позволяя в автоматическом режиме получать сшитые RGB-изображения высокого качества (рис. 4, а).

Также в качестве примера визуализации данных на рис. 4, б, представлена тепловая карта, полученная на основе расчета нормализованного относительного индекса растительности [8]:

$$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{red}}{R_{NIR} + R_{red}},$$

где  $R_{NIR}$  – яркость пикселей в канале 840 нм;  $R_{red}$  – яркость пикселей в канале 650 нм.

Диапазон яркостей был преобразован таким образом, чтобы тепловая карта показывала максимальные различия значений индекса в областях изображения, где его величина варьируется от 0 до 0,5.

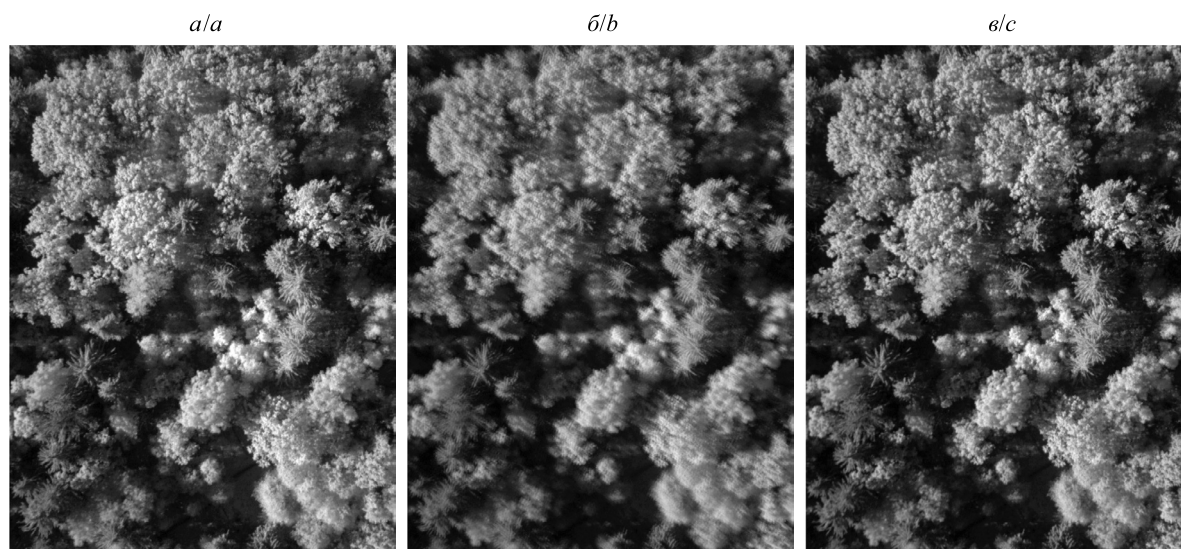


Рис. 3. Результат совмещения каналов мультиспектрального изображения:  
а – исходное изображение канала 730 нм; б – наложение всех каналов с прозрачностью 50 % в исходном изображении; в – наложение всех каналов с прозрачностью 50 % в измененном изображении

Fig. 3. The result of the multispectral image bands merging:  
а – the original image of the 730 nm band; б – the overlay of all of the bands with a transparency of 50 % in the original image; в – the overlay of all of the bands with a transparency of 50 % in the modified image



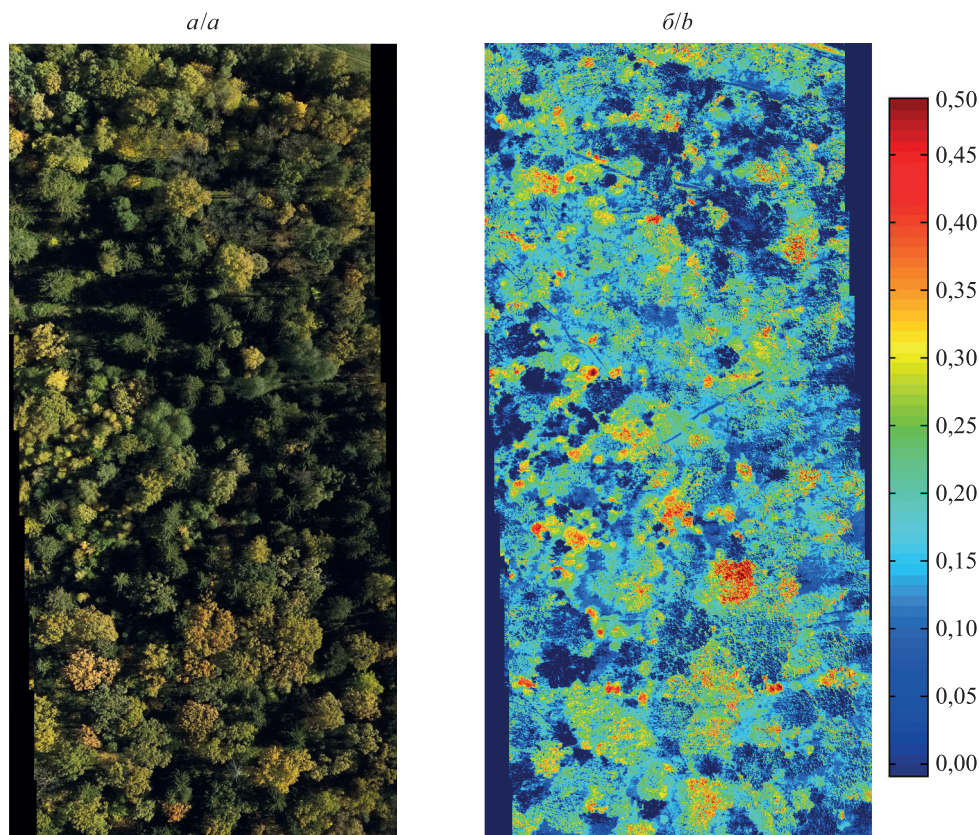


Рис. 4. Результат автоматической генерации панорамного изображения:  
 $a$  – панорамное RGB-изображение;  $b$  – тепловая карта на основе расчета  
нормализованного относительного индекса растительности

Fig. 4. The result of panoramic image automatic generation:  
 $a$  – panoramic RGB image;  $b$  – heat map based on the normalised  
difference vegetation index calculation

Несмотря на визуально достаточно высокое качество результата обработки, в данной части при решении задачи сшивки изображений леса проявляются особенности, связанные с влиянием на результат ветровой обстановки в процессе измерений. Так, вследствие наличия ветра в примерно 5 % случаев в экспериментальных данных проявлялась ситуация, когда в близлежащих кадрах относительное смещение крон деревьев и подстилающей поверхности было различным. Поэтому одним из ограничений на применение данного алгоритма для регистрации участков лесных массивов с малых высот является условие практически полного отсутствия ветра при проведении измерений.

Для оценки качества работы метода и влияния учета эффекта дисторсии на результат сшивки на ряде пар изображений было выделено в общей сложности более 10 000 соответствий особых точек, определенных с помощью детектора ORB и описанных с использованием дескриптора FREAK. После этого было рассчитано среднеквадратичное отклонение относительного смещения особых точек в зонах перекрытия изображений по результатам сшивки. Среднеквадратичное отклонение смещения между особыми точками при совмещении данных без учета дисторсии съемочной аппаратуры составило 5,20 пк, а с учетом дисторсии – 4,55 пк. Таким образом, при учете дисторсии съемочной аппаратуры среднеквадратичное отклонение смещения уменьшается на 12,5 %.

Для полноценного анализа (в том числе мультитременного) мультиспектральных изображений важно, чтобы входные данные для анализа были представлены в физических величинах (например, коэффициенты спектральной яркости). В частности, это возможно при использовании специализированных методик, основанных на наличии спутниковых мультиспектральных данных, где представлены снимки исследуемой территории, зарегистрированные синхронно с проведением эксперимента [9]. Также существует теоретическая возможность коррекции данных за счет применения дополнительных приборов (спектрометров либо мультиспектральных камер), осуществляющих контроль оптических параметров атмосферы во время проведения эксперимента по съемке подстилающей поверхности, что и является направлением для дальнейших исследований.

## Заключение

Таким образом, методы, основанные на использовании детекторов и дескрипторов особых областей, хорошо справляются с задачей связывания каналов в мультиспектральных изображениях, а также с задачей сшивки изображений в панораму. Среди исследованных методов при анализе изображений лесного массива наилучшим образом себя проявляет комбинация детектора ORB, дескриптора FREAK и метода сопоставлений Хэмлинга.

При условии учета параметров дисторсии камеры среднеквадратичное отклонение смещения между точками соседних изображений при формировании панорамного изображения уменьшается в среднем на 12,5 %. Предложенный способ фильтрации по особым метрикам позволяет автоматизировать сшивку мультиспектральных изображений лесного массива.

Описанный трехэтапный метод автоматического получения панорамных мультиспектральных изображений при решении задачи сшивки ряда мультиспектральных изображений, полученных с использованием БПЛА, позволяет осуществлять сшивку изображений со средней точностью до 5 пк.

## Библиографические ссылки

1. Lu H, Fan T, Ghimire P, Deng L. Experimental evaluation and consistency comparison of UAV multispectral minisensors. *Remote Sensing*. 2020;12(16):2542. DOI: 10.3390/rs12162542.
2. Лосев СВ. Устойчивость метода фазовой корреляции к возмущающим воздействиям при создании панорамных цифровых изображений. *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2015;58(11):908–914. DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-11-908-914.
3. Кэлер А, Брэдки Г. *Изучаем OpenCV 3*. Слинкин АА, переводчик; Мовчан Д, редактор. Москва: ДМК Пресс; 2017. 826 с.
4. Джгаркава ГМ, Лавров ДН. Использование метода SURF для обнаружения устойчивых признаков изображения при создании сферических панорамных снимков. *Математические структуры и моделирование*. 2011;22:95–100.
5. Макаров АС, Болсуновская МВ. Сравнительный анализ методов обнаружения особых точек на изображениях при различных уровнях освещения. *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление*. 2018;11(2):7–18. DOI: 10.18721/JCSTCS.11201.
6. Пахирка АИ, Зотин АГ, Буряченко ВВ. Создание панорамных аэрофотоснимков с использованием квадрокоптера. *Программные продукты и системы*. 2018;31(2):362–367. DOI: 10.15827/0236-235X.122.362-367.
7. Тассов КЛ, Федотов АЛ. Формирование панорамных изображений от камер видеорегистрации автомобильного потока. *Научное издание МГТУ имени Н. Э. Баумана. Наука и образование* [Интернет]. 2012 [процитировано 20 марта 2022 г.];7: 223–230. Доступно по: <https://cyberleninka.ru/article/n/formirovanie-panoramnyh-izobrazheniy-ot-kamer-videoregistratsii-avtomobilnogo-potoka/viewer>.
8. Tucker CJ. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*. 1979;8(2):127–150. DOI: 10.1016/0034-4257(79)90013-0.
9. Gowravaram S, Chao H, Molthan A, Zhao T, Tian P, Flanagan H, et al. Spectral reflectance estimation of UAS multispectral imagery using satellite cross-calibration method. *GSICS Quarterly*. 2022;15(4):3–5.

## References

1. Lu H, Fan T, Ghimire P, Deng L. Experimental evaluation and consistency comparison of UAV multispectral minisensors. *Remote Sensing*. 2020;12(16):2542. DOI: 10.3390/rs12162542.
2. Losev SV. Resistance of phase correlation method to disturbances at creating of panoramic digital images. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie*. 2015;58(11):908–914. Russian. DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-11-908-914.
3. Kaehler A, Bradski G. *Learning OpenCV 3*. Loukides M, editor. Sebastopol: O'Reilly Media; 2016. 1022 p.  
Russian edition: Kaehler A, Bradski G. *Izuchaem OpenCV 3*. Slinkin AA, translator; Movchan D, editor. Moscow: DMK Press; 2017. 826 p.
4. Dzhgarkava GM, Lavrov DN. [Using the SURF method to identify stable image features when detecting spherical panoramic observations]. *Matematicheskie struktury i modelirovanie*. 2011;22:95–100. Russian.
5. Makarov AS, Bolsunovskaya MV. Comparative analysis of methods for detecting special points in images at different levels of illumination. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control Systems*. 2018;11(2):7–18. Russian. DOI: 10.18721/JCSTCS.11201.
6. Pahirka AI, Zotin AG, Buryachenko VV. Creation panoramic aerial images from quadcopter. *Software & Systems*. 2018;31(2):362–367. Russian. DOI: 10.15827/0236-235X.122.362-367.
7. Tassov KL, Fedotov AL. Formation of panoramic images from cameras of video recording of a car stream. *Scientific Periodical of the Bauman MSTU. Science and Education* [Internet]. 2012 [cited 2022 March 20];7:223–230. Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/formirovanie-panoramnyh-izobrazheniy-ot-kamer-videoregistratsii-avtomobilnogo-potoka/viewer>. Russian.
8. Tucker CJ. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*. 1979;8(2):127–150. DOI: 10.1016/0034-4257(79)90013-0.
9. Gowravaram S, Chao H, Molthan A, Zhao T, Tian P, Flanagan H, et al. Spectral reflectance estimation of UAS multispectral imagery using satellite cross-calibration method. *GSICS Quarterly*. 2022;15(4):3–5.