

УДК 621.391

## ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ МЕТОДА ОПТИЧЕСКОЙ НАВИГАЦИИ VIOLETM В УСЛОВИЯХ АНТРОПОГЕННЫХ ЛАНДШАФТОВ

В.В. ЧЕПИКОВА, К.А. ВОЛКОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь**РУП «НПЦ многофункциональных беспилотных комплексов» НАН Беларуси, Республика Беларусь**Поступила в редакцию 1 ноября 2018*

**Аннотация.** Предложен способ оценки применимости методов оптической навигации с использованием спутниковых снимков местности. Осуществлена программная реализация этого способа. Предложен метод визуальной итеративной одометрии и локации с использованием карты окружающего ландшафта. Проведено исследование практической реализации данного метода в условиях антропогенных ландшафтов и приведена карта его применимости для автоматического определения координат беспилотных летательных аппаратов на территории г. Минска.

*Ключевые слова:* беспилотный летательный аппарат, оптическая навигация, VIOLETM.

### Введение

Задача автоматического позиционирования и движения беспилотных летательных аппаратов (БЛА) по оптическим ориентирам на местности имеет большое значение, поскольку в настоящее время сфера их практического применения ограничена условиями уверенного приема радиосигналов систем глобального позиционирования (GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou и др. [1]) или сигналов управления оператора. Существующие альтернативные решения для одометрии на основе бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) характеризуются высокими весом и стоимостью [2] и при этом не обеспечивают достаточной точности исчисления координат в условиях длительного полета. Авторами предложен метод визуальной итеративной одометрии и локации с использованием карты окружающего ландшафта VIOLETM (Visual Iterative Odometry and Location using Environmental Terrain Map). В статье приводятся результаты исследования возможности его практического применения в условиях антропогенных ландшафтов и городской застройки.

### Анализ условий моделирования

Существующие системы оптической навигации основаны на сопоставлении изображения, полученного с помощью бортовой фотокамеры, с известной цифровой моделью местности, над которой производится полет. При этом модель местности может быть как статичной (известной заранее по результатам спутниковой или аэрофотосъемки с последующей геопривязкой), так и динамически сформированной в процессе движения БЛА [3–5].

Сопоставление изображения модели местности с изображениями, полученными с помощью бортовой фотокамеры, в общем случае имеет ряд трудностей, обусловленных следующими факторами.

1. Наличие некомпенсированных оптических искажений на изображениях [6, 7] и артефактов цифровой компрессии [8, 9].

2. Наличие перспективных отличий из-за различных точек съемки [6].

3. Различие в форме теней объектов на изображениях из-за отличающихся условий освещенности и атмосферных явлений [10].

4. Различие в цветовой гамме, яркости и контрастности изображений из-за различных условий освещенности, атмосферных явлений, настроек и параметров съемочного оборудования [10–12].

5. Изменения в ландшафте, обусловленные естественными процессами и человеческой деятельностью.

6. Неточность определения пространственного разрешения снимка и углового положения оптической оси камеры из-за погрешностей бортовых датчиков БЛА.

7. Отсутствие на изображениях характерных контрастных фрагментов и контуров [12].

Следовательно, для практического применения любого метода оптической навигации важнейшим условием является его стабильная работа с учетом вышеперечисленных факторов. Поскольку целью описываемого эксперимента является оценка применимости метода VIOLETM для различных типов подстилающей поверхности в пределах антропогенных зон, а не его чувствительности к вариативности датчиков высоты и поворота, были приняты допущения, что камера БЛА направлена в надир и известны точное направление по азимуту и высота съемки. Приведенные допущения позволили при моделировании использовать в качестве источников изображений для камеры и опорного фотоплана подстилающей поверхности существующие тайловые базы геопривязанных космоснимков [13], сделанных в различное время года и дня. Для проведения эксперимента авторами применялись снимки, представленные в открытых источниках Google и Yandex, а именно, снимки территории г. Минска и его окрестностей общей площадью около 560 кв. км с координатами 53,80° СШ, 27,35° ЗД – 53,98° СШ, 27,76° ЗД (рис. 1). Разрешение снимков – 0,70 и 1,40 м/пикс.

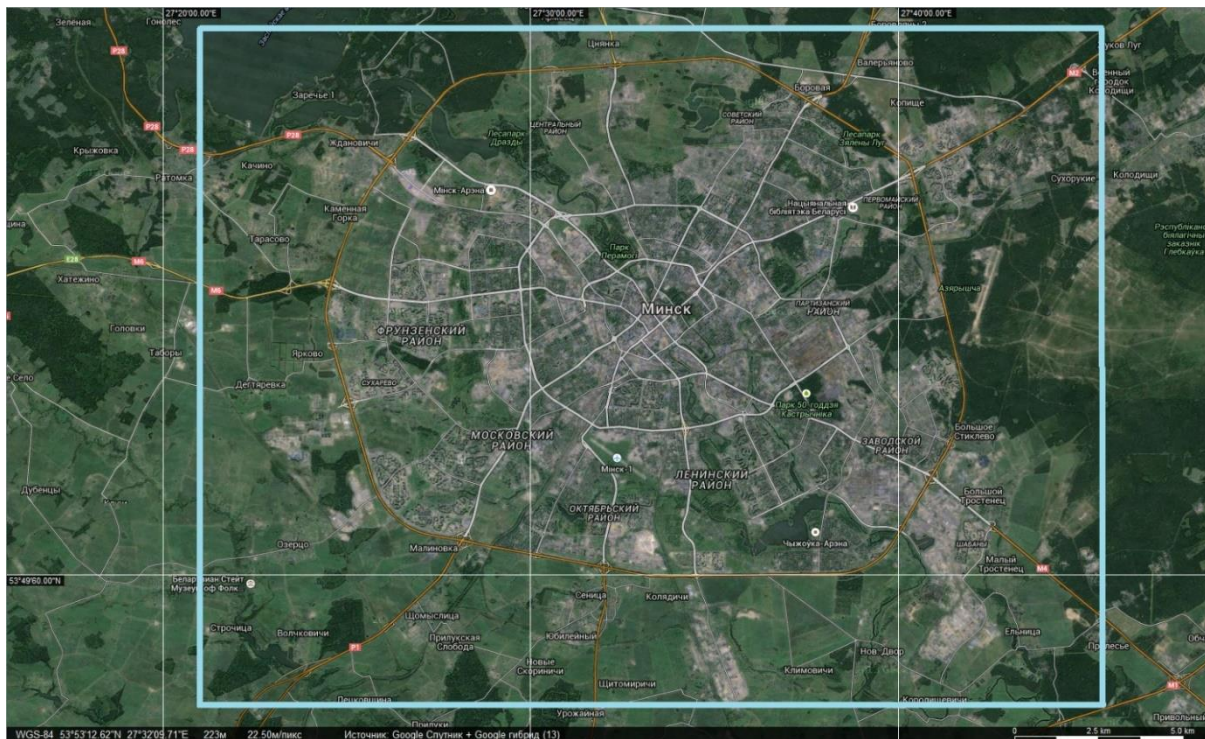


Рис. 1. Фрагмент фотоплана для исследования метода VIOLETM

### Исследование работы метода

Для исследования работы метода VIOLETM была спроектирована и реализована программная система (рис. 2), состоящая из 6 основных блоков. Блок 1 используется для ввода параметров задания для моделирования: границ анализируемой территории, пиксельного размера и разрешения изображений камеры и фрагмента опорного фотоплана, используемых источников тайлов, периодичности проведения измерений (шаг по широте и долготе). Блок 2

осуществляет управление процессом моделирования на основе сформированного задания. По сигналам, полученным от Блока 2, в Блоке 4 проводится формирование изображения подстилающей поверхности для заданных координат местности с заданным размером. В Блоке 5 аналогичным образом формируется изображение для бортовой камеры, так чтобы географические координаты центров изображений совпадали. Исходные графические данные в виде тайлов спутниковых снимков поступают из Блока 3 в Блоки 4 и 5. Полученная пара изображений из Блоков 4 и 5 передается в Блок 6, реализующий логику метода VIOLETM в части определения взаимного смещения изображений (без учета возможности их взаимного поворота и масштабирования). Полученные результаты в виде определенного пиксельного смещения изображений и времени его вычисления передаются в Блок 7 для представления в табличном и графическом виде.

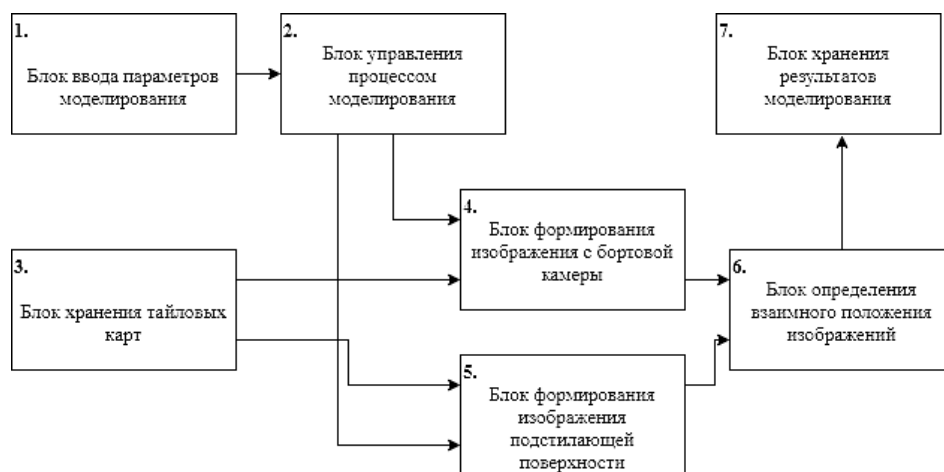


Рис. 2. Система исследования работы метода VIOLETM с использованием тайловых спутниковых снимков

При моделировании размер изображения бортовой камеры был принят равным  $720 \times 576$  пикселей, поскольку он поддерживается большинством распространенных видеокамер. Размер изображения подстилающей поверхности выбран с учетом собранных авторами статистических экспериментальных данных о погрешности расчета положения БЛА, движущегося с использованием БИНС. В таблице приведены параметры для четырех проведенных вычислительных экспериментов.

#### Параметры вычислительных экспериментов

Номер эксперимента	1	2	3	4
Пиксельное разрешение изображений, м/пиксель	0,70	0,70	1,40	1,40
Размер изображения с камеры, пиксели	$720 \times 576$	$720 \times 576$	$720 \times 576$	$720 \times 576$
Размер изображения с камеры на местности, м	$504 \times 403$	$504 \times 403$	$1008 \times 806$	$1008 \times 806$
Источник изображения с камеры	Google Satellite	Yandex Satellite	Google Satellite	Yandex Satellite
Размер изображения подстилающей поверхности, пиксели	$3000 \times 3000$	$3000 \times 3000$	$3000 \times 3000$	$3000 \times 3000$
Размер изображения подстилающей поверхности на местности, м	$2100 \times 2100$	$2100 \times 2100$	$4200 \times 4200$	$4200 \times 4200$
Источник изображения подстилающей поверхности	Yandex Sattelite	Google Sattelite	Yandex Sattelite	Google Sattelite
Интервал между измерениями по широте	$1 / 400^\circ$	$1 / 400^\circ$	$1 / 200^\circ$	$1 / 200^\circ$
Интервал между измерениями по долготе	$1 / 200^\circ$	$1 / 200^\circ$	$1 / 100^\circ$	$1 / 100^\circ$

Моделирование осуществлялось с использованием одного потока на 4-ядерном процессоре Intel Core i5-6500 3,20 ГГц, 8 ГБ ОЗУ, программа скомпилирована компилятором MinGW 5.3.0 32bit с опцией оптимизатора -O2. На рис. 3 представлено распределение вероятности времени обработки одного кадра алгоритмом VIOLETM. В среднем, время обработки составило 240 с.

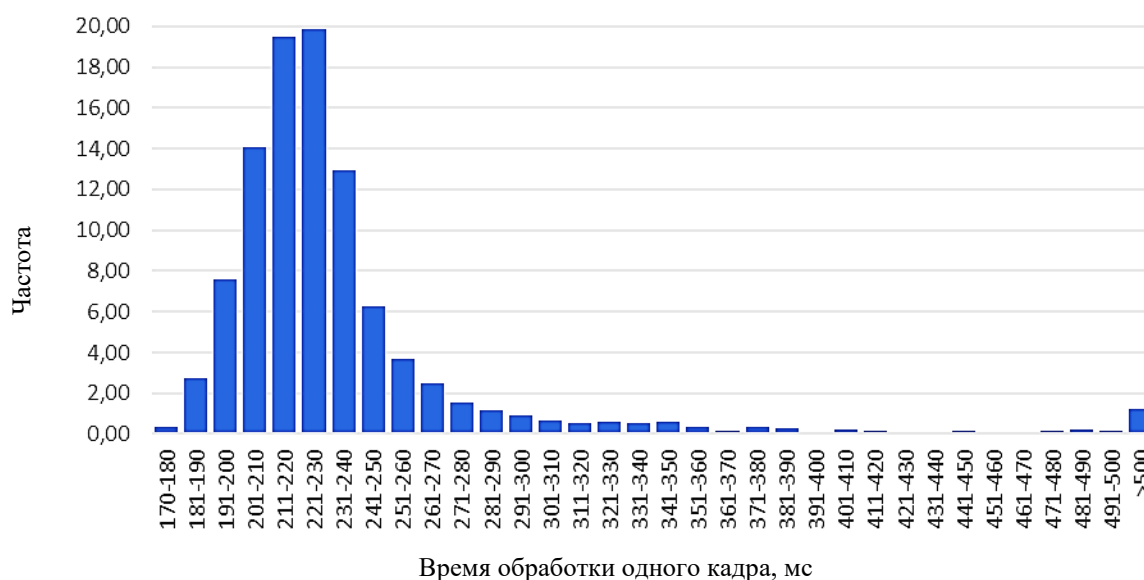


Рис. 3. Распределение вероятности времени обработки одного кадра

Согласно условиям эксперимента, изображения бортовой камеры и подстилающей поверхности имеют одинаковые географические координаты, поэтому в идеальном случае алгоритм должен определить, что взаимное смещение изображений равно нулю. Однако на практике, в силу описанных выше причин, значение смещения обычно отлично от нуля и может считаться погрешностью. На рис. 4, 5 приведена гистограмма распределения смещений для экспериментов № 1 и № 3. Для остальных экспериментов она носит аналогичный характер. Статистический анализ полученных результатов совместно с визуальной оценкой изображений, имеющих значительные смещения, позволяет сделать вывод о том, что смещение между парой изображений менее 20 пикселей может быть вызвано особенностями местности и условий фотосъемки, а большее смещение однозначно свидетельствует о невозможности определения взаимного расположения изображений исследуемым методом (рис. 6).

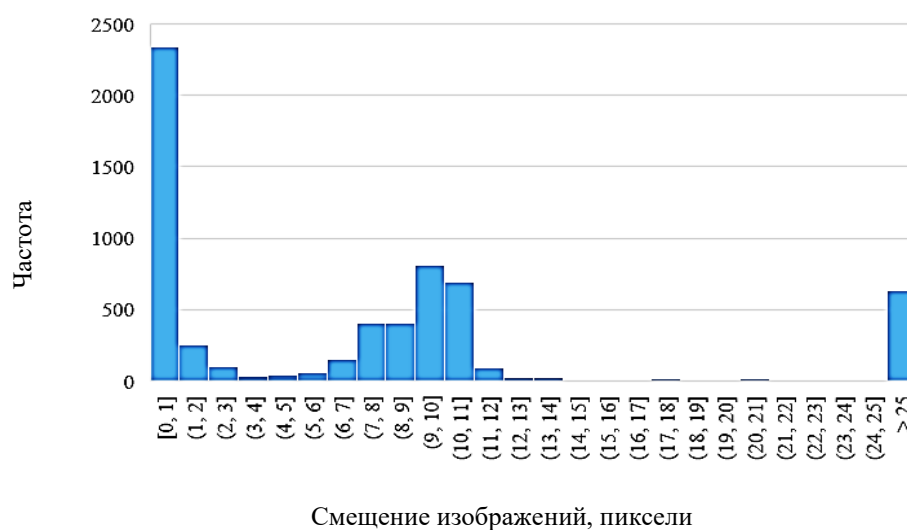


Рис. 4. Пиксельная погрешность совмещения изображений бортовой камеры и подстилающей поверхности (эксперимент № 1)

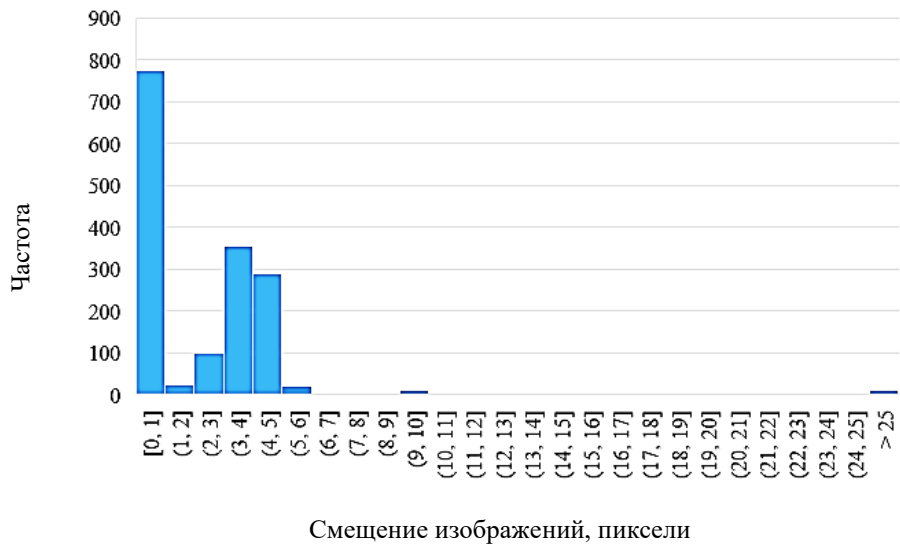


Рис. 5. Пиксельная погрешность совмещения изображений бортовой камеры и подстилающей поверхности (эксперимент № 3)

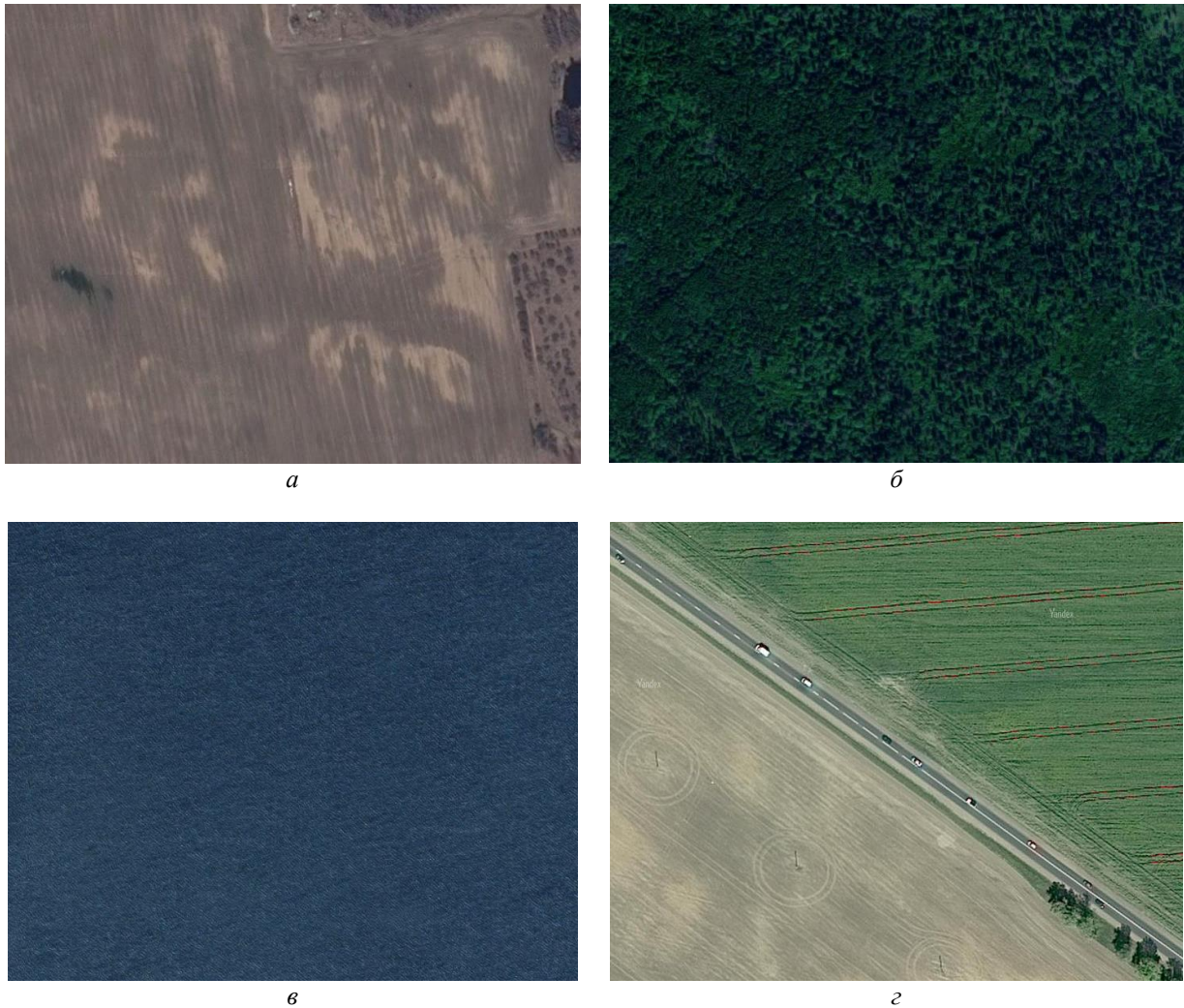


Рис. 6. Примеры участков местности с невозможной оптической навигацией:  
*а* – сельскохозяйственные поля; *б* – лесные массивы;  
*в* – поверхность водоемов; *г* – прямолинейные участки трасс

С учетом найденного порогового ограничения на величину ошибки совмещения по результатам вычислительных экспериментов были составлены карты применимости исследуемого метода в условиях антропогенных ландшафтов г. Минска (рис. 7).

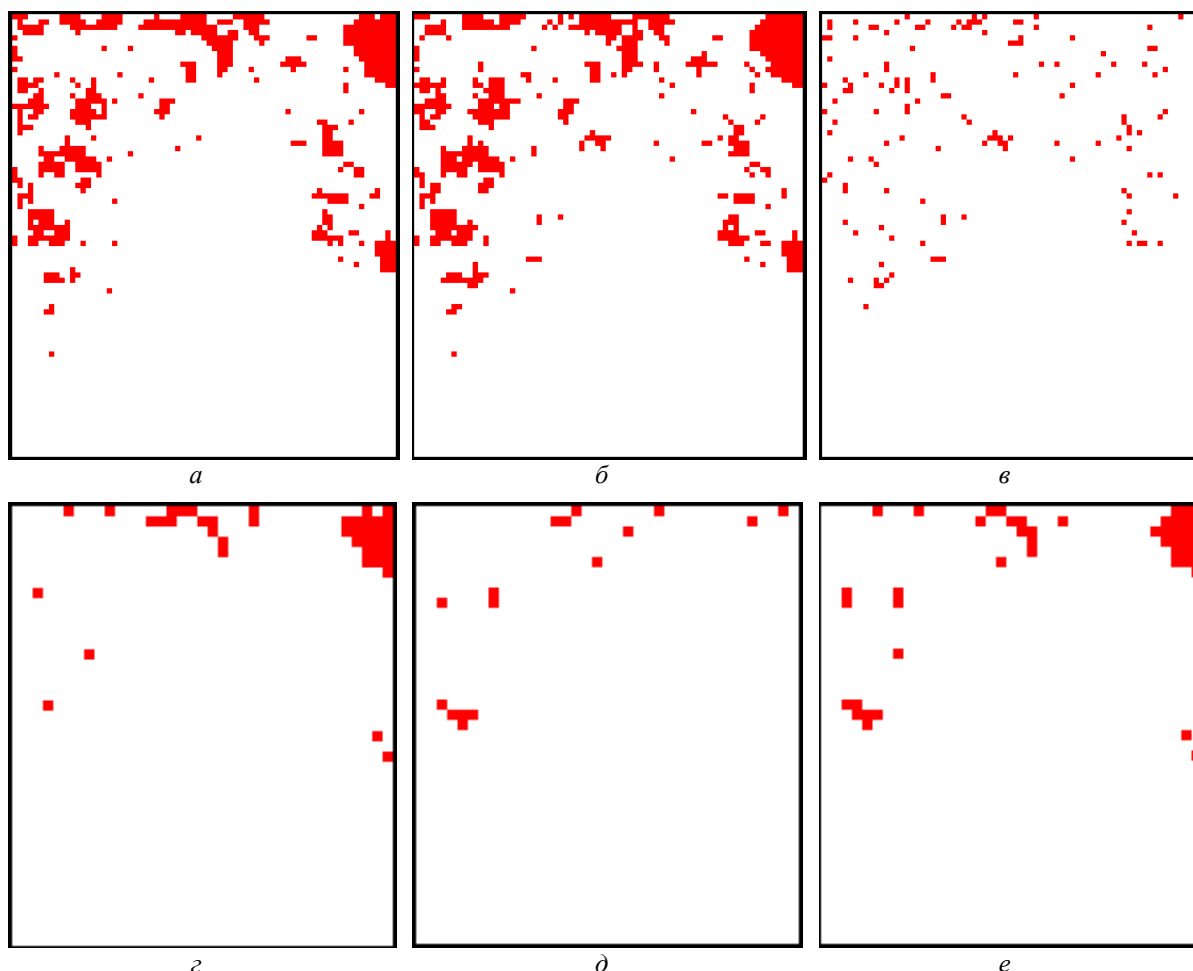


Рис. 7. Карта применимости метода VIOLETM для автоматического определения координат БЛА на территории г. Минска: *а* – эксперимент № 1; *б* – эксперимент № 2; *в* – бинарное различие результатов экспериментов № 1 и 2; *г* – эксперимент № 3; *д* – эксперимент № 4; *е* – бинарное различие результатов экспериментов № 3 и 4

На основе анализа полученных данных можно сделать вывод о том, что метод VIOLETM позволяет осуществлять точное определение положение БЛА на 90 % территории с антропогенной застройкой при разрешении изображения 0,70 м/пиксель и на 95 % – при разрешении 1,40 м/пиксель. При этом использование нескольких опорных фотопланов позволяет дополнительно повысить надежность автоматического позиционирования БЛА.

### Заключение

В работе проведено моделирование работы метода VIOLETM с использованием тайловых баз спутниковых снимков антропогенных ландшафтов. Результаты эксперимента показывают, что точность вычисления координат на местности достигает 20–30 м и обеспечивает возможность применения данного метода для автономного движения БЛА. При этом частота пересчета координат составляет более 3 Гц. С помощью представленной методики возможно проведение дополетного планирования маршрута движения БЛА с учетом зон, непригодных для определения координат предложенным методом.

# ESTIMATION OF THE APPLICABILITY OF VIOLETM OPTICAL NAVIGATION METHOD IN THE CONDITIONS OF ANTHROPOGENIC LANDSCAPES

V.V. CHEPIKOVA, K.A. VOLKOV

**Abstract.** The way of modeling of the applicability of optical navigation methods using satellite images is proposed. It's software implementation is carried out. A method of visual iterative odometry and location using a map of the surrounding landscape is proposed. A study of the practical implementation of this method in the conditions of anthropogenic landscapes is conducted and a map of its applicability for automatic determination of the coordinates of the unmanned aerial vehicle in the city of Minsk is given.

*Keywords:* unmanned aerial vehicle, optical navigation, VIOLETM

## Список литературы

1. Косова А.Е., Корилов А.М. // Докл. ТУСУР. 2017. № 3. С.191–196.
2. Доросинский Л.Г., Богданов Л.А. // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 5. С.69–72
3. Cadena [etc.] //IEEE Transactions on Robotics. 2016. № 32 (6). P.1309–1332.
4. Jaulin L. // IEEE Transactions on Robotics. 2011. P. 282–287.
5. Ардентов А.А. [и др.] Программные системы: теория и приложения. 2012. Т. 3. № 3-1 (12). С. 23–38.
6. Русинов М.М. Композиция оптических систем. Л., 1989.
7. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Оптика. М., 1985.
8. Дж. Миано. Форматы и алгоритмы сжатия изображений в действии. М.,2003.
9. Сэломон Д. Сжатие данных, изображений и звука. М., 2004.
10. Иофис Е.А. Фотокинетика. М., 1981.
11. Волосов Д.С. Фотографическая оптика. М., 1978.
12. Герман Е.В. Алгоритмы совмещения разнородных изображений в бортовых системах визуализации, диссертация на соискание ученой степени кандидата тех. наук. Рязань, 2014.
13. Волков К.А. [и др.] // Телекоммуникации: сети и технологии, алгебраическое кодирование и безопасность данных: материалы международного научно- технического семинара. В 2 ч. Ч. 1 Минск, 2016. – С. 31–37