

ЗАЩИТА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ENVIRONMENTAL DEFENCE

DOI 10.22363/2313-2310-2020-28-4-381-396

УДК 528.735

Научная статья / Scientific article

Оценка точности геопозиционирования снимков в линейных проектах при различном количестве маршрутов

А.М. Елшештави^{1,2}  , А.Н. Лимонов² ,
Л.А. Гаврилова² , М.А. Елшеви^{1,2} 

¹ Университет Аль-Азхар,

Арабская Республика Египет, пров. Каир, Эль-Дарб эль-Ахмар, ул. Мохаммеда Абду, д. 15

² Государственный университет по землеустройству,

Российская Федерация, 105064, Москва, ул. Казакова, д. 15

 amrshesht82@gmail.com

Аннотация. В настоящее время для экологических исследований широко используются результаты фотограмметрической обработки снимков, полученных с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), – ортофотопланы, цифровые модели рельефа и т. п. Такие материалы особенно актуальны и востребованы при экологическом мониторинге труднодоступных объектов. Кроме того, материалы съемки с БПЛА незаменимы при импактном мониторинге, когда проводятся наблюдение, оценка и прогноз состояния природной среды в районах расположения опасных и потенциально опасных (АЭС) источников антропогенного воздействия. Независимо от способа геопозиционирования снимков – прямого или косвенного – оценка точности созданного продукта выполняется по наземным контрольным точкам. Цель исследования – оценить точность фотограмметрических построений в зависимости от количества маршрутов при съемке с БПЛА линейных объектов и от количества опорных точек, используемых при косвенном геопозиционировании. Проведено пять групп экспериментов по три в каждой группе с различным количеством маршрутов (от одного до трех). Пять групп условно объединены в две секции. В первой секции использовались методы прямого и косвенного геопозиционирования с тремя локально расположенными опорными точками. Во второй секции использовался метод косвенного геопозиционирования с различным количеством опорных точек: шестью, двенадцатью и тридцатью четырьмя. Оценки точности различных тестов показали, что не всегда увеличение количества маршрутов ведет к повышению точности.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, одномаршрутная аэросъемка, двухмаршрутная аэросъемка, прямое геопозиционирование, косвенное геопозиционирование, наземные контрольные точки, точность геопозиционирования

© Елшештави А.М., Лимонов А.Н., Гаврилова Л.А., Елшеви М.А., 2020



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

История статьи: поступила в редакцию 11.09.2020; принята к публикации 30.09.2020.

Для цитирования: *Елиештави А.М., Лимонов А.Н., Гаврилова Л.А., Елишеви М.А.* Оценка точности геопозиционирования снимков в линейных проектах при различном количестве маршрутов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2020. Т. 28. № 4. С. 381–396. <http://dx.doi.org/10.22363/2313-2310-2020-28-4-381-396>

Assessing the georeferencing accuracy of different amount of image stripes for linear UAV projects

Amr Mahmoud El Sheshtawy^{1,2}  , Anatoly N. Limonov² ,
Larisa A. GavriloVA² , Mohamed A. Elshewy^{1,2} 

¹*Al-Azhar University,
15 Mohammed Abdou St, El-Darb El-Ahmar, Cairo Governorate, Arab Republic of Egypt*

²*State University of Land Use Planning,
15 Kazakova St, Moscow, 105064, Russian Federation*

 amrshesht82@gmail.com

Abstract. At present, the results of photogrammetric processing of images obtained from UAVs (orthophoto mosaics, digital elevation models, etc.) are widely used for environmental studies. Such materials are especially relevant and in demand for environmental monitoring of hard-to-reach objects. In addition, UAV survey materials are indispensable for impact monitoring, in which observation, assessment and forecast of the state of the natural environment in areas where hazardous and potentially hazardous (NPP) sources of anthropogenic impact are located are carried out. Regardless of the method of georeferencing of images – direct or indirect – the accuracy of the generated product is evaluated by ground control points. The purpose of this study is to assess the accuracy of photogrammetric constructions depending on the number of strips when surveying linear objects from UAVs and on the number of control points used in indirect georeferencing. Five groups of experiments were carried out during the study, three in each group with a different number of strips (from one to three). Five groups are conventionally combined into two sections. In the first section, direct and indirect georeferencing techniques were used with three locally located control points. In the second section, the method of indirect georeferencing was used with a different number of ground control points: six, twelve and thirty-four. Estimates of the accuracy of various tests have shown that an increase in the number of strips does not always lead to an increase in accuracy.

Keywords: unmanned aerial vehicles, single-strip aerial survey, two-strip aerial survey, direct georeferencing, indirect georeferencing, ground control points, georeferencing accuracy

Article history: received 11.09.2020; revised 30.09.2020.

For citation: El Sheshtawy AM, Limonov AN, GavriloVA LA, Elshewy MA. Assessing the georeferencing accuracy of different amount of image stripes for linear UAV projects. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2020;28(4):381–396. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.22363/2313-2310-2020-28-4-381-396>

Введение

В последнее время аэрофотоснимки, получаемые с беспилотных летательных аппаратов, находят применение в различных областях хозяйственной деятельности, таких как управление природными ресурсами, пространствен-

ная экология, экологический мониторинг и т. п. [1–3]. Трехмерное (3D) моделирование окружающей среды с помощью цифровых фотограмметрических систем вызывает растущий интерес как в научной сфере, так и на производстве. В большинстве случаев информация, содержащаяся на снимках с БПЛА, требует геопространственной привязки. БПЛА, используемые в качестве носителей съемочной аппаратуры, должны обладать определенными характеристиками, которые следует учитывать при их разработке и применении.

Обычно разработка БПЛА начинается с выбора платформы, а также совместимых с ней съемочных систем и систем навигации. При выборе платформы необходимо учитывать грузоподъемность, дальность полета, степень автономности. В некоторых исследованиях используются предварительно укомплектованные БПЛА, например AscTec Falcon [4], Aeryon Scout [5], SenseFlyeBee [6]. Такие системы обеспечивают безопасность и простоту эксплуатации, однако менее гибки при выборе и настройке устанавливаемых на них цифровых съемочных систем.

Датчики навигации в БПЛА выполняют две функции: автопилотирование платформы и определение элементов внешнего ориентирования (ЭВО) изображений. Высококачественные инерциальные навигационные системы (INS) могут использоваться для исключения необходимости в наземных опорных точках и достижения достаточной пространственной точности посредством прямого геопозиционирования (DG) [7].

Однако системы потребительского уровня предпочтительнее, учитывая стоимость и ограничения доступа к базовым станциям, независимо от используемого метода: дифференциального или относительного по измерениям фазы несущей в режиме статики или кинематики, а также применения постобработки или определения координат в режиме реального времени [8; 9]. В таких системах могут быть приняты различные стратегии для повышения точности позиционирования, например замена некачественных данных GPS о высоте на измерения высоты с помощью барометрического альтиметра [10]. Точность прямого геопозиционирования зависит от технических характеристик компонентов INS и точности калибровки платформы. Кроме того, важна схема интеграции системы, поскольку она контролирует синхронизацию между датчиками изображения и навигацией. В зависимости от скорости полета и точности измерений INS задержка между моментом экспонирования и моментом определения ЭВО может вызвать серьезные отклонения позиционирования [7; 11].

В случае использования метода косвенного геопозиционирования особое внимание следует уделять таким факторам, как точность согласования изображений в нескольких ракурсах, самокалибровка камеры и точность определения координат опорных точек. Кратко обсуждаемый в нескольких исследованиях метод [10; 12; 13], используемый для определения местоположения опорных точек на изображениях, и конфигурация расположения опорных точек также являются важными факторами в определении окончательной точности косвенного геопозиционирования. Соответственно, оптимальное расположение опорных точек, необходимое для достижения определенного уровня точности, является серьезной проблемой при фотограмметрической обработке

снимков с БПЛА. Специализированное фотограмметрическое программное обеспечение для обработки снимков с БПЛА устанавливает минимальное количество опорных точек в специальной конфигурации и с ограниченной точностью позиционирования. Гарантия того, что основанные на этих условиях результаты могут удовлетворять требованиям заданной точности, обеспечивается наличием априорного знания окончательной точности.

Что касается датчиков изображения, цифровая камера видимого диапазона с высоким разрешением является ключевым элементом для фотограмметрического картографирования. Несмотря на преимущества неметрических цифровых камер, такие как низкая цена, легкий вес и высокое разрешение, нестабильность их объективов и креплений датчиков по-прежнему вызывает сомнения в целесообразности их использования при съемке с БПЛА. Следовательно, должна выполняться калибровка камеры для определения элементов внутреннего ориентирования (ИО) и параметров искажения идеальной центральной проекции. Когда требуется метрическая точность, рекомендуется автономная калибровка камеры [14]. Однако параметры офлайн-калибровки незначительно меняются во время полета из-за вибраций платформы и нестабильности компонентов камеры [15]. Решением этой проблемы является калибровка камеры путем включения ее систематических погрешностей в качестве дополнительных параметров к регулировке связки антенных блоков, известной как самокалибровка. Тем не менее погрешности измерения координат точек изображения могут повлиять на параметры калибровки, поскольку все они определяются вместе с неизвестными параметрами, такими как координаты связующих точек в пространстве объекта и элементы внешнего ориентирования (ЭВО) [16].

В работе проведено сравнение точности фотограмметрических построений в зависимости от количества маршрутов при съемке с БПЛА линейных объектов и от количества опорных точек, используемых при косвенном геопозиционировании.

Материалы и методы

Район проведения исследования. Исследования проводились на научно-учебной базе Горное Государственного университета по землеустройству, расположенной на юге Московской области. Площадь съемки составляет 900×90 м².

Материалы. Аэрофотосъемка выполнялась с использованием БПЛА DJI PHANTOM 4 PRO (рис. 1). Была проведена трехмаршрутная аэрофотосъемка и получено 502 снимка. Длина каждого маршрута – 900 м. Высота картографирования около 30 м. Пространственное разрешение (SR) около 1 см. В исследовании использовались 34 опорные точки, равномерно распределенные группами по всей территории. Каждая группа состояла из трех опорных точек, группы были распределены через каждые 50–100 м вдоль маршрута (900 м). Расстояния между точками в каждой группе опорных точек составляли около 20 м по ширине маршрута (90 м). Три опорные точки (48-2, 50, 51), которые использовались в различных методах геопозиционирования, находились на

левом краю области исследования, как показано на рис. 2. Параметры калибровки камеры представлены в табл. 1. RTK-GNSS, двухчастотные GPS-приемники Trimble R4 использовались для определения координат наземных опорных точек. Для фотограмметрической обработки данных применялось программное обеспечение Agisoft PhotoScan Professional.



Рис. 1. БПЛА DJI PHANTOM 4 PRO
Figure 1. UAV DJI PHANTOM 4 PRO



Рис. 2. Расположение маркированных опорных точек в районе исследования
Figure 2. The distribution of ground control points on the study area

Таблица 1

Параметры калибровки съемочной камеры

Название съемочной камеры	FC220 (4,73 мм)
Главное фокусное расстояние	4,73 мм
Разрешающая способность	Ширина матрицы 4000 пикселей
	Ширина пикселя = 0,0016 мм
	Высота матрицы 3000 пикселей
	Высота пикселя = 0,0016 мм
Фокусное расстояние	$c = 4,6501$ мм
Координаты главной точки	$x_0 = 0,0305$ мм
	$y_0 = 0,0165$ мм
Коэффициенты радиальной дисторсии	$K1 = -8,31719e^{-004}$
	$K2 = -3,16310e^{-005}$
	$K3 = 3,91019e^{-006}$
Коэффициенты децентрирующего искажения	$P1 = 3,06539e^{-005}$
	$P2 = 1,40033e^{-004}$

Table 1

Camera calibration parameters	
Camera name	FC220 (4,73 mm)
Focal length	4.73 mm
Resolution	width = 4000 pixels
	pixel width = 0.0016 mm
	height = 3000 pixels
	pixel width = 0.0016 mm
Principal distance	$c = 4.6501$ mm
Principal point offsets	$x_0 = 0.0305$ mm
	$y_0 = 0.0165$ mm
Coefficients of radial distortion	$K1 = -8.31719e^{-004}$
	$K2 = -3.16310e^{-005}$
	$K3 = 3.91019e^{-006}$
Coefficients of decentering distortion	$P1 = 3.06539e^{-005}$
	$P2 = 1.40033e^{-004}$

Экспериментальные работы проводились для изучения влияния количества маршрутов в протяженных линейных проектах на точность геопозиционирования снимков, полученных с БПЛА и включенных в фотограмметрическую обработку. Результаты приведены в табл. 2. В разных группах тестов было различное количество опорных и контрольных точек, используемых для оценки точности, как показано на рис. 3.

Из табл. 2 и рис. 3 видно, что в методе прямого геопозиционирования (группа А) использованы данные о положениях съемочной камеры, полученные с помощью GPS-приемника, установленного на БПЛА, и все тридцать четыре наземные точки использовались в качестве контрольных.

Таблица 2

Исходные данные для оценки точности геопозиционирования снимков с БПЛА

Секции	Номер группы	Номер теста	Количество опорных точек	Количество контрольных точек	Количество маршрутов	Примечания
Первая	А	A1	0	34	1	Прямое геопозиционирование
		A2			2	
		A3			3	
	В	B1	3	31	1	Расположение опорных точек локально в начале маршрута
		B2			2	
		B3			3	
Вторая	С	C1	6	28	1	Распределение опорных точек равномерно по всей площади съемки
		C2			2	
		C3			3	
	D	D1	12	22	1	Распределение опорных точек равномерно по всей площади съемки
		D2			2	
		D3			3	
	E	E1	34	0	1	Использование всех опорных точек для косвенного геопозиционирования
		E2			2	
		E3			3	

Table 2

The various methods for studying the comparison of three UAV georeferencing techniques

Sections	Group ID	Test ID	Numbers of ground control points	Numbers of control points	Numbers of strips	Remarks
First	A	A1	0	34	1	Direct georeferencing
		A2			2	
		A3			3	
	B	B1	3	31	1	Distribution of ground control points only on one edge of project
		B2			2	
		B3			3	
Second	C	C1	6	28	1	Ground control points distribution on edges and middle of project
		C2			2	
		C3			3	
	D	D1	12	22	1	Ground control points distribution on edges and middle of project
		D2			2	
		D3			3	
	E	E1	34	0	1	Using of all ground control points
		E2			2	
		E3			3	



Группа В, проект с 3 опорными точками
Group B using 3 ground control points



Группа С, проект с 6 опорными точками
Group C using 6 ground control points



Группа D, проект с 12 опорными точками
Group D using 12 ground control points

Рис. 3. Распределение опорных точек в исследуемой области в экспериментах групп В, С, D
Figure 3. The distribution of ground control points in the study area in the tests of groups В, С, D

В методе косвенного геопозиционирования (группа Е) использованы все тридцать четыре опорные точки для вычисления ЭВО-снимков.

В группах В, С и D часть маркированных наземных точек выступали опорными, а оставшиеся – контрольными. В группе В три опорные точки

были расположены группой в начале линейного объекта. В группах С и D шесть и двенадцать опорных точек были распределены равномерно вдоль всего линейного объекта.

Цель исследования – оценить точность фотограмметрических построений в зависимости от количества маршрутов при съемке с БПЛА линейных объектов и от количества опорных точек, используемых при косвенном геопозиционировании. Проведены фотограмметрические построения по снимкам одного, двух и трех маршрутов с использованием различного количества и распределения опорных точек вдоль объекта съемки (В, С, D), а также без использования опорных точек (А) – метод прямого геопозиционирования и с привлечением всех маркированных точек в качестве опорных (Е) для контроля точности – метод косвенного геопозиционирования.

Таким образом, проведено пять групп экспериментов для оценки точности геопозиционирования снимков на протяженный линейный объект при одно-, двух- и трехмаршрутной съемке в каждой группе.

Оценка точности выполнялась по остаточным расхождениям в координатах контрольных точек следующим образом:

$$VXi = XCi - XGi, \quad (1)$$

где VXi – остаточное расхождение в координате X точки i ; XCi – координата X точки i из уравнивания фототриангуляции; XGi – координата X точки i из GPS-наблюдений.

Среднеквадратическая погрешность Mx в координате X рассчитывалась по формуле (2)

$$Mx = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (VXi)^2}{n}}, \quad (2)$$

где n – количество контрольных точек.

Аналогичные уравнения использовались для вычисления СКП в координатах Y и Z (My и Mz соответственно).

$$My = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (VYi)^2}{n}}.$$

$$Mz = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (VZi)^2}{n}}.$$

Таким образом, погрешность в плановых координатах вычислялась по формуле (3)

$$Horizontal\ Error = \sqrt{(Mx)^2 + (My)^2}. \quad (3)$$

Погрешность в планово-высотных координатах – общая погрешность – вычислена с использованием уравнения (4)

$$Total\ Error = \sqrt{(Mx)^2 + (My)^2 + (Mz)^2}. \quad (4)$$

Результаты и их обсуждение

Метод прямого геопозиционирования (первая секция). Рис. 4 иллюстрирует оценку точности прямого геопозиционирования без привлечения опорных точек при максимальном количестве контрольных точек – 34 точки – для одно-, двух- и трехмаршрутной съемки. Необходимо отметить низкую точность прямого геопозиционирования при одномаршрутной съемке, достигающую 12 м в плановых координатах и 9 м в высотной координате. Точность плановых координат значительно улучшается при использовании снимков двух и трех маршрутов (4,3 м и 5,5 м соответственно).

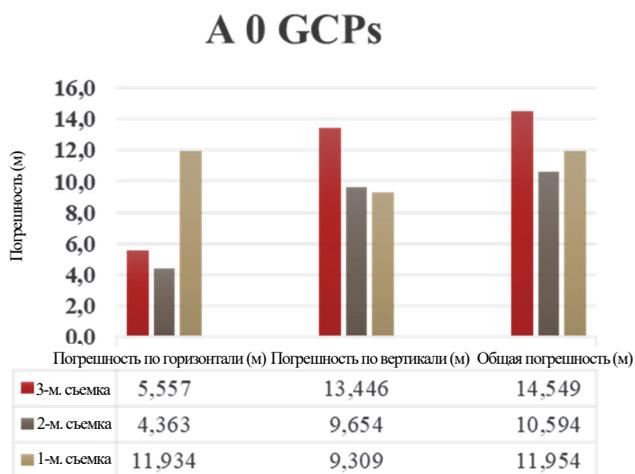


Рис. 4. Оценка точности прямого геопозиционирования в группе А при одно-, двух- и трехмаршрутной съемке

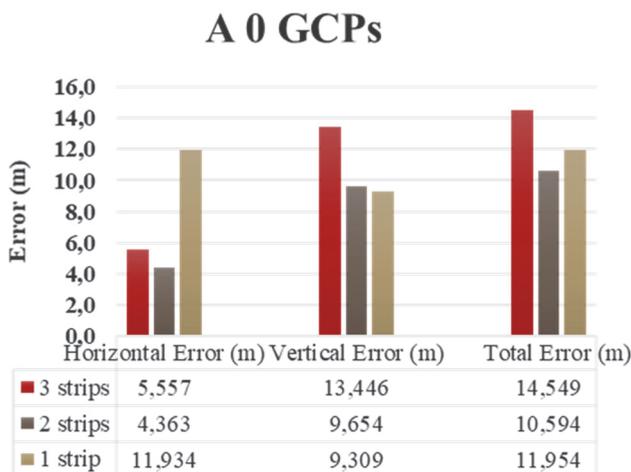


Figure 4. Georeferencing accuracy of using one, two, or three stripe in group A of tests

Результаты оценки точности прямого геопозиционирования позволяют сделать вывод, что погрешность в плановых координатах контрольных точек значительно снижается при использовании материалов двухмаршрут-

ной съемки в отличие от одномаршрутной, однако погрешность в высотных координатах практически не меняется с увеличением количества маршрутов. Тем не менее погрешности настолько велики, что создание планового материала по ним возможно лишь в масштабе более мелком, чем масштаб аэросъемки, а это не выгодно экономически и нецелесообразно.

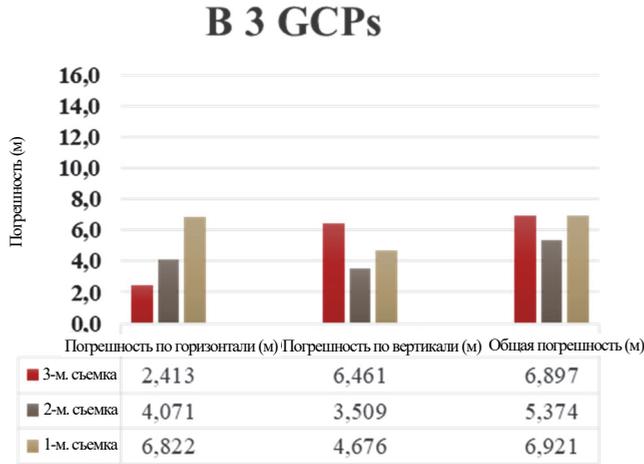


Рис. 5. Оценка точности косвенного геопозиционирования в группе В при одно-, двух- и трехмаршрутной съемке

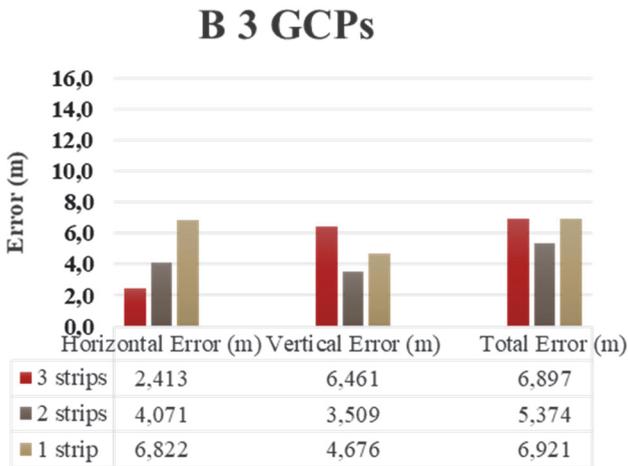


Figure 5. Georeferencing accuracy of using one, two, or three stripe in group B of tests

Рис. 5 иллюстрирует оценку точности косвенного геопозиционирования в группе В с расположением опорных точек локально в начале маршрута при максимальном количестве контрольных точек – 31 точка – для одно-, двух- и трехмаршрутной съемки. Общая погрешность в координатах контрольных точек незначительно различается при использовании снимков одного, двух или трех маршрутов и составляет около 7 м. Однако необходимо отметить улучшение точности в плановых координатах при увеличении ко-

личества маршрутов от 6,8 м при одномаршрутной съемке до 2,4 м при трехмаршрутной съемке.

Метод косвенного геопозиционирования (вторая секция). В экспериментах второй секции (группы С, D) использовали метод косвенного геопозиционирования с различным количеством опорных точек, расположенных равномерно вдоль всего маршрута. Эксперименты в группе E проводились при использовании всех тридцати четырех маркированных точек в качестве опорных. На рис. 8 представлены результаты уравнивания фототриангуляционных построений в виде среднеквадратических отклонений в планово-высотных координатах тридцати четырех маркированных точек.

Анализ оценки точности косвенного геопозиционирования в экспериментах группы С с шестью равномерно расположенными опорными точками позволяет сделать вывод, что точность фототриангуляционных построений возрастает с увеличением количества маршрутов от 0,24 до 0,10 м (рис. 6).

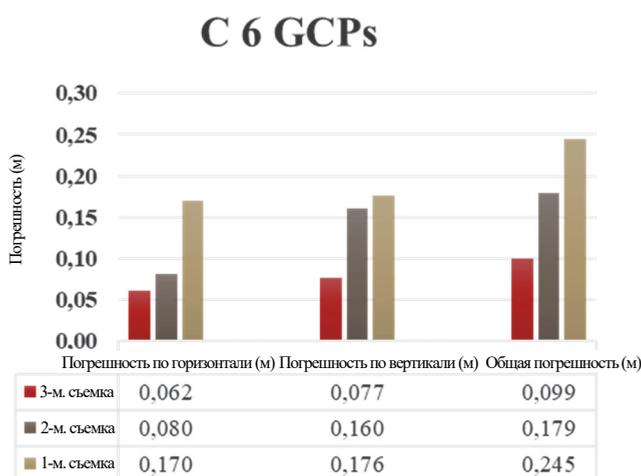


Рис. 6. Оценка точности косвенного геопозиционирования в группе С при одно-, двух- и трехмаршрутной съемке

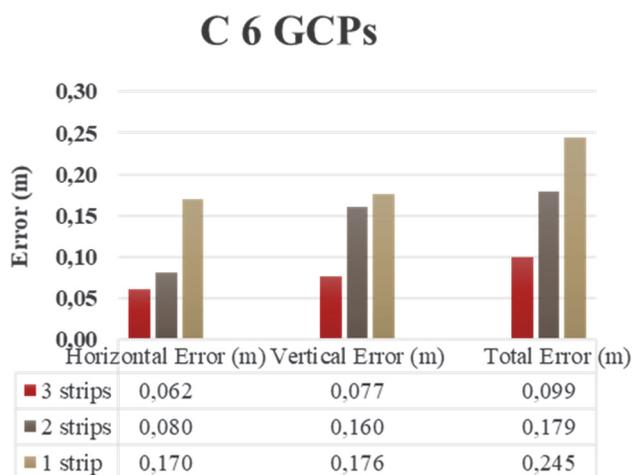


Figure 6. Georeferencing accuracy of using one, two, or three stripe in group C of tests

Схожие результаты наблюдаются при оценке точности в эксперименте в группе D с двенадцатью опорными точками (рис. 7). Однако увеличение количества опорных точек с шести до двенадцати привело к увеличению точности при одномаршрутной съемке почти вдвое: общее отклонение планово-высотных координат уменьшилось с 0,25 до 0,16 м. Улучшение точности для двух- и трехмаршрутной съемки практически не наблюдалось.

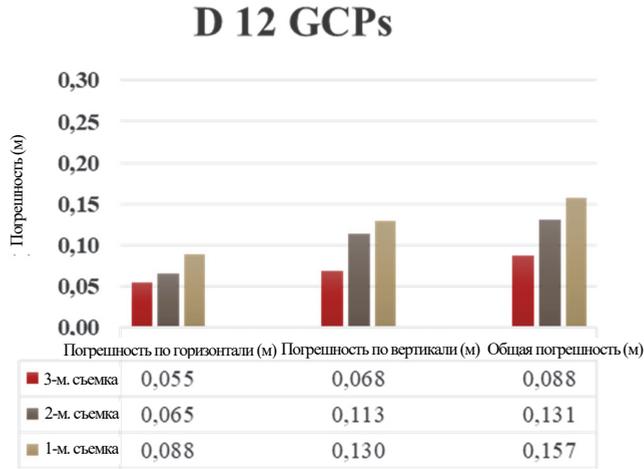


Рис. 7. Оценка точности косвенного геопозиционирования в группе D при одно-, двух- и трехмаршрутной съемке

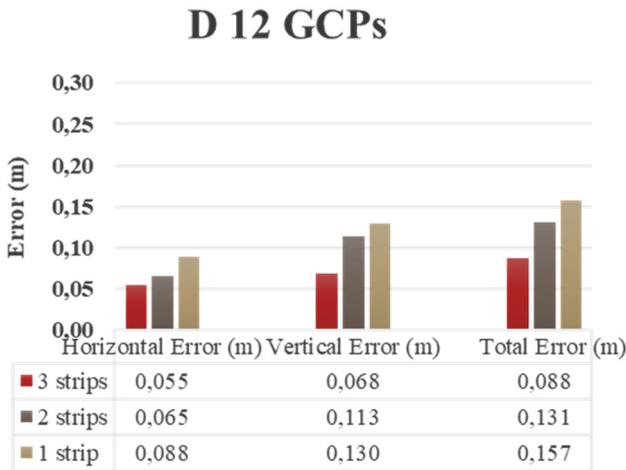


Figure 7. Georeferencing accuracy of using one, two, or three stripe in group D of tests

На рис. 8 представлены остаточные расхождения в координатах тридцати четырех опорных точек, использованных в методе косвенного геопозиционирования. Необходимо отметить, что одномаршрутная съемка дает погрешности в высотных координатах значительно большие, чем двух- и трехмаршрутные съемки, предположительно из-за возникающей неопределенности поперечного угла наклона фотограмметрической модели.

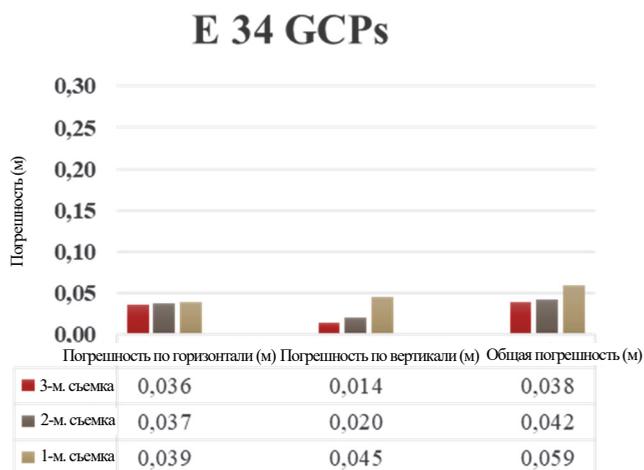


Рис. 8. Оценка точности косвенного геопозиционирования в группе E при одно-, двух- и трехмаршрутной съемке

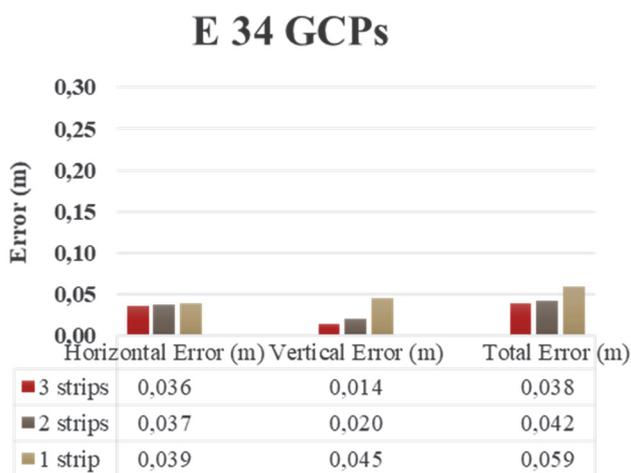


Figure 8. Georeferencing accuracy of using one, two, or three stripe in group E of tests

Заклучение

Исследованы точность прямого и косвенного геопозиционирования при съемке линейных объектов с разным количеством маршрутов (от одного до трех) при различных схемах расположения опорных точек.

Выполнены пятнадцать тестов, разделенных на пять групп. В каждой группе проведены три теста с различным количеством маршрутов. Пять групп объединены в две секции. Первая включала две группы: метод прямого геопозиционирования и метод косвенного геопозиционирования с тремя опорными точками в начале маршрута.

Во второй секции использован метод косвенного геопозиционирования с шестью, двенадцатью и тридцатью четырьмя опорными точками, равномерно расположенными вдоль объекта съемки.

В первой части исследований оценена точность координат контрольных точек при использовании метода прямого геопозиционирования, которая оказалась очень низкой: около 14 м при одномаршрутной съемке и 10 м при двух- и трехмаршрутной съемке при использовании указанного в начале статьи GPS- и IMU-оборудования.

Также в первой части реализован метод косвенного геопозиционирования при расположении трех опорных точек в начале маршрута. Использование аэроснимков двух маршрутов дало более точные результаты, чем аэроснимков одного или трех маршрутов. Результаты метода косвенного позиционирования оказались выше, чем метода прямого геопозиционирования, и составили около 7 м при одномаршрутной и 2,5 м при двух- и трехмаршрутной съемке.

Вторая часть эксперимента заключалась в использовании равномерно расположенных опорных точек вдоль объекта съемки для повышения точности фототриангуляции. Результаты доказывают, что использование аэроснимков трех маршрутов при изысканиях линейных объектов позволяет повысить точность геопозиционирования, в отличие от использования снимков одно- или двухмаршрутной аэрофотосъемки.

Использование аэроснимков двух маршрутов, полученных при съемке «туда и обратно» с достаточным количеством опорных точек и данных ГЛОНАСС, дает более точные результаты при методе прямого геопозиционирования с привлечением опорных точек. Увеличение числа маршрутов повышает затраты при аэросъемке с БПЛА, однако они невелики и компенсируются повышением точности при фотограмметрических построениях для создания ортофотопланов, цифровых моделей поверхности для целей точного земледелия, а также цифровых моделей рельефа и 3D-моделей объектов местности.

Список литературы / References

- [1] Shahbazi M, Théau J, Ménard P. Recent applications of unmanned aerial imagery in natural resource management. *Gisci. Remote Sens.* 2014;51:339–365. <http://dx.doi.org/10.1080/15481603.2014.926650>
- [2] Anderson K, Gaston KJ. Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology. *Front. Ecol. Environ.* 2013;11:138–146. <http://dx.doi.org/10.1890/120150>
- [3] Liu P, Chen A, Huang Y, Han J, Lai J, Kang S, Wu T, Wen M, Tsai M. A review of rotorcraft unmanned aerial vehicle (UAV) developments and applications in civil engineering. *Smart Struct. Syst.* 2014;13:1065–1094. <http://dx.doi.org/10.12989/sss.2014.13.6.1065>
- [4] Anai T, Sasaki T, Osaragi K, Yamada M, Otomo F, Otani H. Automatic exterior orientation procedure for low-cost UAV photogrammetry using video image tracking technique and GPS information. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 2012. <http://dx.doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXIX-B7-469-2012>
- [5] Bahr T, Jin X, Lasica R, Giessel D. Image registration of high-resolution UAV data: the new hypare algorithm. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 2013. <http://dx.doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-1-W2-17-2013>
- [6] Boccardo P, Chiabrando F, Dutto F, Tonolo FG, Lingua A. UAV deployment exercise for mapping purposes: evaluation of emergency response applications. *Sensors.* 2015; 15:15717–15737. <http://dx.doi.org/10.3390/s150715717>

- [7] Turner D, Lucieer A, Wallace L. Direct georeferencing of ultrahigh-resolution UAV imagery. *IEEE Trans. Geosci. Remote.* 2014;52:2738–2745. <http://dx.doi.org/10.1109/TGRS.2013.2265295>
- [8] Xiang H, Tian L. Method for automatic georeferencing aerial remote sensing (RS) images from an unmanned aerial vehicle (UAV) platform. *Biosyst. Eng.* 2011;108:104–113. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2010.11.003>
- [9] Chiang KW, Tsai ML, Chu CH. The development of an UAV borne direct georeferenced photogrammetric platform for ground control point free applications. *Sensors.* 2012;12:9161–9180. <http://dx.doi.org/10.3390/s120709161>
- [10] Turner D, Lucieer A, Watson C. An automated technique for generating georectified mosaics from ultra-high resolution unmanned aerial vehicle (UAV) imagery, based on structure from motion (SfM) point clouds. *Remote Sens.* 2012;4:1392–1410. <http://dx.doi.org/10.3390/rs4051392>
- [11] Chiang KW, Tsai ML, Naser ES, Habib A, Chu CH. New calibration method using low cost MEMS IMUs to verify the performance of UAV-borne MMS payloads. *Sensors.* 2015;15:6560–6585. <http://dx.doi.org/10.3390/s150306560>
- [12] Ai M, Hu Q, Li J, Wang M, Yuan H, Wang S. A robust photogrammetric processing method of low-altitude UAV images. *Remote Sens.* 2015;7:2302–2333. <http://dx.doi.org/10.3390/rs70302302>. [CrossRef] [Google Scholar]
- [13] Wu CT, Hsiao CY, Chen CS. An assessment of errors using unconventional photogrammetric measurement technology with UAV photographic images as an example. *J. Appl. Sci. Eng.* 2013;16:105–116.
- [14] Remondino F, Fraser C. Digital cameras calibration methods: considerations and comparisons. *Proceedings of the ISPRS Commission V Symposium on Image Engineering and Vision Metrology.* Dresden; 2006. p. 266–272.
- [15] Rieke-Zapp D, Tecklenburg W, Peipe J, Hastedt H, Haig C. Evaluation of the geometric stability and the accuracy potential of digital cameras-comparing mechanical stabilisation versus parameterisation. *ISPRS J. Photogramm.* 2009;64:248–258. <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2008.09.010>
- [16] Yang Y. Robust estimation for dependent observation. *Manuscr. Geod.* 1994;19:10–17.

Сведения об авторах:

Елиештави Амр Махмуд, аспирант, кафедра дистанционного зондирования и цифровой картографии, Государственный университет по землеустройству; преподаватель, кафедра гражданского строительства, инженерный факультет в Каире, Университет Аль-Азхар. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-0668-2375>; eLIBRARY SPIN-код: 9609-4694. E-mail: amrshesht82@gmail.com

Лимонов Анатолий Николаевич, кандидат технических наук, доцент, профессор, кафедра дистанционного зондирования и цифровой картографии, Государственный университет по землеустройству. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-4382-5200>; eLIBRARY SPIN-код: 1561-8711. E-mail: limonov.anatoly@gmail.com

Гаврилова Лариса Анатольевна, кандидат технических наук, доцент, декан, факультет городского кадастра, Государственный университет по землеустройству. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7095-3224>; eLIBRARY SPIN-код: 7343-7078. E-mail: gavrilova.a.larisa@gmail.com

Елишеви Мохамед Абделвадод, аспирант, кафедра геодезии и геоинформатики, Государственный университет по землеустройству; преподаватель, кафедра гражданского строительства, инженерный факультет в Каире, Университет Аль-Азхар. ORCID iD:

<https://orcid.org/0000-0001-8367-207X>; eLIBRARY SPIN-код: 8872-1494. E-mail: mimoelshewy@gmail.com

Bio notes:

Amr Mahmoud El Sheshtawy, PhD student, Department of Remote Sensing and Digital Cartography, State University of Land Use Planning; teacher, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering in Cairo, Al-Azhar University ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-0668-2375>; eLIBRARY SPIN-code: 9609-4694. E-mail: amrshesht82@gmail.com

Anatoly N. Limonov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor, Department of Remote Sensing and Digital Cartography, State University of Land Use Planning. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-4382-5200>; eLIBRARY SPIN-code: 1561-8711. E-mail: limonov.anatoly@gmail.com

Larisa A. Gavrilova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Dean, Faculty of Urban Cadaster, State University of Land Use Planning. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7095-3224>; eLIBRARY SPIN-code: 7343-7078. E-mail: gavrilova.a.larisa@gmail.com

Mohamed A. Elshewy, PhD student, Department of Geodesy and Geoinformatics, State University of Land Use Planning; teacher, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering in Cairo, Al-Azhar University. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8367-207X>; eLIBRARY SPIN-code: 8872-1494. E-mail: mimoelshewy@gmail.com