

УДК: 528.71

DOI: 10.35595/2414-9179-2021-2-27-327-339

А.М. Гафуров¹, О.П. Ермолаев², Б.М. Усманов³, П.В. Хомяков⁴

СОЗДАНИЕ ВЫСОКОТОЧНЫХ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ ВЫСОТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГНСС-БПЛА

АННОТАЦИЯ

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) все больше вовлечены в геодезические работы, становясь надежной основой для получения информации о трехмерных характеристиках местности. До недавнего времени для надежного планово-высотного обоснования измерений с беспилотных аппаратов использовались наземные опорные точки. Установка подобных марок занимает достаточно продолжительное время, которое увеличивается пропорционально размеру изучаемой территории. Помимо того, что установка марок и их координатная съемка занимают продолжительное время, использование марок приводит (в особенности на больших территориях от 1 кв. км) к искажениям модели, приводящим, в свою очередь, к появлению областей локальных понижений и возвышений там, где их нет на местности. Данные искажения возникают из-за алгоритмов минимизации погрешности при оптимизации положений камер и не поддаются корректировке. Отказ от использования опорных точек без использования иных, уточняющих положения центра проекции снимков, средств приводит к иным геометрическим искажениям, связанным с дисторсией объективов съемочных систем, установленных на БПЛА (так называемые «седловидные» модели). В настоящей работе представлены результаты апробации методики создания высокоточных цифровых моделей высот (ЦМВ) с использованием встроенных в БПЛА приемников глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС). Апробация производилась на 10 объектах Закамья Республики Татарстан (Россия) с площадью, варьирующейся от 4 до 58 гектар. Корректировка положения ГНСС-ровера производилась в постобработке от сети виртуальных базовых станций, расположенных на удалении от 6 до 70 км от места съемки. Для всех объектов погрешности ЦМВ не превышали 0,05 м по осям X, Y и Z, при этом зависимости величины погрешности от размера изучаемой территории выявлено не было. Полученные результаты анализа погрешностей могут говорить о перспективе использования дешевых ГНСС-БПЛА без необходимости организации сети наземных опорных точек, ограничившись только необходимостью установки контрольных точек, что позволит многократно сократить временные затраты на производство работ, в особенности на труднодоступных объектах.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: БПЛА, ГНСС, ЦМВ, оценка точности, рельеф, фотограмметрия, болгарские городища.

¹ Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт экологии и природопользования, Товарищеская, д. 5, 420097, Казань, Россия, *e-mail*: amgafurov@kpfu.ru

² Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт экологии и природопользования, Товарищеская, д. 5, 420097, Казань, Россия, *e-mail*: oleg.yermolayev@kpfu.ru

³ Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт экологии и природопользования, Товарищеская, д. 5, 420097, Казань, Россия, *e-mail*: busmanof@kpfu.ru

⁴ Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт экологии и природопользования, Товарищеская, д. 5, 420097, Казань, Россия, *e-mail*: petr.khomyakov@kpfu.ru

Artur M. Gafurov¹, Oleg P. Yermolayev², Bulat M. Usmanov³, Petr V. Khomyakov⁴

CREATION OF HIGH-PRECISION DIGITAL ELEVATION MODELS USING THE GNSS UAV

ABSTRACT

Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) are increasingly involved in surveying work, becoming a reliable basis for information on three-dimensional terrain features. Until now, ground reference points have been used to provide reliable planimetric evidence for measurements from drones. Their placement and coordinates measurement takes quite a long time, which increases proportionally to the area under study. In addition, the use of these marks produces model distortions (especially over large areas of 1 sq. km or more), which then lead to the appearance of areas of local depressions and uplifts where they are not present in the terrain. These distortions arise due to camera position optimization error minimization algorithms and cannot be corrected. Refusing to use ground control points leads to other geometric distortions associated with characteristics of survey system lenses mounted on UAVs (so-called "saddle-shaped" models). This paper presents the results of high-precision digital elevation models creation using built-in UAV Global Navigation Satellite System (GNSS) receivers. The methodology has been tested at ten sites in the Zakamye region of the Republic of Tatarstan (Russia) with an area ranging from 4 to 58 hectares. Correction of GNSS rover position was performed in post-processing from a virtual base station network located at a 6 to 70 km range from the surveyed sites. For all objects, DEM errors did not exceed 0.05 m on axes X, Y, and Z. At the same time, the dependence of the error value on the study area size was not revealed. The received results of the analysis of errors can indicate the prospect of the use of low-cost GNSS-UAVs without the necessity of organizing a network of ground reference points, being limited only to the necessity of installing control points will repeatedly reduce the time of the field works, in particular on hardly accessible objects.

KEYWORDS: UAV, GNSS, DEM, accuracy assessment, topography, photogrammetry, Bulgarian settlements.

ВВЕДЕНИЕ

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) в настоящее время становятся все более распространенным источником трехмерной информации о рельефе. Имея сопоставимую с лидарной съемкой точность и разрешающую способность, БПЛА, благодаря, в том числе, своей доступности, все чаще используются при решении задач динамической геоморфологии, картографии и геодезии. Глобальная навигационная спутниковая система (ГНСС) используется для определения точного положения результатов съемки с беспилотных летательных аппаратов в пространстве [Groves, 2013]. Более точное позиционирование результатов съемки позволяет получить корректную конечную трехмерную модель или ортофотоплан. До недавнего времени использовался подход, основанный на позиционировании на основе координат опорных наземных точек.

¹ Kazan Federal University, Institute of Ecology and Environmental Sciences, Tovarishcheskaya st. 5, 420097, Kazan, Russia, *e-mail*: amgafurov@kpfu.ru

² Kazan Federal University, Institute of Ecology and Environmental Sciences, Tovarishcheskaya st. 5, 420097, Kazan, Russia, *e-mail*: oleg.yermolayev@kpfu.ru

³ Kazan Federal University, Institute of Ecology and Environmental Sciences, Tovarishcheskaya st. 5, 420097, Kazan, Russia, *e-mail*: busmanof@kpfu.ru

⁴ Kazan Federal University, Institute of Ecology and Environmental Sciences, Tovarishcheskaya st. 5, 420097, Kazan, Russia, *e-mail*: petr.khomyakov@kpfu.ru

В качестве подобных точек могут выступать как характерные объекты на местности (углы зданий, трубы, неподвижные объекты – крупные валуны и т.д.), так и специально расставленные геодезические марки [Villanueva, Blanco, 2019]. Основное требование к таким маркам – хорошая видимость на снимках, снятых камерой БПЛА на заданной высоте полета. Исследования, проводимые во всем мире, подробно описывают применяемые подходы. Например, используются черно-белые шахматные квадратные полотна различного размера, в зависимости от высоты полета и используемых камер [Dewez, Leroux, Morelli, 2016]. Черно-белые опорные точки хорошо различимы на любой поверхности и позволяют четко определить центр марки. Для камеры с разрешением 12 мегапикселей марки размером 0,5 x 0,5 м отчетливо различаются с высоты 100 м, опорные знаки размером 0,7 x 0,7 м видны с высоты 150 м над точкой взлета [Gafurov, 2021]. Съемка центров марок осуществляется специальным геодезическим ГНСС-приемником, работа которого возможна как в режиме кинематики реального времени (RTK – real time kinematic) [Langley, 1998], так и в режиме кинематики в постобработке (PPK – post-processing kinematic) [Gafurov, 2021]. Основное отличие этих режимов заключается в способе получения устойчивого решения – в случае RTK точные координаты получаются в поле непосредственно во время проведения работы, в случае PPK – при камеральной обработке. В обоих случаях коррекция положения перемещаемой станции – ровера осуществляется от референсной базовой станции с известными координатами. Для получения наиболее точных результатов, в качестве базовых используют станции, находящиеся на удалении не более 35 км при использовании одночастотных приемников в качестве роверов, и не более 70 км при использовании двухчастотных [Bolkas, 2019].

Количество наземных опорных точек напрямую влияет на качество получаемых результатов. Однако, существуют пороговые значения количества марок, после достижения которых точность определения положения данных, полученных с БПЛА, увеличивается незначительно. Так или иначе, многие исследователи приходят к выводу, что использование для геодезического обоснования более 10 марок не приносит существенных улучшений в точность определения положения модели или ортофотоплана [Tahar, 2013; Villanueva, Blanco, 2019; Gafurov, 2021].

Основной проблемой при использовании наземных опорных точек для позиционирования результатов является трудоемкость их размещения на местности, в особенности, на больших по площади объектах. Отсутствие опорных точек в случае большого расстояния (500 м и больше) между опорными точками, приводит к неопределенности и большим погрешностям определения координат в узлах сетки модели высот [Mancini et al., 2013; Benassi et al., 2017].

Для преодоления проблем трудоемкости проведения полевых работ, а также решения задачи обеспечения передачи точных координат снимков, полученных при аэрофотосъемке, в настоящее время все чаще используются БПЛА с встроенными ГНСС решениями. Как и при классической ГНСС съемки точек, работа с ГНСС-БПЛА возможна как в режиме кинематики реального времени, так и кинематики в постобработке. Из-за специфических особенностей проведения работ в RTK-режиме, требующий устойчивого радио- или Интернет-соединения, наиболее распространен подход при работе в режиме PPK [Dinkov, 2019; Tomaščík et al., 2019; Yu et al., 2019; Zhang et al., 2019]. Постепенному повсеместному развитию применения подобного подхода способствует и возрастающая доступность соответствующего оборудования и программного обеспечения.

Целью исследования является апробация методики построения высокоточных цифровых моделей высот (ЦМВ) с использованием доступных ГНСС-БПЛА с учетом имеющегося опыта построения моделей с использованием наземных опорных точек.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Апробация методики построения высокоточных ЦМР с использованием ГНСС-БПЛА была проведена на территории Закамья Республики Татарстан (рис. 1). Закамье Республики Татарстан располагается в лесостепной зоне. Средняя высота на выбранной территории составляет 150 м с максимумом 381 м. Средняя крутизна склонов составляет 1.8 градусов [Ermolaev et al., 2017]. Климат – умеренно-континентальный со среднегодовой температурой 4 градуса Цельсия. Среднегодовое количество осадков умеренное, составляет 454 мм с преобладанием жидких осадков в теплый период. Лесистость Закамья РТ сопоставима со средней лесистостью в Республике Татарстан и составляет 18%. Распаханность склонов речных бассейнов средняя, составляет 49% [Ermolaev et al., 2017; Gafurov, Yermolayev, 2020]. Почвенный покров разнообразный, присутствуют основные зональные типы почв от борových песков до черноземов типичных, однако, большая часть территории покрыта черноземами выщелоченными.

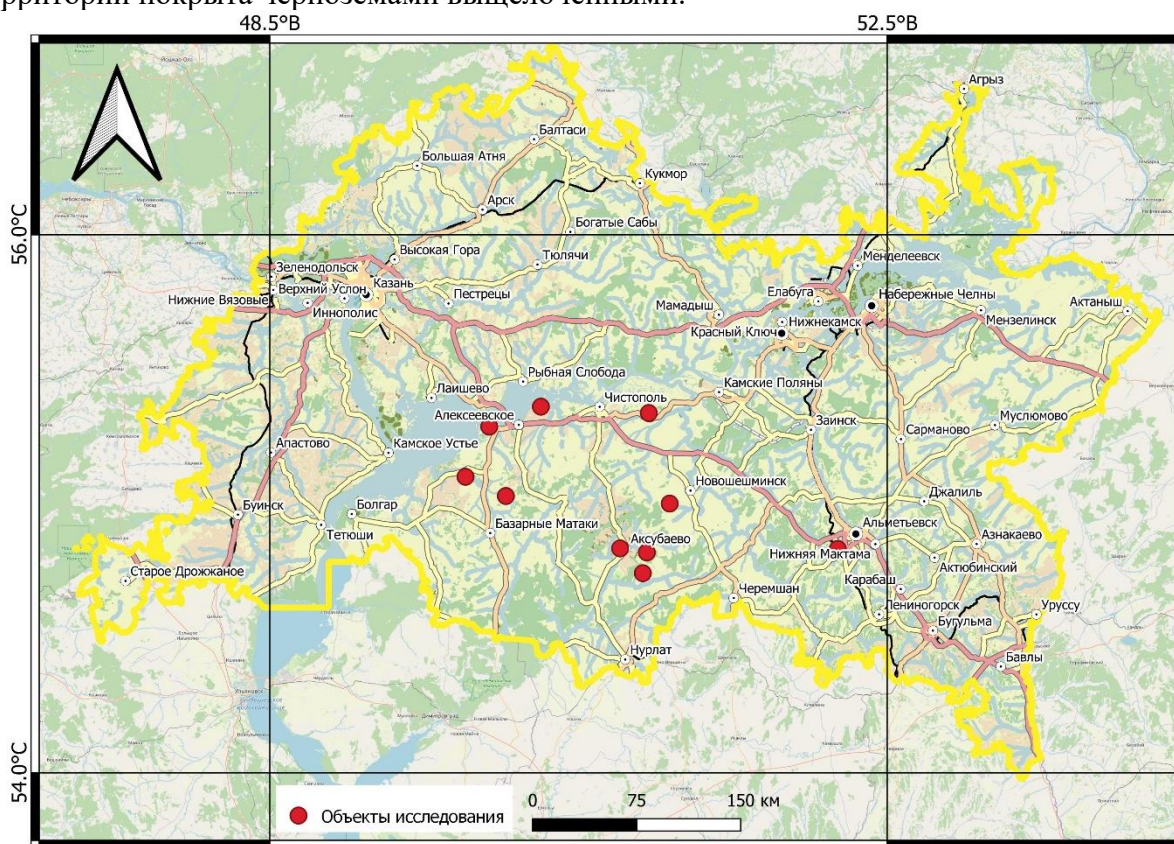


Рис. 1. Территория исследования с отметками тестовых участков
 Fig. 1. The study area with the test site locations

Для апробации было выбрано 10 объектов различной площади и типа землепользования. Площадь объектов варьируется от 1 до 25 га. 9 объектов представлены территориями средневековых городищ времен Волжской Булгарии [Gainullin et al., 2017] с сохранившимися укрепительными валами, один объект представлен полигоном твёрдых бытовых отходов.

Работы производились с использованием беспилотного летательного аппарата DJI Phantom 4 PRO v2, оснащенного 20-ти мегапиксельной камерой. В модификацию квадрокоптера были внесены изменения с использованием разработанной отечественной компанией TeoDrone системой синхронизации затвора камеры, также позволяющей заменить встроенную систему позиционирования на ГНСС-решение производства

отечественной фирмы EMLID (рис. 2). В качестве ГНСС приемника выступал модуль EMLID Reach M+ со спиральной антенной TOPGNSS TOP508. Внесенные изменения позволяют осуществлять запись координат с частотой 1 Гц, а время срабатывания затвора камеры сокращено до 0,05 секунд.

Полет и съемка объектов исследования производились полностью в автоматизированном режиме. Для этого с помощью мобильного ПО DroneDeploy в контроллер БПЛА загружалось полетное задание, включающее в себя высоту полета над точкой взлета, а также продольное и поперечное перекрытие между соседними снимками. Для соблюдения единства методики осуществления полетов, на каждом объекте высота полета составила 150 м над точкой взлета, продольное и поперечное перекрытие соседних снимков составило 70% [Gafurov *et al.*, 2019].

Благодаря произведенным модификациям, во время записи лог-файлов ГНСС приемник в момент срабатывания затвора записывает специальную временную марку. Однако, при камеральной обработке полученных материалов в лог-файл ровера необходимо внести коррекцию с учетом времени задержки срабатывания затвора. Для этого используется программное обеспечение (ПО) UAV Design Tools. RINEX файл с внесенными изменениями в дальнейшем обрабатывается методом РРК в специализированном геодезическом ПО для уравнивания базовых линий. Нами для этого была использована библиотека RTK LIB [Takasu, Yasuda, 2009].



Рис. 2. БПЛА DJI Phantom 4 Pro v2 с внесенными изменениями
Fig. 2. DJI Phantom 4 Pro v2 UAV with the implemented modifications

Данные с ГНСС-ровера были пересчитаны на основе данных с базовой станции. Для этого выбиралась ближайшая к участку базовая станция. Среднеквадратические отклонения (СКО) уравнивания координат центров проекций снимков по осям X, Y, Z представлены в табл. 1.

Полученные координаты центров проекций снимков в дальнейшем сопоставлялись с файлами снимков с БПЛА, после чего обрабатывались в фотограмметрическом ПО Agisoft Metashape. Методика обработки данных с ГНСС-БПЛА в данном ПО принципиально не

отличается от методики обработки с учетом наземных опорных точек: на первом этапе материалы с БПЛА загружаются в Agisoft Metashape, одновременно с этим подгружается сформированный на предыдущем этапе файл с уточненными координатами центров снимков, в который вносятся поправки положения антенны. Далее производится фототриангуляция и создание плотного облака точек, после чего создаются ЦММ и ортофотоплан.

Табл. 1. СКО уравнивания центров проекций снимков относительно базовой станции
Table 1. RMSE of alignment of image projection centers to the reference station

Участок	Расстояние до базовой станции (км)	Погрешность уравнивания (м)		
		x	y	z
Аксубаевское городище	4,7	0,005	0,004	0,007
Альметьевский ПТБО	6,6	0,005	0,003	0,009
Балахчинское городище	45,8	0,006	0,005	0,01
Восточно-Войкинское городище	36,0	0,005	0,004	0,009
Екатеринослободкинское городище 1	24,6	0,006	0,005	0,01
Малотолкишское городище	57,1	0,007	0,005	0,001
Новоаксубаевское городище	6,5	0,006	0,005	0,01
Новомокшинское городище	10,5	0,005	0,004	0,008
Осталоповское городище	70,2	0,009	0,007	0,015
Ромодановское городище 1	52,8	0,005	0,004	0,007

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Ключевой задачей, которую должен решать метод, основанный на съемке ГНСС-БПЛА, является построение высокоточных и корректных ЦМВ с минимальными трудозатратами. Для оценки точности построения моделей, полученных с БПЛА, был использован подход, основанный на сравнении расчетных модельных координат в точках с известными координатами. Подробно остановимся на сравнении, которое производилось на территории Альметьевского полигона ТБО, на котором было установлено шесть контрольных точек. Контрольные точки закладывались равномерно и на разных высотах (рис. 3). Сравнение координат производилось в ПО QGIS, где и накалывались контрольные точки на ортофотоплане и ЦМВ, после чего полученные координаты сравнивались с исходными значениями, взятыми из каталога.

Координаты наземных контрольных точек были получены с помощью ГНСС-приемника Emlid Reach RS+, и, как и данные с ГНСС-БПЛА были уравнианы относительно референсной станции, расположенной в 6.6 км. Погрешности определения координат (δ) представлены в табл. 2.

Точность ЦМВ Альметьевского ПТБО относительно контрольных точек составила 0,032 м, что находится в пределах точности ГНСС-приемника Emlid Reach RS+ и установленного на БПЛА ГНСС-приемника Emlid M+. Минимальная погрешность характерна для определения координаты X, определение координат Y и Z имеет несколько большие неточности. Максимальная ошибка приходится на определение контрольной точки Point 5, находящейся в низине, минимальная – на точки Point 3, находящейся на открытом участке на возвышенности. Полученные значения отклонений по большей части связаны, по всей видимости, с погрешностями определения координат контрольных точек, нежели с погрешностями модели, полученной в результате аэрофотосъемочных работ.

Табл. 2. Средняя квадратическая погрешность определение планового и высотного положения маркированных контрольных точек Альметьевского ПТБО
 Table 2. RMS error in determining the horizontal and vertical coordinates of the Almetyevsk municipal solid waste landfill control points

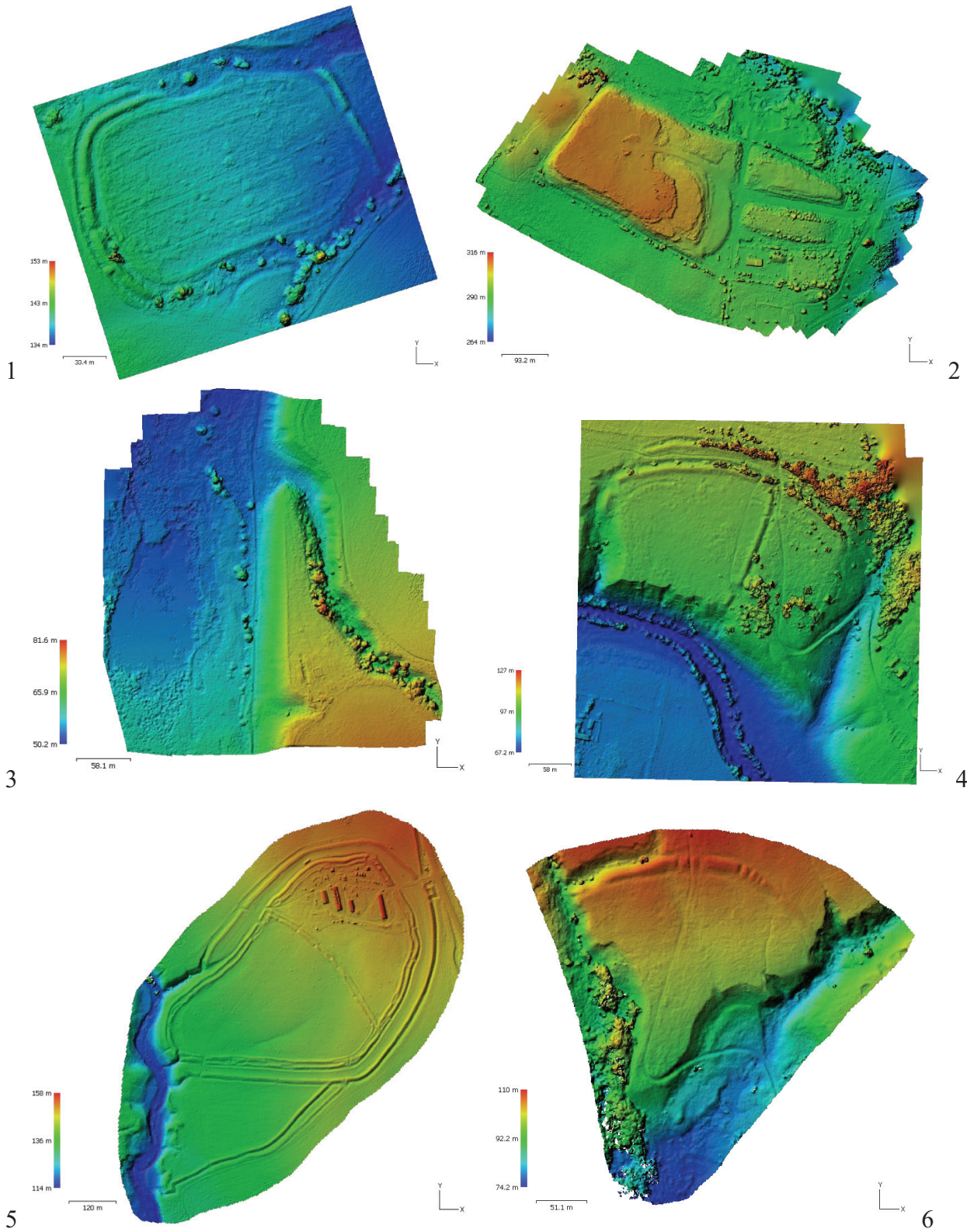
Контрольная точка	δX (м)	δY (м)	δZ (м)	Итого (м)
Point 1	0.008	0.023	0.000	0.024
Point 2	0.003	-0.026	-0.024	0.035
Point 3	0.002	-0.009	0.013	0.016
Point 4	-0.001	0.007	-0.027	0.028
Point 5	0.021	0.034	0.029	0.049
Point 6	-0.019	-0.016	-0.012	0.028
Итого (м)	0.012	0.021	0.020	0.032



Рис. 3. Расположение контрольных точек Альметьевского ПТБО
 Fig. 3. Check point location on the Almetyevsk municipal solid waste landfill

Апробация методики построения высокоточных ЦМВ с помощью ГНСС-БПЛА производилась дополнительно на девяти объектах (рис. 4), представляющих собой фортификационные сооружения XI–XIII вв. различной площади. Методика оценки погрешности определения координат в контрольных точках применялась аналогично той, что была использована на Альметьевском ПТБО.

По результатам проведенных оценок, погрешности моделей высот находятся в пределах допустимых отклонений¹, и не превышают 5 см по всем осям (табл. 3).



¹ ГОСТ Р 58854-2020.

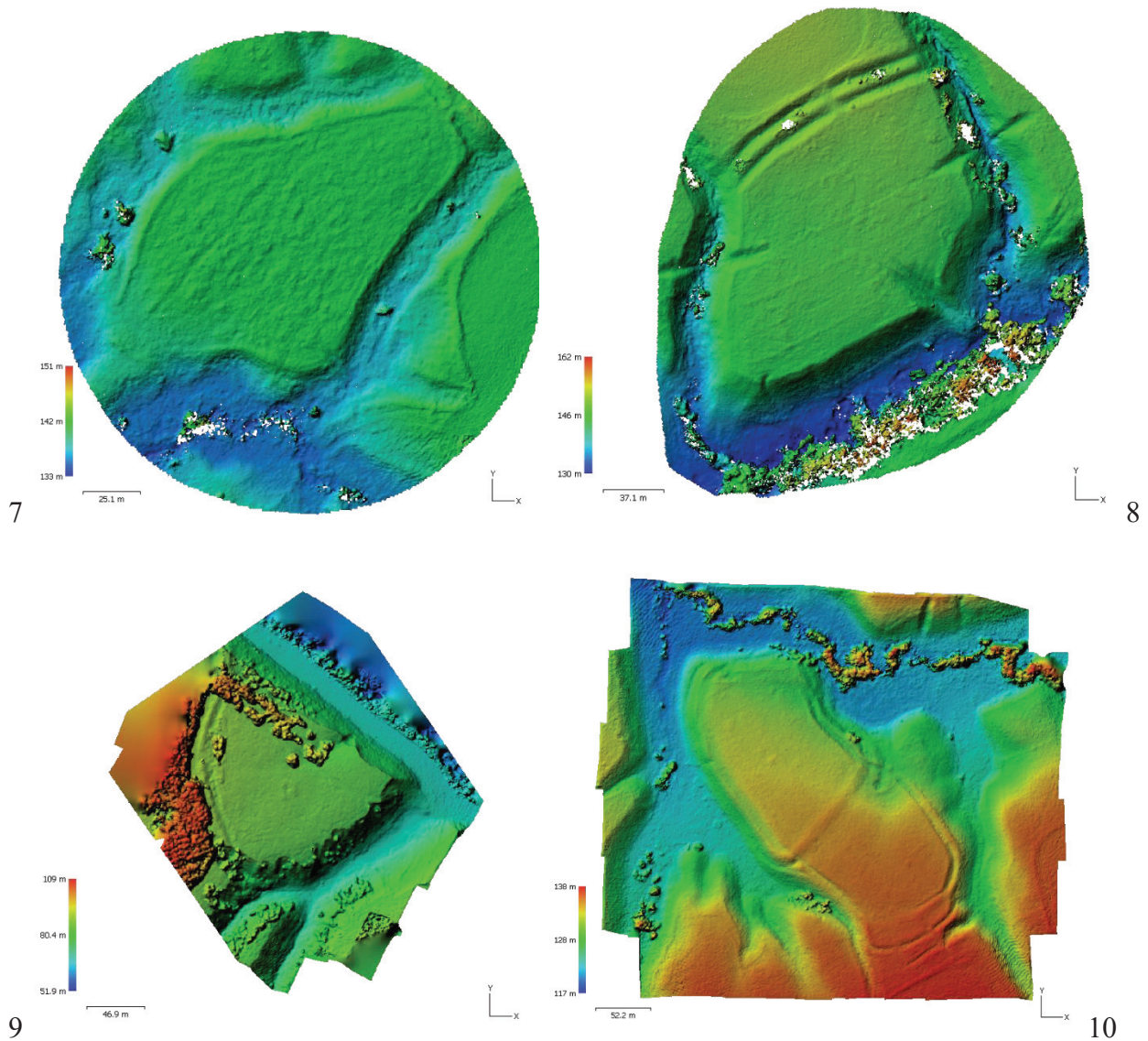


Рис. 4. Цифровые модели, полученные с помощью ГНСС-БПЛА (1 – Аксубаевское городище; 2 – Альметьевский ПТБО; 3 – Балахчинское городище; 4 – Восточно-Войкинское городище; 5 – Екатерино-Слободкинское городище 1; 6 – Малотолкишское городище; 7 – Новоаксубаевское городище; 8 – Новомокшинское городище; 9 – Остолоповское городище; 10 – Ромодановское городище 1)

Fig. 4. Digital models obtained using GNSS-UAV (1 – Aksubaevskoe ancient settlement; 2 – Almetyevskoe PTBO; 3 – Balakhchinskoe ancient settlement; 4 – Eastern-Voykinskoe ancient settlement; 5 – Ekaterino-Slobodkinskoe 1 ancient settlement; 6 – Malotolkishskoe ancient settlement; 7 – Novoaksubaevskoe ancient settlement; 8 – Novomokshinskoe ancient settlement; 9 – Ostolopovskoe ancient settlement; 10 – Romodanovskoe 1 ancient settlement)

Табл. 3. Погрешность моделей, полученных с помощью ГНСС-БПЛА
 Table 3. Accuracy of models obtained using GNSS-UAV

Участок	Количество снимков	Площадь (га)	Погрешность
Аксубаевское городище	60	5.54	0.01 м
Альметьевский ПТБО	291	36.00	0.03 м
Балахчинское городище	147	11.40	0.05 м
Восточно-Войкинское городище	100	22.30	0.05 м
Екатерино-слободкинское городище 1	185	58.50	0.05 м
Малотолкишское городище	62	8.71	0.05 м
Новоаксубаевское городище	29	3.43	0.05 м
Новомокшинское городище	59	5.88	0.01 м
Остолоповское городище	33	4.45	0.05 м
Ромодановское городище 1	66	15.70	0.05 м

В среднем, одна аккумуляторная батарея DJI Phantom 4 PRO V2 позволяет производить измерения на протяжении 15 минут, что, в зависимости от высоты полета и процента продольного и поперечного перекрытия соседних снимков позволяет охватить до 1 кв. км. территории. Расстановка и измерение координат опорных точек занимает от получаса и, увеличивается пропорционально количеству марок, при этом, число последних увеличивается в зависимости от площади исследования. Таким образом, использование ГНСС-БПЛА позволяет увеличивать производительность многократно. Отсутствие опорных точек позволяет получить модель без локальных понижений и искажений, что в перспективе позволяет производить работы по многолетним измерениям динамики экзогенных процессов.

ВЫВОДЫ

Апробированная методика построения высокоточных моделей рельефа на основе съемки с оснащенного ГНСС-приемником беспилотным летательным аппаратом позволяет получить детальную и корректную модель. Ни на одном из тестовых участков не было обнаружено геометрических искажений или областей с локальными искажениями высот, вне зависимости от площади участков. Разрешение получаемых моделей варьируется от необходимого для конкретного исследования уровня и может достигать 1 см на пиксель. Погрешности геопозиционирования позволяют полностью отказаться от использования наземных опорных точек, многократно уменьшив тем самым время проведения съемочных полевых работ, а также в перспективе позволят организовывать сети мониторинга за динамическими процессами на основе повторных наблюдений. Однако, для верификации произведенных измерений и для оценок погрешностей ЦМВ все же рекомендуется установка контрольных точек или контроль по характерным объектам.

С точки зрения выбора конкретного инструментального решения можно отметить, что используемый модифицированный беспилотный летательный аппарат DJI Phantom 4 PRO V2 позволяет добиться точности, сопоставимой с готовыми решениями, в том числе разработки DJI. Используемый ГНСС-БПЛА многократно доступнее, однако, уступает в простоте эксплуатации готовым решениям.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 18-09-40114 (разработка и апробация методики съемки с ГНСС-БПЛА) и РНФ №19-17-00064 (разработка и апробация методики камеральной обработки полевых данных)

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by Russian Foundation for Basic Research (project No 18-09-40114) (development and approbation of methods of GNSS-UAV surveying) and Russian Science Foundation (project No 19-17-00064) (development and approbation of methods of field data processing).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Benassi F., Dall'Asta E., Diotri F., Forlani G., Morra di Cella U., Roncella R., Santise M.* Testing Accuracy and Repeatability of UAV Blocks Oriented with GNSS-Supported Aerial Triangulation. *Remote Sens*, 2017. Т. 9. No 2. С. 172. DOI: 10.3390/rs9020172.
2. *Bolkas D.* Assessment of GCP Number and Separation Distance for Small UAS Surveys with and without GNSS-PPK Positioning. *J. Surv. Eng*, 2019. Т. 145. No 3. С. 04019007. DOI: 10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000283.
3. *Dewez T.J.B., Leroux J., Morelli S.* Cliff collapse hazard from repeated multicopter UAV acquisitions: return on experience. *ISPRS – Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci*, 2016. Т. XLI-B5. С. 805–811. DOI: 10.5194/isprsarchives-XLI-B5-805-2016.
4. *Dinkov D.* A Low Cost Method UAV-PPK-Accuracy and Application, 2019. DOI: 10.13140/RG.2.2.31557.81123.
5. *Ermolaev O.P., Mal'tsev K.A., Mukharamova S.S., Kharchenko S.V., Vedeneeva E.A.* Cartographic model of river basins of European Russia. *Geogr. Nat. Resour*, 2017. Т. 38. No 2. С. 131–138. DOI: 10.1134/S1875372817020032.
6. *Gafurov A., Gainullin I., Usmanov B., Khomyakov P., Kasimov A.* Impacts of fluvial processes on medieval settlement Lukovskoe (Tatarstan, Russia). *Proc. Int. Assoc. Hydrol. Sci*, 2019. Т. 381. С. 31–35. DOI: 10.5194/piahs-381-31-2019.
7. *Gafurov A.* The Methodological Aspects of Constructing a High-Resolution DEM of Large Territories Using Low-Cost UAVs on the Example of the Sarycum Aeolian Complex, Dagestan, Russia. *Drones*, 2021. Т. 5. № 1. С. 7. DOI: 10.3390/drones5010007.
8. *Gafurov A.M., Yermolayev O. P.* Automatic Gully Detection: Neural Networks and Computer Vision. *Remote Sens*, 2020. Т. 12. No 11. С. 1743. DOI: 10.3390/rs12111743.
9. *Gainullin I.I., Khomyakov P.V., Sitdikov A.G., Usmanov B.M.* Qualitative assessment of the medieval fortifications condition with the use of remote sensing data (Republic of Tatarstan). *Fifth International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2017)*, 2017. С. 104440X. DOI: 10.1117/12.2279136.
10. *Groves P.D.* Principles of GNSS, inertial, and multisensor integrated navigation systems. Boston/London: Artech house, 2013. 776 с.
11. *Langley R.B.* Rtk gps. *Gps World*, 1998. Т. 9. No 9. С. 70–76.
12. *Mancini F., Dubbini M., Gattelli M., Stecchi F., Fabbri S., Gabbianelli G.* Using Unmanned Aerial Vehicles (UAV) for High-Resolution Reconstruction of Topography: The Structure from Motion Approach on Coastal Environments. *Remote Sens*, 2013. Т. 5. No 12. С. 6880–6898. DOI: 10.3390/rs5126880.

13. *Tahar K.N.* An evaluation on different number of ground control points in unmanned aerial vehicle photogrammetric block. *Int Arch Photogramm Remote Sens Spat Inf Sci*, 2013. T. 40. C. 93–98. DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-2-W2-93-2013.
14. *Takasu T., Yasuda A.* Development of the low-cost RTK-GPS receiver with an open source program package RTKLIB. *Int. Symp. GPSGNSS*, 2009. C. 4–6.
15. *Tomaščík J., Mokroš M., Surový P., Grznárová A., Merganič J.* UAV RTK/PPK method – an optimal solution for mapping inaccessible forested areas? *Remote Sens*, 2019. T. 11. No 6. C. 721. DOI: 10.3390/rs11060721.
16. *Villanueva J.K.S., Blanco A. C.* Optimization of ground control point (GCP) configuration for unmanned aerial vehicle (UAV) survey using structure from motion (SfM). *Int Arch Photogramm Remote Sens Spat Inf Sci*, 2019. C. 167–174. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-4-W12-167-2019.
17. *Yu G., Su Y., Yu L., Gong L., Zhao D.* Optimizing Pose of UAV Image Based on PPK Technology. *China High Resolution Earth Observation Conference: Springer*, 2019. C. 11–35. DOI: 10.1007/978-981-15-3947-3_2.
18. *Zhang H., Aldana-Jague E., Clapuyt F., Wilken F., Vanacker V., Van Oos, K.* Evaluating the Potential of PPK Direct Georeferencing for UAV-SfM Photogrammetry and Precise Topographic Mapping. *Earth Surf Dyn Discuss*, 2019. C. 1–34. DOI: 10.5194/esurf-2019-2.

REFERENCES

1. *Benassi F., Dall’Asta E., Diotri F., Forlani G., Morra di Cella U., Roncella R., Santise M.* Testing Accuracy and Repeatability of UAV Blocks Oriented with GNSS-Supported Aerial Triangulation. *Remote Sens*, 2017. V. 9. No 2. P. 172. DOI: 10.3390/rs9020172.
2. *Bolkas D.* Assessment of GCP Number and Separation Distance for Small UAS Surveys with and without GNSS-PPK Positioning. *J. Surv. Eng*, 2019. V. 145. No 3. P. 04019007. DOI: 10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000283.
3. *Dewez T.J.B., Leroux J., Morelli S.* Cliff collapse hazard from repeated multicopter UAV acquisitions: return on experience. *ISPRS – Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci*, 2016. V. XLI-B5. P. 805–811. DOI: 10.5194/isprsarchives-XLI-B5-805-2016.
4. *Dinkov D.* A Low Cost Method UAV-PPK-Accuracy and Application. 2019. DOI: 10.13140/RG.2.2.31557.81123.
5. *Ermolaev O.P., Mal’tsev K.A., Mukharamova S.S., Kharchenko S.V., Vedeneeva E.A.* Cartographic model of river basins of European Russia. *Geogr. Nat. Resour*, 2017. V. 38. No 2. P. 131–138. DOI: 10.1134/S1875372817020032.
6. *Gafurov A., Gainullin I., Usmanov B., Khomyakov P., Kasimov A.* Impacts of fluvial processes on medieval settlement Lukovskoe (Tatarstan, Russia). *Proc. Int. Assoc. Hydrol. Sci*, 2019. V. 381. P. 31–35. DOI: 10.5194/piahs-381-31-2019.
7. *Gafurov A.* The Methodological Aspects of Constructing a High-Resolution DEM of Large Territories Using Low-Cost UAVs on the Example of the Sarycum Aeolian Complex, Dagestan, Russia. *Drones*, 2021. V. 5. No 1. P. 7. DOI: 10.3390/drones5010007.
8. *Gafurov A. M., Yermolayev O. P.* Automatic Gully Detection: Neural Networks and Computer Vision. *Remote Sens*, 2020. V. 12. No 11. P. 1743. DOI: 10.3390/rs12111743.
9. *Gainullin I.I., Khomyakov P.V., Sitdikov A.G., Usmanov B.M.* Qualitative assessment of the medieval fortifications condition with the use of remote sensing data (Republic of Tatarstan). *Fifth International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2017)*, 2017. P. 104440X. DOI: 10.1117/12.2279136.

10. *Groves P.D.* Principles of GNSS, inertial, and multisensor integrated navigation systems. Boston/London: Artech house, 2013. 776 p.
 11. *Langley R.B.* Rtk gps. *Gps World*, 1998. V. 9. No 9. P. 70–76.
 12. *Mancini F., Dubbini M., Gattelli M., Stecchi F., Fabbri S., Gabbianelli G.* Using Unmanned Aerial Vehicles (UAV) for High-Resolution Reconstruction of Topography: The Structure from Motion Approach on Coastal Environments. *Remote Sens*, 2013. V. 5. No 12. P. 6880–6898. DOI: 10.3390/rs5126880.
 13. *Tahar K.N.* An evaluation on different number of ground control points in unmanned aerial vehicle photogrammetric block. *Int Arch Photogramm Remote Sens Spat Inf Sci*, 2013. T. 40. C. 93–98. DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-2-W2-93-2013.
 14. *Takasu T., Yasuda A.* Development of the low-cost RTK-GPS receiver with an open source program package RTKLIB. *Int. Symp. GPSGNSS*. 2009. C. 4–6.
 15. *Tomašík J., Mokroš M., Surový P., Grznárová A., Merganič J.* UAV RTK/PPK method – an optimal solution for mapping inaccessible forested areas? *Remote Sens*, 2019. T. 11. No 6. C. 721. DOI: 10.3390/rs11060721.
 16. *Villanueva J. K. S., Blanco A. C.* Optimization of ground control point (gcp) configuration for unmanned aerial vehicle (uav) survey using structure from motion (SfM). *Int Arch Photogramm Remote Sens Spat Inf Sci*. 2019. C. 167–174. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-4-W12-167-2019
 17. *Yu G., Su Y., Yu L., Gong L., Zhao D.* Optimizing Pose of UAV Image Based on PPK Technology. *China High Resolution Earth Observation Conference: Springer*, 2019. C. 11–35. DOI: 10.1007/978-981-15-3947-3_2.
 18. *Zhang H., Aldana-Jague E., Clapuyt F., Wilken F., Vanacker V., Van Oos, K.* Evaluating the Potential of PPK Direct Georeferencing for UAV-SfM Photogrammetry and Precise Topographic Mapping. *Earth Surf Dyn Discuss*, 2019. C. 1–34. DOI: 10.5194/esurf-2019-2.
-