

Правительство Республики Татарстан  
Министерство цифрового развития государственного управления,  
информационных технологий и связи Республики Татарстан  
Казанский (Приволжский) Федеральный университет  
ГКУ «Центр цифровой трансформации Республики Татарстан»  
ГУП «Центр информационных технологий Республики Татарстан»



ТАТАРСТАНСКИЙ  
НЕФТЕГАЗОХИМИЧЕСКИЙ  
ФОРУМ



Посвященный году науки и технологий

Х НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
**«АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ГЕОДЕЗИИ  
И ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ»**

**ПРОГРАММА  
ТЕЗИСЫ И ДОКЛАДЫ**

**31 августа-  
1 сентября**  
Казань 2021



## Создание цифровых моделей высот с использованием ГНСС-БПЛА

*А.М. Гафуров<sup>1</sup>, Б.М. Усманов<sup>1</sup>, И.И. Гайнуллин<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Казанский федеральный университет, Институт экологии и природопользования*

*<sup>2</sup>АНО «НИЦ «Страна городов»*

### 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 ортофото-план. До недавнего времени использовался подход, основанный на позиционировании на основе координат опорных наземных точек. 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. 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 0.5x0.5 м отчетливо различаются с высоты 100 м, опорные знаки размером 0.7x0.7 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, но 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. Большое расстояние (500 м и больше) между опорными точками, приводит к неопределенности и большим погрешностям определения координат в узлах сетки модели высот (Mancini и др., 2013; Benassi и др., 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 и др., 2019; Yu и др., 2019; Zhang и др., 2019).

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

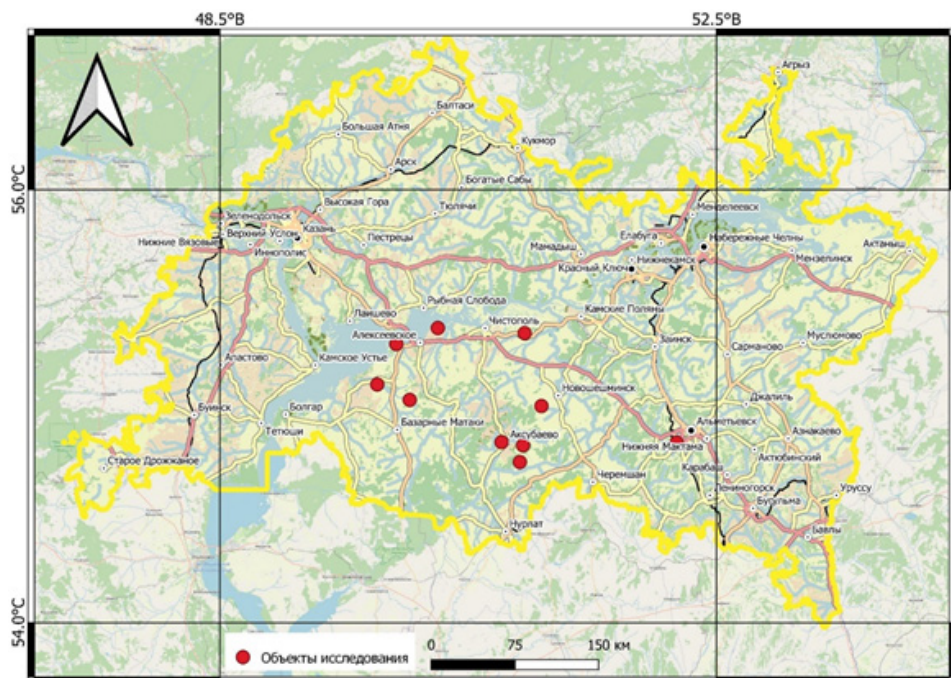


Рис. 1. Территория исследования с отметками тестовых участков.



*Рис. 2. БПЛА DJI Phantom 4 Pro v2 с внесенными изменениями.*

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 за-пись 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 и др., 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 про-граммное обеспечение (ПО) UAV Design Tools. RINEX файл с внесенными изменениями в дальнейшем обрабатывается методом РПК в специализированном геодезическом ПО для уравнивания базовых линий. Нами для этого была использована библиотека RTK LIB (Ta-kasu, Yasuda, 2009).

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

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	0.005	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 (Рис. 3а), на котором было установлено шесть контрольных точек. Контрольные точки закладывались равномерно и на разных высотах. Сравнение координат производилось в ПО QGIS, где и накладывались контрольные точки на ортофото-плане и ЦМВ, после чего полученные координаты сравнивались с исходными значениями, взятыми из каталога.

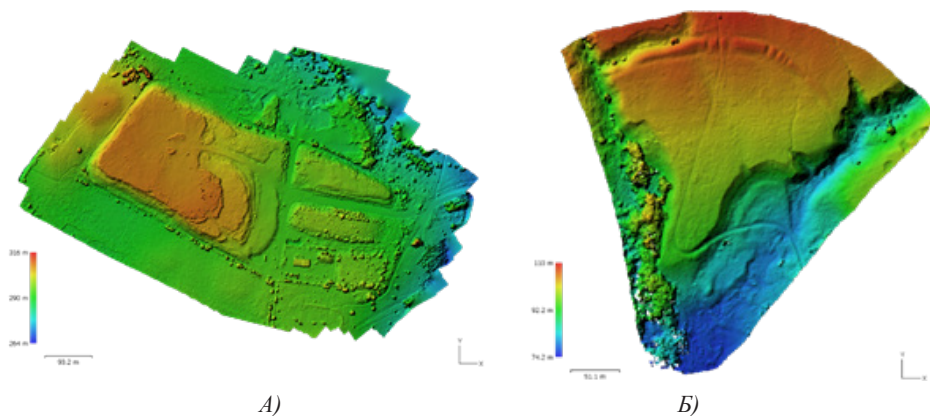


Рис. 3. Цифровые модели, полученные с помощью ГНСС-БПЛА (а- Альметьевский ПТБО, б-Малотолкишское городище).

Координаты наземных контрольных точек были получены с помощью ГНСС-приемника Emlid Reach RS+, и, как и данные с ГНСС-БПЛА были уравнены относительно референсной станции, расположенной в 6.6 км.

Точность ЦМВ Альметьевского ПТБО относительно контрольных точек составила 0.032 м, что находится в пределах точности ГНСС-приемника Emlid Reach RS+ и установ-ленного 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.

Апробация методики построения высокоточных ЦМВ с помощью ГНСС-БПЛА про-изводилась дополнительно на девяти объектах, представляющих собой фортификационные со-оружения XI-XIII вв. различной площади (Рис. 3б). Методика оценки погрешности опре-деления координат в контрольных точках применялась аналогично той, что была использо-вана на Альметьевском ПТБО. По результатам проведенных оценок, погрешности моделей высот находятся в пределах допустимых отклонений (ГОСТ Р 58854-2020), и не превышают 5 см по всем осям (Табл. 2).

В среднем, одна аккумуляторная батарея DJI Phantom 4 PRO V2 позволяет произво-дить измерения на протяжении 15 минут, что, в зависимости от высоты полета и процента продоль-ного и поперечного перекрытия соседних снимков позволяешь охватить до 1 кв. км. террито-рии. 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 позво-ляет получить модель без локальных понижений и искажений, что в перспективе позволяет производить работы по мно-голетним измерениям динамики экзогенных процессов.

Табл. 2. Погрешность моделей, полученных с помощью ГНСС-БПЛА

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

## 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 обна-ружено

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 съёмочных 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 гранта РФФИ № 18-09-40114

### 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. № 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. № 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. XXI-B5. С. 805–811. DOI: 10.5194/isprsarchives-XXI-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. 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
6. 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
7. 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
8. Groves P. D. Principles of GNSS, inertial, and multisensor integrated navigation systems. Boston/London: Artech house, 2013. 776 с.
9. Langley R. B. Rtk gps. *Gps World*, 1998. Т. 9. № 9. С. 70–76.
10. 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. № 12. С. 6880–6898. DOI: 10.3390/rs5126880
11. Tabar 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. Т. 40. С. 93–98. DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-2-W2-93-2013
12. Takasu T., Yasuda A. Development of the low-cost RTK-GPS receiver with an open source program package RTKLIB. *Int. Symp. GPS/GNSS*, 2009. С. 4–6.
13. Tomašič J., Mokoš M., Surový P., Grznárová A., Merganič J. UAV RTK/PPK method—an optimal solution for mapping inaccessible forested areas? *Remote Sens*, 2019. Т. 11. № 6. С. 721. DOI: 10.3390/rs11060721
14. 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. С. 167–174. DOI: 10.5194/isprs-archives-XXII-4-W12-167-2019
15. 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. С. 11–35. DOI: 10.1007/978-981-15-3947-3\_2
16. 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. С. 1–34. DOI: 10.5194/esurf-2019-2