

## СТАТЬЯ

УДК 528.02:528.2/.5:528.7  
DOI 10.17513/USE.38482



CC BY 4.0

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ГЕОПРИВЯЗКИ СНИМКОВ БЕСПИЛОТНЫХ АППАРАТОВ АЭРОФОТОСЪЕМКИ БАЗОВЫМИ СТАНЦИЯМИ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

**Насередин Х. Х. ORCID ID 0009-0001-1806-7831, Акель М. А.**

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Московский государственный университет геодезии и картографии», Москва,  
Российская Федерация, e-mail: geo-gis25@mail.ru*

Последнее десятилетие характеризуется быстрым развитием технологий аэрофотосъемки и 3D-моделирования благодаря совершенствованию беспилотных летательных аппаратов и программного обеспечения фотограмметрической обработки. Ортофотопланы являются ключевым продуктом этих технологий, обеспечивая точное корректное представление земной поверхности. Основная цель данного исследования заключается в разработке методики повышения точности координатной привязки аэрофотоснимков, полученных с помощью беспилотных летательных аппаратов, при которой преодолевается ограничение, связанное с необходимостью использования традиционных наземных опорных точек. Данная методика основывается на использовании информации, поступающей от локальных сетей постоянных станций глобальной навигационной спутниковой системы. Цель – разработка и апробация комплексной методики получения высокоточных ортофотопланов с использованием беспилотных летательных аппаратов Autel Evo II Pro 6K и программного обеспечения Agisoft Metashape, включая оценку точности при использовании дифференциальной GNSS-коррекции (PPK). Методика включает три этапа: первый – планирование и подготовка (оценка метеословий, нормативно-правовые аспекты, проектирование миссии), второй – полевые работы (аэрофотосъемка с использованием наземных опорных точек и дифференциальной GNSS-системы), третий и последний – камеральная обработка (обработка GNSS-данных в GeoBox Office и RTKLIB, фотограмметрическая обработка в Agisoft Metashape). В результате получены ортофотопланы масштаба 1:500 с горизонтальной точностью около 2 см. Анализ точности с использованием PPK-коррекции от ближайшей базовой станции показал среднюю квадратическую ошибку = 10,97 см. При использовании удаленных базовых станций CORS (до 76 км) точность оставалась на сопоставимом уровне (12,269 см). Визуальная и количественная верификация подтвердили пригодность результатов для инженерно-топографических работ. Разработанная методика демонстрирует эффективность комплекса беспилотных летательных аппаратов Autel Evo II Pro 6K и ПО Agisoft Metashape для создания высококачественных геопространственных продуктов. Методика может быть применена в кадастровых работах, инженерных изысканиях, сельском хозяйстве и экологическом мониторинге.

**Ключевые слова:** беспилотные летательные аппараты, аэрофотосъемка, фотограмметрия, Agisoft Metashape, ортофотоплан, цифровая модель местности, Post-Processing Kinematic (PPK), опорные точки

**Благодарности:** Авторы выражают благодарность Шайхилу Исламу Бургановичу, доктору технических наук, директору ООО «Картография».

## IMPROVING THE ACCURACY OF GEO-TAGGING AERIAL PHOTOGRAPHS FROM UNMANNED AERIAL VEHICLES USING GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM BASE STATIONS

**Nasereddin Kh. Kh. ORCID ID 0009-0001-1806-7831, Akel M. A.**

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education  
“Moscow State University of Geodesy and Cartography”,  
Moscow, Russian Federation, e-mail: geo-gis25@mail.ru*

The last decade has been characterized by the rapid development of aerial photography and 3D modeling technologies, thanks to improvements in unmanned aerial vehicles (UAVs) and photogrammetric processing software. Orthophotoplans (orthophoto maps) are a key product of these technologies, providing an accurate and correct representation of the Earth's surface. The primary aim of this research is to develop a method for improving the coordinate accuracy of aerial photographs obtained using UAVs, which overcomes the limitation associated with the need for traditional ground control points (GCPs). This method is based on using information from local networks of permanent Global Navigation Satellite System (GNSS) reference stations. The objective is the development and testing of a comprehensive methodology for obtaining high-precision orthophoto maps using Autel Evo II Pro 6K UAVs and Agisoft Metashape software, including an accuracy assessment when using differential GNSS correction (Post-Processed Kinematic – PPK). The methodology includes three stages: the first is planning and preparation (assessment of weather conditions, regulatory aspects, mission design); the second stage is fieldwork (aerial photography using ground control points and a differential GNSS system); and the third and final stage is office processing (processing of GNSS data in GeoBox Office and RTKLIB, photogrammetric processing in Agisoft Metashape). The results yielded orthophoto maps at a scale of 1:500 with a horizontal accuracy of approximately

2 cm. Accuracy analysis using PPK correction from a nearby base station showed a root mean square error (RMSE) = 10.97 cm. When using remote CORS base stations (up to 76 km away), the accuracy remained at a comparable level (12.269 cm). Visual and quantitative verification confirmed the suitability of the results for engineering and topographic work. Conclusions: The developed methodology demonstrates the effectiveness of the Autel Evo II Pro 6K UAV and Agisoft Metashape software complex for creating high-quality geospatial products. The methodology can be applied in cadastral work, engineering surveys, agriculture, and environmental monitoring.

**Keywords:** Unmanned Aerial Vehicles, aerial survey, photogrammetry, Agisoft Metashape, orthomosaic, Digital Terrain Model (DTM), Post-Processing Kinematic (PPK), Ground Control Points (GCPs)

**Acknowledgements:** The authors would like to thank Shaikhil Islam Burganovich, Doctor of Technical Sciences, Director of Cartography LLC.

## Введение

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) прочно закрепились в современных геодезических, картографических и инженерных изысканиях [1]. Возможность быстрого получения пространственных данных высокого разрешения при минимальных затратах делает дроны незаменимым инструментом для решения широкого спектра прикладных задач [2, 3].

Одним из ключевых методов является топографическая съемка с использованием цифровой фотограмметрии. Эта техника позволяет создавать подробные, скорректированные фотограмметрические карты, цифровые модели рельефа и 3D-модели местности с высокой точностью и скоростью. Основным техническим принципом здесь является стереоскопическая фотограмметрия, которая основана на обработке пар перекрывающихся стереоскопических изображений, позволяющих измерять горизонтальные и вертикальные координаты объектов [4].

Традиционный процесс создания карт на основе данных аэрофотосъемки включал в себя трудоемкий этап создания базы данных съемки (полевое картирование – местоположения с известными координатами). В данной статье предлагается отказаться от традиционного полевого подхода к картографированию. Вместо этого авторы рекомендуют использовать данные с бортовой GNSS-станции дрона и файлы RINEX, полученные от сети базовых станций. Интегрированная обработка с использованием технологии постобработки (Post-Processing Kinematic – PPK) позволяет напрямую определять высокоточные координаты центров проекций каждого изображения, что значительно упрощает и ускоряет весь рабочий процесс [5–7].

**Цель исследования** – разработка и оценка новых методов повышения точности координатной привязки аэрофотоснимков, полученных с помощью беспилотных летательных аппаратов в условиях отсутствия на земле опорных точек.

## Материалы и методы исследования

Данная методика основывается на использовании информации, поступающей от локальных сетей постоянных станций глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) [8–10]. При создании ортофотопланов и цифровых моделей местности была оценена точность результатов для трех сценариев в условиях отсутствия опорных точек на местности. *Первый сценарий:* расстояние от беспилотного летательного аппарата (БПЛА) до базового приемника, установленного на геодезическом пункте, не превышало 500 м. *Второй сценарий:* расстояние от БПЛА до ближайшей базовой станции спутниковой сети не превышало 30 км. *Третий сценарий:* расстояние от БПЛА до ближайшей базовой станции сети составляло более 70 км. По итогам оценки был проведен анализ точности для каждого сценария, а также выполнен сравнительный анализ с альтернативным методом.

Для решения поставленных задач в работе использованы данные двух типов:

*Аэрофотосъемочные данные*, полученные с помощью БПЛА Autel EVO II Pro 6K [11] (рис. 1). Ключевыми характеристиками для задач фотограмметрического моделирования являются: Фотокамера: 1-дюймовый 20-мегапиксельный CMOS-датчик Sony, обеспечивающий съемку с разрешением до 6К. Навигационная и вспомогательная системы: Бортовая система включает 12 визуальных датчиков для обзора на 360°, что позволяет осуществлять построение карт в режиме реального времени и повышает безопасность полетов, а также интегрированный ГНСС-приемник. Опорное геодезическое обеспечение: для точной геопривязки снимков использовались данные от пары ГНСС-приемников GPS Fora 1, работавших в качестве базовых станций.

*Геодезические измерения*, выполненные с использованием ГНСС-оборудования (приемники модели GPS Fora 1) [12] (рис. 2).



Рис. 1. Беспилотный летательный аппарат (типа Autel Evo II Pro)

Примечание: составлен авторами по источнику: URL: <https://geospb.ru/p/geodezicheskaya-modernizacziya-geobox-fora-ppk-1112-drone-upgrade> (дата обращения: 02.01.2026)



Рис. 2. Дифференциальная система GPS Fora 1 и Fora Lux

Примечание: составлен авторами по источнику: URL: <https://geospb.ru/p/gnss-priemnik-geobox-fora-lux/> (дата обращения: 02.01.2026)

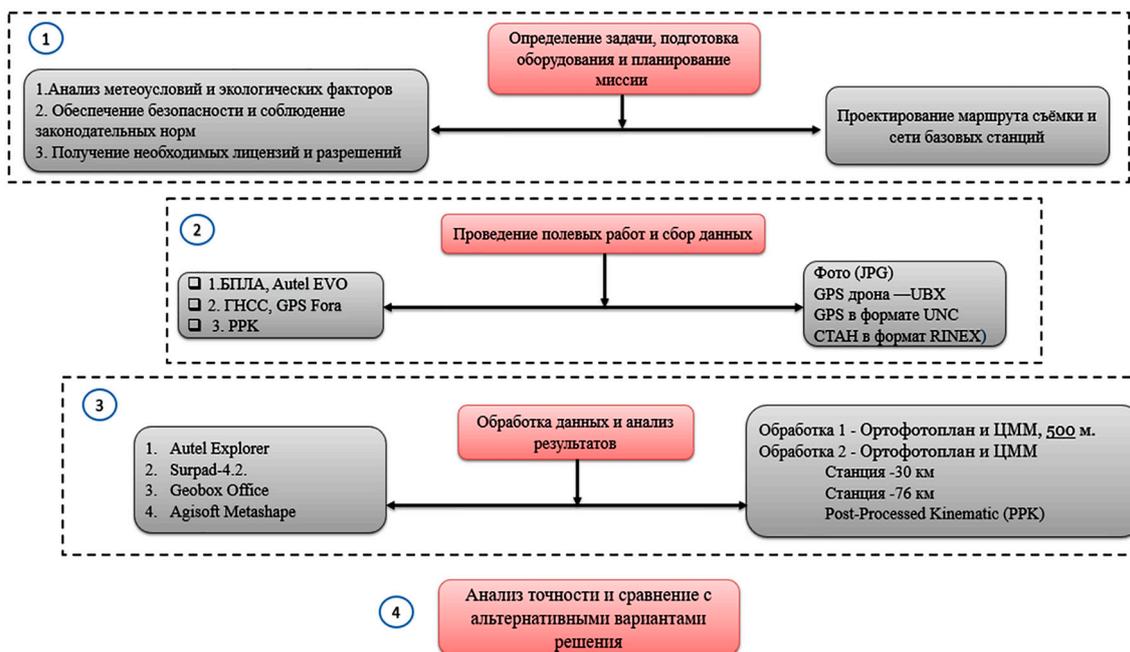


Рис. 3. Порядок исследования

Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

Исследование проводилось с использованием следующего программного обеспечения: Autel Explorer – для планирования и управления полетами БПЛА Autel Evo II Pro; Surpad 4.2 – для обработки данных с ГНСС-приемников Fora 1 и Fora Lux; Geobox Office (UAV) – для высокоточной постобработки маршрутов БПЛА на основе данных с базовой станции ГНСС; Agisoft Metashape – для обработки изображений и создания конечных продуктов: ортофото-

планов, цифровых моделей рельефа (ЦМР) и цифровых моделей местности (ЦММ).

#### Порядок исследования

Исследование выполнялось по стандартной для геодезических задач трехэтапной методологии (рис. 3).

Подготовительный этап. Этот этап включал в себя идентификацию цели, подготовку оборудования (БПЛА Autel Evo II Pro и ГНСС-приемники Fora), планирова-

ние миссии, анализ местности и окружающей среды, а также получение необходимых разрешений в соответствии с требованиями безопасности и законодательства [1, 13].

**Результаты исследования и их обсуждение**

На втором этапе проводятся полевые работы и сбор данных, на этапе полевых работ были сделаны аэрофотоснимки и собраны первичные данные. Параметры полетной миссии были разработаны с использованием программного обеспечения Autel Explorer (рис. 4).

При создании миссии были определены следующие основные параметры, определяющие качество и полноту охвата: разрешение изображения (Ground Sample Distance – GSD), целевой размер пикселя на местности; высота фотографирования рассчитывается математически на основе заданного разрешения изображения на местности и характеристик камеры; перекрытия – продольное (px %) и поперечное (py %); базисы фотографирования – продольный (Bx) и поперечный (By); количество маршрутов, временной интервал между изображениями и количество снимков в маршруте [14].

Расчетная высота фотографирования H<sub>ф</sub>:

$$H_{\phi} = 2R \cdot GSD \cdot (fk/\delta), \quad (1)$$

где H<sub>ф</sub> – высота фотографирования относительно заданной поверхности (м);

fk – фокусное расстояние фотосистемы (м);

GSD – проекция пикселя матрицы ЦАФА на заданной поверхности (м);

R – разрешение на матрицы (цикл/пиксель)

δ – размер пикселя матрицы (м).

При разрешении GSD, равном 2 см,

$$H_{\phi} = f \cdot GSD / Pxl =$$

$$= 0,011 \cdot 0,02 / 0,00000236 = 93,3 \text{ м};$$

по программе (Autel Explorer) H<sub>ф</sub> = 93 м.

Расчетное продольное перекрытие аэрофотоснимков, p<sub>x</sub> %:

$$p_x = p_{x0} + \Delta p_h + \Delta p_n, \quad (2)$$

где p<sub>x0</sub> – минимальное продольное перекрытие = 60%,

Δp<sub>h</sub> – поправка за рельеф,

$$\Delta p_h = \Delta h \cdot \frac{(100 - p_{x0})}{H_{\phi}}, \quad (3)$$

где Δh – разность между самой высокой точкой и самой низкой точкой участка,

Δp<sub>n</sub> – навигационная поправка за ошибку самолетовождения.

$$\begin{aligned} p_x &= p_{x0} + \Delta p_h + \Delta p_n = \\ &= 60 + (13 - 0) \cdot (100 - 60) / 186 + 4 = 87,34\%, \\ p_x &= 85\% \text{ по (Autel Explorer)}. \end{aligned}$$

Расчетное поперечное перекрытие аэрофотоснимков py, %:

Для масштаба 1:10 000 и крупнее

$$p_y = 40\% + \left( 50 \cdot \frac{\Delta h}{100 \cdot H_{\phi}} \right). \quad (4)$$

Для масштаба 1:10 000 и крупнее

$$p_y = 40 + (50 \cdot (13/186)) = 73,41\%,$$

p<sub>y</sub> = 70% по (Autel Explorer).

Продольный базис фотографирования, B<sub>x</sub> (м):

$$B_x = \frac{(X_{\Pi} M_{\phi})(100 - p_x)}{100}, \quad (5)$$

где M<sub>φ</sub> = H<sub>φ</sub> / f – знаменатель масштаба фотографирования,

$$M_{\phi} = 8474,545,$$

$$B_x = 184,88 \text{ по (Autel Explorer)}$$

$$M_{\phi} = 8500, B_x = 185,44.$$

Поперечный базис фотографирования B<sub>y</sub> (м):

$$B_x = \frac{(Y_{\Pi} M_{\phi})(100 - p_y)}{100}, \quad (6)$$

где X<sub>π</sub>, Y<sub>π</sub> – физический размер матрицы (м)

$$B_y = 156,4, B_y = 170 \text{ по (Autel Explorer)}.$$

Интервал фотографирования τ (сек):

$$\tau = \frac{X_{\Pi} H_{\phi}}{f \cdot w} \cdot \frac{100 - p_x}{100}, \quad (7)$$

где X<sub>π</sub> – физический размер фото матрицы вдоль линии полета (м),

W – путевая скорость БВС (м/с).

τ = 4 (сек) по (Autel Explorer).

Количество аэроснимков в одном маршруте N<sub>x</sub>:

$$N_x = (L_x / B_x) + N_3; N_3 = 4, \quad (8)$$

где L<sub>x</sub> – длина участка съемки (м)

$$N_x = 10,27 \text{ по (Autel Explorer)} N_x = 12.$$

Количество маршрутов N<sub>y</sub>:

$$N_y = (L_y / B_y) + 0,5 \cdot j; j = 2,$$

где N<sub>y</sub> ширина участка (м), (9)

$$N_y = 4, \text{ по (Autel Explorer)} N_y = 4.$$

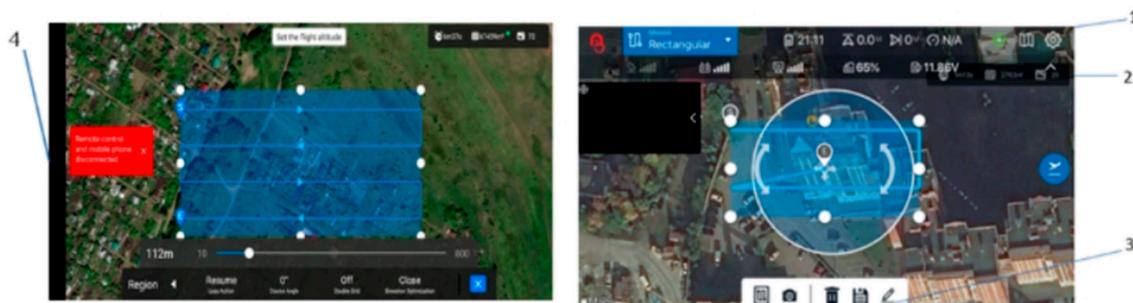


Рис. 4. Программа Autel Explorer: 1 – настройка; 2 – создание новой миссии; 3 – редактирование миссии; 4 – настройка параметров съемки  
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования



Рис. 5. Расчетные данные аэрофотосъемки в программе Autel Explorer  
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

На рис. 5 показаны расчетные параметры аэрофотоснимков, сгенерированные программой Autel Explorer, и проведено их сравнение с результатами, полученными с использованием аналитических формул для съемки.

Третий, камеральный этап включает постобработку собранных данных. Базовым требованием для корректной обработки и компенсации погрешностей является синхронная регистрация в реальном времени полета информации из следующих источников: данные БПЛА (файл формата UBX), измерения наземной станции Foga Lux (файл формата UNC) и аэрофотоснимки (формат JPG). Первичная обработка заключается в преобразовании файлов спутниковых измерений в формат RINEX с последующей коррекцией координат центра

съемки относительно опорной точки. Полученные поправки применяются к снимкам для минимизации ошибок геопривязки на дальнейших этапах. Данный этап выполняется в программном комплексе Geobox Office, который обеспечивает обработку ГНСС-измерений, коррекцию временных меток в RINEX-файлах, фильтрацию дублирующихся данных, сопоставление снимков с точными координатами (с возможностью редактирования метаданных EXIF) и работу с локальными системами координат [15] (рис. 6). Процесс обработки в Geobox Office включает следующие шаги: загрузка файла данных приемника БПЛА и файла статической наземной базовой станции, где расстояние от БПЛА до базового приемника, установленного на геодезическом пункте, не превышало 500 м; автоматическая за-

грузка стандартных параметров обработки с последующей возможностью их ручной коррекции; задание координат наземной станции (ручной ввод или автоматический расчет как среднего значения измерений приемника); добавление аэрофотоснимков и запуск процесса обработки.

В результате для каждого изображения генерируется набор модифицированных координат. Эти данные импортируются в программный комплекс Agisoft Metashape для обработки изображений и создания конечного продукта. Рабочий процесс включает в себя создание плотного облака точек, построение 3D-модели и текстуры, а также

генерацию производных продуктов – ЦМР и ортофотоплана на основе плотного облака точек и модели [16, 17] (рис. 7).

При сравнении координат центра изображения, полученных из файла данных приемника БПЛА, которые выступают в качестве контрольных точек, с координатами центра изображения после обработки в Geobox Office были обнаружены следующие ошибки: максимальная ошибка по оси X составляет 4,79 см, по оси Y = 5,75 см, по высоте Z = 8,021 см, по плоскости XY = 7,48 см, а общая ошибка, или среднее квадратическое отклонение, составляет 10,97 см. Результаты сравнения представлены на рис. 8.

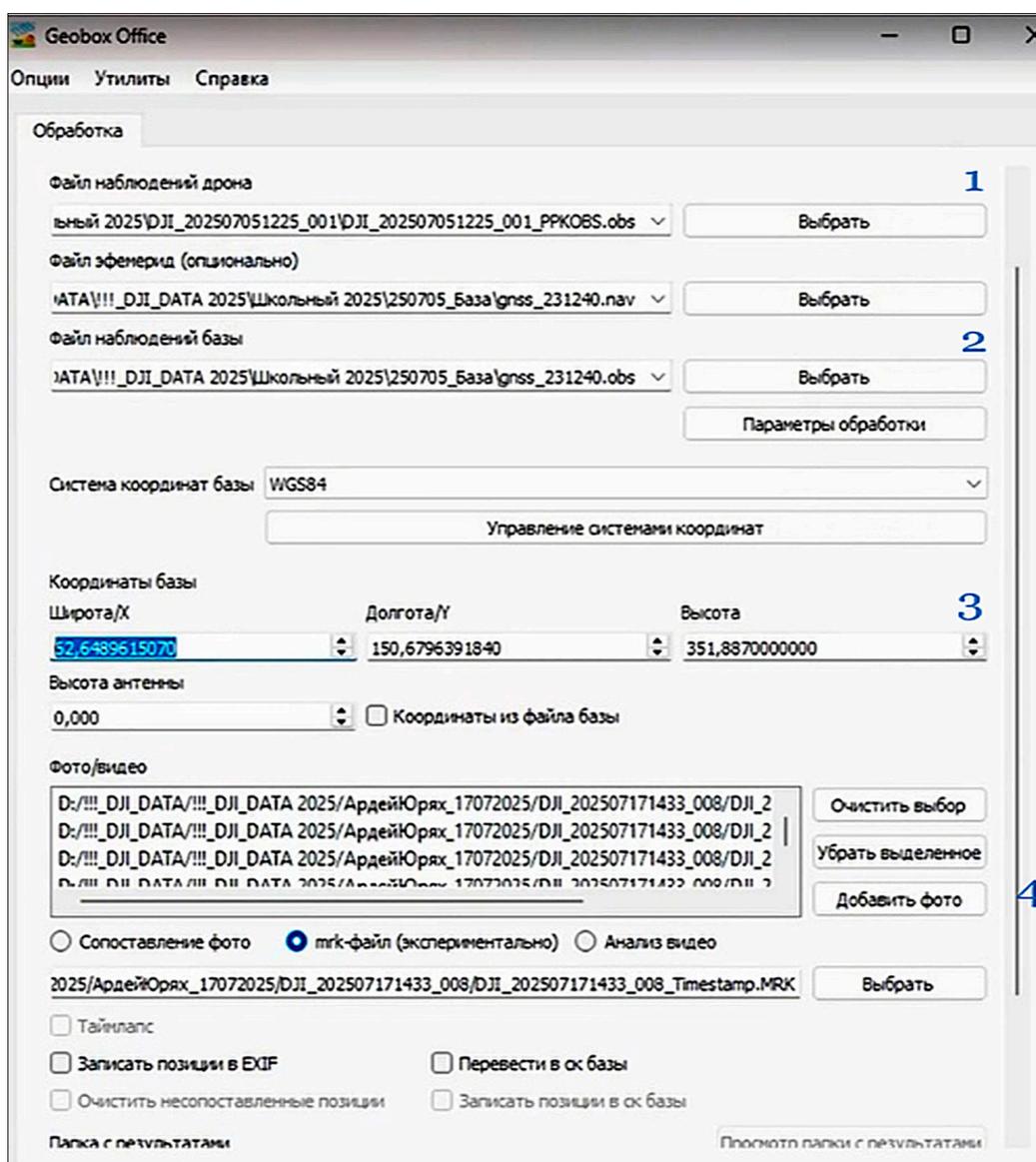


Рис. 6. Процесс обработки данных в программе Geobox Office  
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

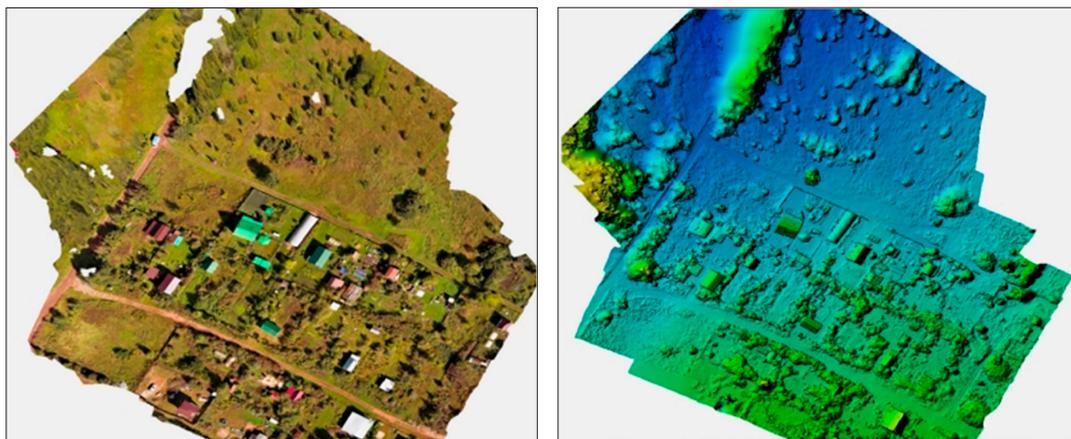


Рис. 7. Ортофотоплан и ЦММ, поселок Лекаревка, город Уфа, Республика Башкортостан  
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования



Рис. 8. Погрешность определения координат (Лекаревка)  
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

Для создания ортофотоплана и цифровой модели местности для второго сценария, где расстояние между БПЛА и ближайшей базовой станцией спутниковой сети (в данном случае станцией UFA2) не превышает 30 км, а местоположение находится к северо-востоку от точки аэрофотосъемки, авторы повторяют обработку в программном обеспечении Geobox Office. Это включает в себя загрузку файла данных с приемника БПЛА и файла RINEX, полученного со станции UFA2. Файл RINEX можно загрузить с официального сайта CORS.

На рис. 9 показано, как загрузить файл с официального сайта: первый шаг – выбор

базовой станции – UFA2, второй – указание часового пояса, третий – установка параметра «Точность измерения» на 10 с, который является общедоступной максимально возможной точностью, и последний шаг – загрузка файла RINEX [18]

В исследовании использовались данные постоянной станции URNA. Файл наблюдений в формате RINEX также был получен с официального сайта сети. Станция URNA расположена примерно в 31 км к востоку от места проведения аэрофотосъемки, в районе поселка Лекаревка. На рис. 10 показаны географические координаты всех этих точек.

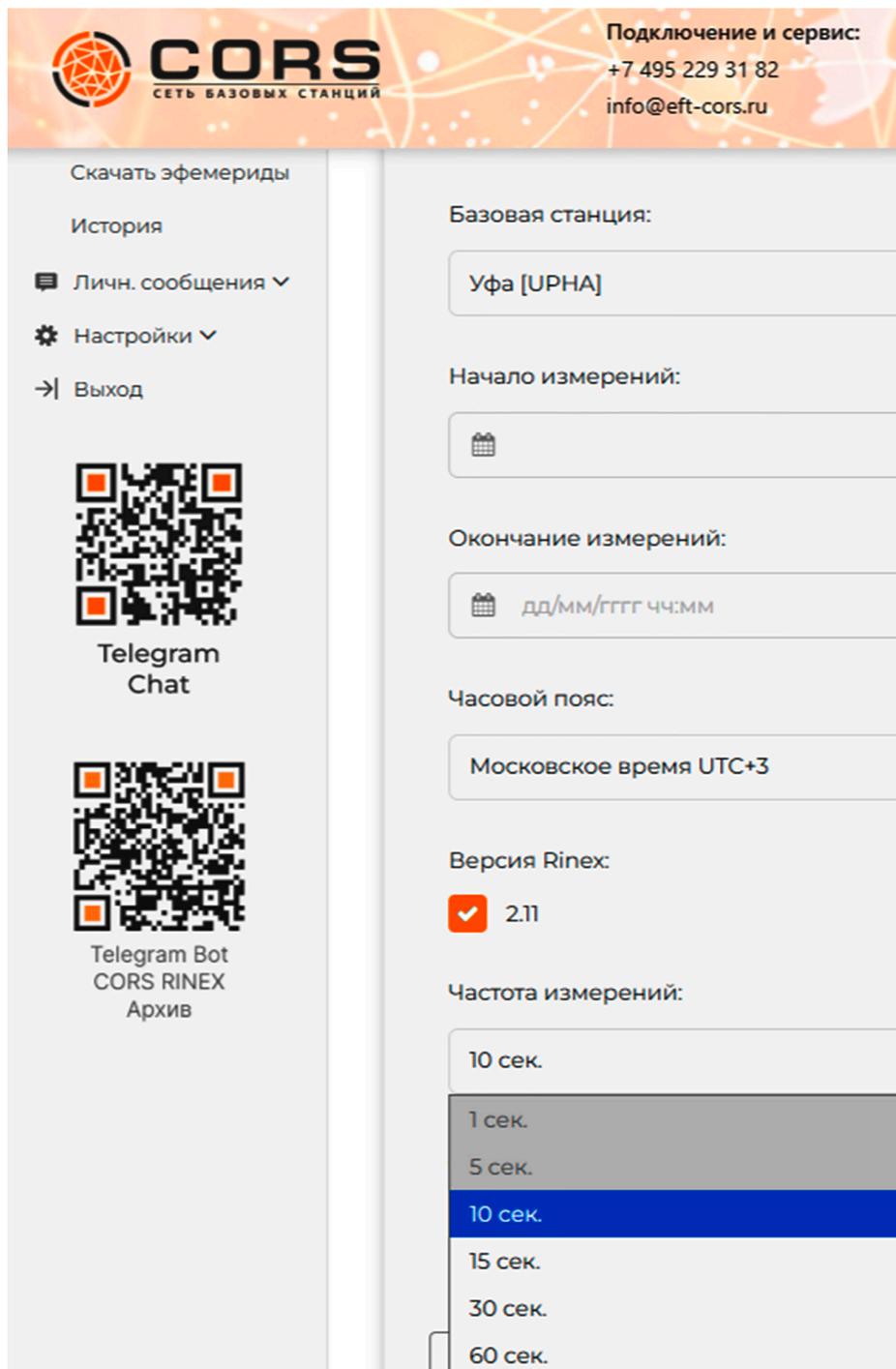


Рис. 9. Порядок загрузки файла RINEX базовой станции Ufa2  
 Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

Средняя квадратическая ошибка при сравнении координат центра изображения, полученных из файла данных приемника БПЛА, с координатами центра изображения после обработки в Geobox Office для станции UFA2 равнялась 12,56 см и для станции УРНА равнялась

13,38 см. Визуализация результатов сравнения координат приведена на рис. 11 и 12. А в предыдущих сравнениях с наземной базовой станцией, где расстояние от БПЛА до приемника не превышало 500 м, средняя квадратическая ошибка равнялась 10,97 см.

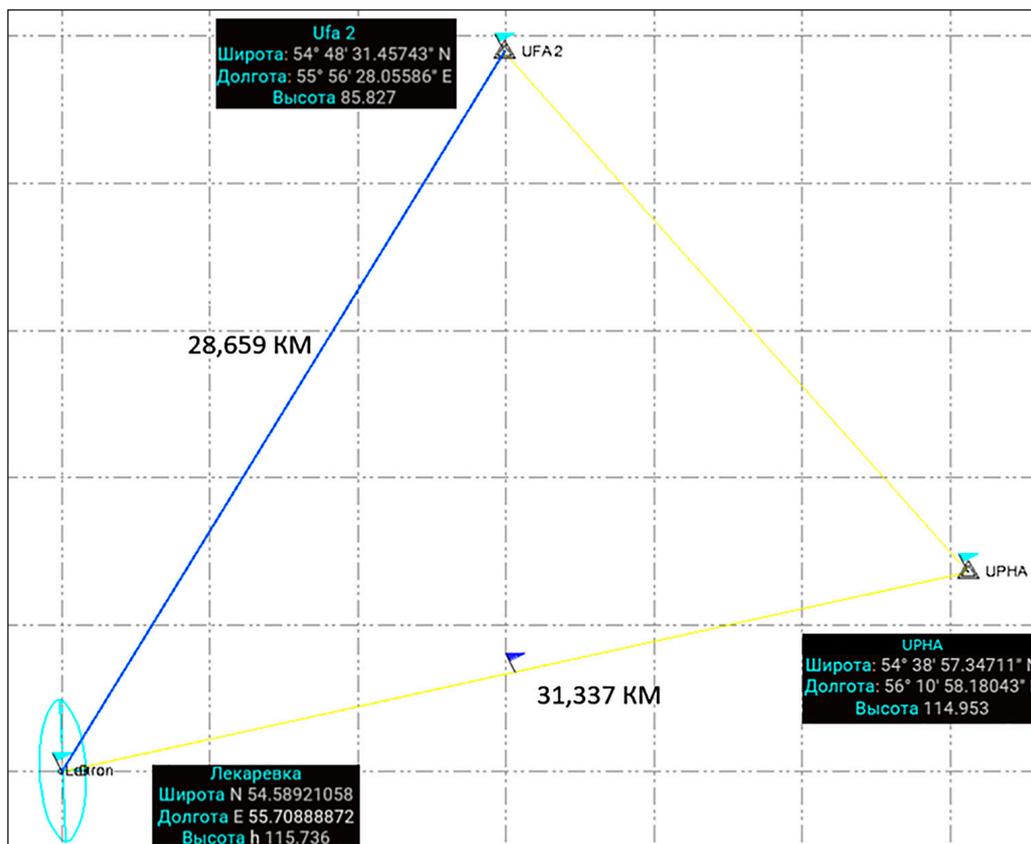


Рис. 10. Картографическая привязка всех пунктов  
 Примечание: составлен автором по результатам данного исследования



Рис. 11. Погрешность определения координат (Ufa2)  
 Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

При увеличении расстояния между БПЛА и базовой станцией до 76 км (третий сценарий) была использована базовая станция «Раевка», расположенная в 76,242 км

к юго-западу от района съемки. На рис. 13 показана область аэрофотосъемки с БПЛА относительно базовой станции во всех сценариях.

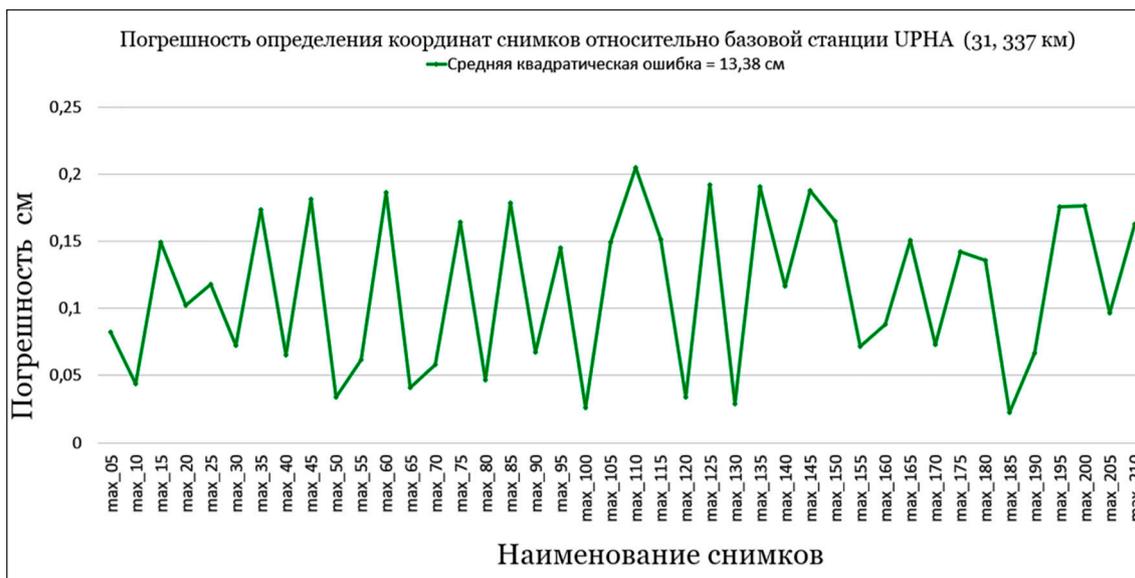


Рис. 12. Погрешность определения координат (URNA)  
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

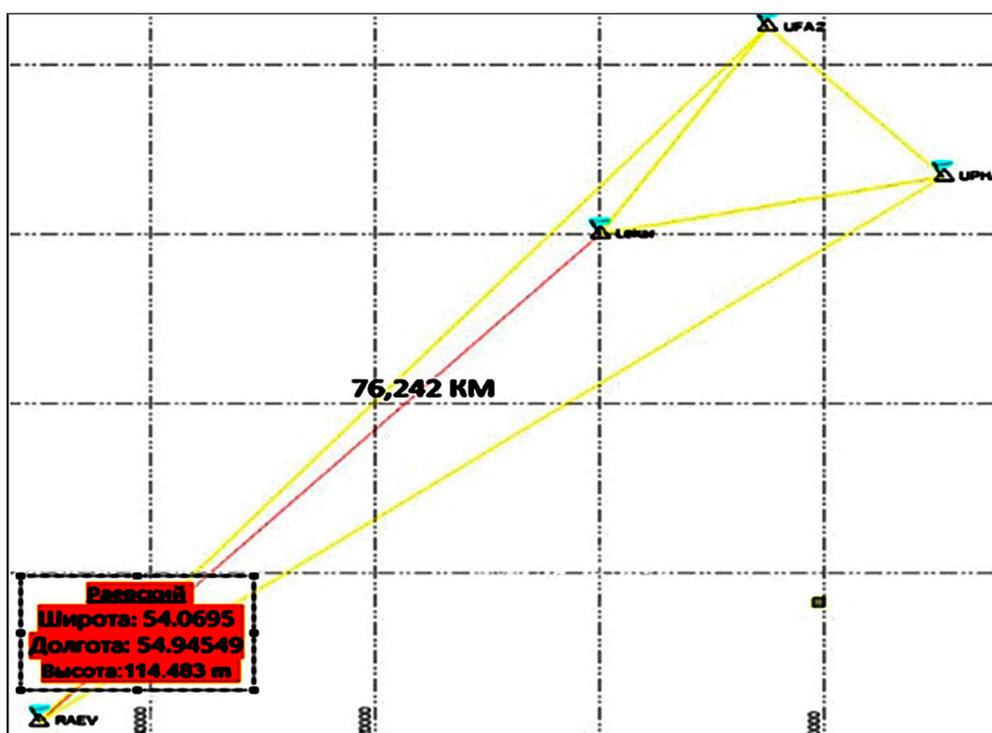


Рис. 13. Картографическая привязка всех базовых станций  
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

Для обработки данных и получения координат центров фотографирования, которые входят в качестве опорных пунктов, использованы файлы (RINEX) данных станций с официального веб-сайта сети CORS по порядку, как указано на рис. 9. В программном

комплексе Geobox Office были выполнены последовательные шаги: загрузка файла данных приемника БПЛА и данных базовой станции «Раевка» (RINEX), выбор системы координат, добавление фотографий и, наконец, запуск процесса обработки.



*Рис. 14. Погрешность определения координат (Раевка)  
Примечание: составлен автором по результатам исследования*

В результате при сравнении координат центров изображений среднее квадратическое отклонение центров изображений составило 12,29 см. Отклонение каждого снимка указано на рис. 14.

Исследование подтверждает возможность построения ортофотоплана и ЦММ с использованием данных открытых ГНСС-станций (файлы RINEX с интервалом 10 с). Показано, что погрешность определения координат незначительно зависит от расстояния до станции, даже при превышении 70 км. Также доказана возможность создания аэрофотоснимков без привлечения классических наземных геодезических точек. В предложенном методе в качестве опорных используются координаты центров самих изображений.

#### Результаты исследования и их обсуждение

1. Исследование показало, что использование данных RINEX из сети непрерывно работающей ГНСС-станции (CORS) позволяет создавать ортофотопланы и цифровые модели местности без необходимости традиционной полевой геодезии с использованием контрольных точек, требуемых традиционными методами. Эта технология исключает дорогостоящую и трудоемкую полевую работу, необходимую при традиционных методах аэрофотосъемки.

2. Точность ортофотопланов и цифровых моделей местности, полученных с использованием данных от статичного

ГНСС-оборудования, установленного на геодезических пунктах (статический режим), лишь незначительно отличается от точности ортофотопланов и ЦММ, созданных с использованием данных с базовой станции, работающей в постобработке (РПК). Это подтверждает взаимозаменяемость этих двух источников данных для достижения требуемой точности.

3. Средняя квадратическая ошибка определения координат центров изображения, рассчитанная с использованием данных от ГНСС-станций сети CORS, остается стабильной и не показывает статистически значимой зависимости от расстояния между базовой станцией и БПЛА в исследуемых диапазонах (до 76 км). Это демонстрирует надежность и эффективность данной технологии, обеспечивая увеличенную дальность действия до базовой станции.

#### Список литературы

1. Турк Г. Г., Карачев Н. К. Использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в геодезии // Вектор ГеоНаук. 2023. Т. 6. № 2. С. 56–60. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov-bpla-v-geodezii> (дата обращения: 24.01.2026). DOI: 10.24412/2619-0761-2023-2-56-60. EDN: ETATBS.
2. Сафонова Т. В., Мокряк А. В., Полежаева М. В., Кенжина Д. С. Использование беспилотных летательных аппаратов в геодезии // Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности. 2025. Т. 10. № 2 (52). С. 116–123. URL: <http://www.openaccessscience.ru/index.php/ijcse/article/view/841> (дата обращения: 03.01.2026). EDN: ZKGUPC.
3. Пруто А. И., Харитонов Т. Б., Реджепов М. Б. Исследование использования беспилотных летательных аппаратов в геодезии // Вопросы управления недвижимостью,

землеустройства и геодезии. 2022. № 2 (2). С. 51–54. URL: <https://qje.su/ru/nauka/article/90254/view> (дата обращения: 23.01.2026). EDN: ATJVJG.

4. Тихомиров П. В., Скрыпников А. В., Володина Ю. Ю., Бондарев А. Б., Боровлев Ю. А., Викулин И. А. Определение геометрических элементов лесовозных автомобильных дорог посредством современных IT-технологий // Теория и практика инновационных технологий в АПК: материалы национальной научно-практической конференции (г. Воронеж, 19–21 апреля 2022 г.). Ч. I. Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2022. С. 134–157. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48599316> (дата обращения: 31.01.2026). EDN: XUYYTV.

5. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLI-B3, 2016 XXIII ISPRS Congress, 12–19 July 2016, Prague, Czech Republic. [Электронный ресурс]. URL: <https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLI-B3/1/2016/isprs-archives-XLI-B3-1-2016.pdf> (дата обращения: 24.01.2026).

6. Rehak M., Skaloud J. Fixed-wing micro aerial vehicle for accurate corridor mapping. ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2015. II-1/W1: P. 23–31.

7. Акл М. Н., Половнев О. В., Насереддин Х. Х. Применение метода точного позиционирования на непрерывно действующих опорных станциях GNSS в Республике Ливан // Успехи современного естествознания. 2025. № 7. С. 57–62. URL: <https://scinetwork.ru/articles/36611> (дата обращения: 29.01.2026). DOI: 10.17513/use.38412. EDN: PVSPWL.

8. James M. R., Robson S., Smith M. W. Uncertainty-based topographic change detection with structure-from-motion photogrammetry: precision maps for ground control and directly georeferenced surveys // Earth Surface Processes and Landforms. № 42 (12). P. 1769–1788. ISSN 0197-9337. URL: <https://research.lancaster-university.uk/en/publications/3-d-uncertainty-based-topographic-change-detection-with-structure/> (дата обращения: 31.01.2026).

9. Сомов Е. В., Шевелев С. Л. Расчетная оценка линейного разрешения на местности цифровой беспилотной аэрофотосъемочной системы для задач таксационного дешифрирования (состояние вопроса, проблематика, модели) // Хвойные бореальной зоны. 2025. Т. 43. № 2. С. 20–26. URL: <https://hbz.elpub.ru/jour/article/view/293/287> (дата обращения: 04.02.2026). DOI: 10.53374/1993-0135-2025-2-20-26. EDN: ZFCCYM.

10. Фокин Г. А., Мещеряков Д. Е. Обзор возможностей программно-аппаратного комплекса prince для высокоточного позиционирования методом RTK // Экономика и качество систем связи. 2025. № 37. URL: [https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-vozmozhnostey-programmno-apparatnogo-](https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-vozmozhnostey-programmno-apparatnogo-kompleksa-prince-dlya-vysokotochnogo-pozitsionirovaniya-metodom-rtk)

[kompleksa-prince-dlya-vysokotochnogo-pozitsionirovaniya-metodom-rtk](https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-vozmozhnostey-programmno-apparatnogo-kompleksa-prince-dlya-vysokotochnogo-pozitsionirovaniya-metodom-rtk) (дата обращения: 31.01.2026).

11. Гафуров А. М., Ермолаев О. П., Усманов Б. М., Хомяков П. В. Создание высокоточных цифровых моделей высот с использованием ГНСС-БПЛА // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2021. Т. 27. № 2. С. 327–339. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47322209>. DOI: 10.35595/2414-9179-2021-2-27-327-339 (дата обращения: 05.01.2026). EDN: TFUDGU.

12. Nex F., Remondino F. UAV for 3D Mapping Applications: A Review. Applied Geomatics. 2014. № 6. № 1–15. DOI: 10.3390/rs4061519.

13. Морковин В. А., Хахулина Н. Б., Семешкина В. В. Эффективность использования БПЛА в геодезии // Вопросы управления недвижимостью, землеустройства и геодезии. 2024. № 1 (5). С. 69–73. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=67862560> (дата обращения: 29.01.2026). EDN: QNFMQM.

14. Табаченко А. А. Фотограмметрические технологии обмеров и трехмерных моделей местности при строительстве зданий и сооружений // Инновации. Наука. Образование. 2021. № 28. С. 903–906. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45487341> (дата обращения: 31.01.2026). EDN: YKBOGO.

15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024611501 Российской Федерация. Программа чтения эфемеридных данных из RINEX файлов базовых станций государственной сети геодезии и картографии: № 2023689824; заявл. 29.12.2023; опубл. 22.01.2024 / А. В. Корвин; заявитель Акционерное общество «Концерн «Созвездие». EDN: DCMYQX.

16. Насереддин Х. Х., Алексашина Е. В., Акель М. А. Повышение точности общедоступной цифровой модели местности с использованием имитационного моделирования аэрофототопографической съемки в программном обеспечении Blender // Успехи современного естествознания. 2025. № 6. С. 71–83. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=82561477> (дата обращения: 31.01.2026). DOI: 10.17513/use.38405. EDN: MYUKXX.

17. Недобитков А. И. Цифровая транспортная трасология на основе Agisoft Metashape и беспилотного летательного аппарата // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2022. Т. 19. № 6 (88). С. 890–899. DOI: 10.26518/2071-7296-2022-19-6-890-899. EDN: VGLTGZ.

18. Westoby M. J. et al. ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. Geomorphology, 2012. 179. P. 300–314.

URL: [https://pure.aber.ac.uk/ws/portalfiles/portal/4916016/Westoby\\_et\\_al.\\_GEOMORPH\\_2012\\_Accepted.pdf](https://pure.aber.ac.uk/ws/portalfiles/portal/4916016/Westoby_et_al._GEOMORPH_2012_Accepted.pdf) (дата обращения: 29.01.2026).

**Конфликт интересов:** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interest:** The authors declare that there is no conflict of interest.