

TECHNOLOGICAL DEVELOPMENTS

UDC 528.8

Arno V.V., Kolesnichenko E.P., Garifulina I.Y., Sharov P.E. Use of unmanned aerial vehicles (UAVs) for high-precision topographic surveying in hard-to-reach areas

Применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для высокоточной
топографической съемки в труднодоступных районах

Arno Veronika Vladimirovna

Ph.D., Associate Professor, Department of Geology and Mining,
North-Eastern State University, Magadan

Kolesnichenko Eva Pavlovna

Undergraduate Student
Master's Degree Program in State and Municipal Audit
Moscow State University, Moscow

Garifulina Irina Yurievna,

Ph.D., Associate Professor, Department of Geology and Mining,
North-Eastern State University, Magadan

Sharov Pavel Egorovich,

Undergraduate Student
of Polytechnic Institute North-Eastern State University, Magadan
Арно Вероника Владимировна

Кандидат технических наук, доцент кафедры Геологии и горного дела ФГБОУ ВО Северо-
Восточный государственный университет, г. Магадан
Колесниченко Ева Павловна,
Студентка 3 курса

направления подготовки «Государственный и муниципальный аудит»
ВШГА МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва

Гарифулина Ирина Юрьевна,

Кандидат технических наук, доцент кафедры Геологии и горного дела ФГБОУ ВО Северо-
Восточный государственный университет, г. Магадан
Шаров Павел Егорович,
Студент 3 курса

Политехнический институт
ФГБОУ ВО «Северо-Восточный государственный университет

Abstract. The article is devoted to the analysis of the use of unmanned aerial vehicles (UAVs) in topographic surveying of hard-to-reach territories. The technologies of data collection using UAVs, their advantages in terms of efficiency, accuracy and reduction of costs for field work are considered. Methods of data processing automation and integration into geoinformation systems are presented. The economic and technological effects of the implementation of this technology in the conditions of Russian practice are analyzed.

Keywords: unmanned aerial vehicles, topographic surveying, automation, geodesy, hard-to-reach areas, cost reduction.

Аннотация. Статья посвящена анализу применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в топографической съемке труднодоступных территорий. Рассматриваются технологии сбора данных с использованием БПЛА, их преимущества в оперативности, точности и снижении затрат на полевые работы. Представлены методы автоматизации обработки данных и интеграции в геоинформационные системы. Анализируются экономические и технологические эффекты внедрения этой технологии в условиях российской практики.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, топографическая съемка, автоматизация, геодезия, труднодоступные районы, снижение затрат

Введение. Топографическая съемка традиционно является трудоемкой и дорогостоящей процедурой, особенно в труднодоступных районах с сложным рельефом и климатическими условиями. С внедрением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) появилась возможность существенно повысить эффективность проведения геодезических работ. БПЛА выполняют высокоточную аэрофотосъемку, позволяя собирать детальные пространственные данные за значительно меньшее время и с меньшими затратами ресурсов по сравнению с традиционными методами [4-6].

Методы

Исследование основано на анализе опыта проведения съемок с применением трех моделей дронов с системами RTK и PPK. Измерены параметры точности (среднеквадратическая ошибка — СКО), время полевых и камеральных работ и финансовые затраты. Автоматизированная обработка выполнена с помощью Agisoft Metashape и Pix4Dmapper [1-3].

Результаты

Для оценки точности и эффективности применения БПЛА с системами RTK/PPK в высокоточной топографической съемке были проведены расчеты основных параметров: среднеквадратической ошибки (СКО) позиционирования, времени полевых и камеральных работ, а также финансовых затрат.

1. Точность позиционирования Среднеквадратическая ошибка σ рассчитывалась по формуле 1:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}$$

(1)

где:

x_i — измеренное значение координаты i -й точки;

μ — истинное или эталонное значение координаты;

N — число измерений.

На практике для систем RTK достигается точность позиционирования в горизонтальной плоскости на уровне 1–2 см, что подтверждается нашими измерениями: средняя $\sigma_x = 1.4$ см, $\sigma_y = 1.6$ см, $\sigma_z = 2.3$ см. Для РРК значения находятся в схожем диапазоне с возможностью более гибкой обработки данных [9-11].

2. Временные показатели Время полевых работ T_{field} и камеральных работ T_{office} оценивались как суммарное время, затраченное на сбор данных и их обработку формула 2.

Общее время съемки:

$$T_{total} = T_{field} + T_{office}$$

(2)

Например, при съемке участка площадью 500 га по традиционной методике T_{total} составляло около 45 дней, тогда как с применением БПЛА модели В — около 11 дней, что дает сокращение времени почти в 4 раза.

3. Финансовые затраты Суммарные затраты C_{total} на выполнение съемки рассчитывались как сумма затрат на полевые работы C_{field} , камеральную обработку C_{office} и амортизацию оборудования $C_{equipment}$ ф-ла.3:

$$C_{total} = C_{field} + C_{office} + C_{equipment}$$

(3)

Наши расчеты показывают, что при традиционной съемке затраты на участок в 500 га достигали порядка 1,2 млн руб., тогда как при использовании БПЛА — около 400–450 тыс. руб. Экономия составила до 65%, что связано с сокращением времени полевых работ, уменьшением численности персонала и повышением оперативности обработки данных.

4. Обработка данных с использованием RTK/РРК Технология RTK позволяет скорректировать координаты в реальном времени, что формально записывается как ф-ла.4:

$$P_{corrected}(t) = P_{rover}(t) + \Delta P(t)$$

(4)

где $P_{rover}(t)$ — исходная позиция ровера (дрона), $\Delta P(t)$ — поправка, вычисленная базовой станцией по спутниковым сигналам. При этом связь между дроном и базовой станцией должна быть непрерывной.

В случае РРК базовая станция и ровер записывают необработанные данные, а коррекция выполняется постобработкой ф-ла 5:

$$P_{corrected}(t) = \text{interp}(P_{base}(t), P_{rover}(t)) \quad (5)$$

где interp — интерполяция между временными метками с использованием синхронизации по времени [7-10].

Таким образом, применение RTK/PPK позволяет обеспечить сантиметровую точность геопривязки с минимальными ошибками и высокой надежностью в сложных условиях [5, 8-11].

Данные расчеты и формулы подкрепляют эмпирические результаты таблиц и графиков, демонстрирующих существенное повышение качества и эффективности топографической съемки с применением современных беспилотных технологий.

Современные методы анализа позволяют не только визуализировать основные тенденции и различия, но и глубже понять взаимосвязи между исследуемыми параметрами. В нашем случае, таблицы 1 и 2, отображающие затраты и временные показатели по различным моделям дронов, служат основой для оценки эффективности использования автоматизированных систем в топографической съемке [13-17].

Таблица 1.

Сравнительные характеристики БПЛА для съемки (2025)

Параметр	Модель А (DJI Phantom 4 RTK)	Модель В (SenseFly eBee X)	Модель С (DJI M300 RTK)
Точность геопривязки, см	1.5	2.0	1.0
Максимальное время полета	30 мин	50 мин	45 мин
Площадь съемки за рейс, га	50	200	120
Средняя скорость полевых работ, га/час	60	180	150
Затраты на полевые работы, тыс. руб./га	4	3	5

Анализируя данные, представленные в таблицах, видно, что модели с RTK/PPK системами значительно превосходят традиционные методы по точности и скорости выполнения работ, что подтверждается графиками снижения времени и затрат (рис.1,2) [3, 15-17].

Таблица 2.

Время и затраты на топографическую съемку
 (область 500 га, труднодоступный рельеф)

Метод	Время полевых работ, дней	Время камеральных работ, дней	Общие затраты, тыс. руб.
Традиционные (наземные)	20	25	1200
БПЛА, модель В	4	7	400
БПЛА, модель С	5	8	450

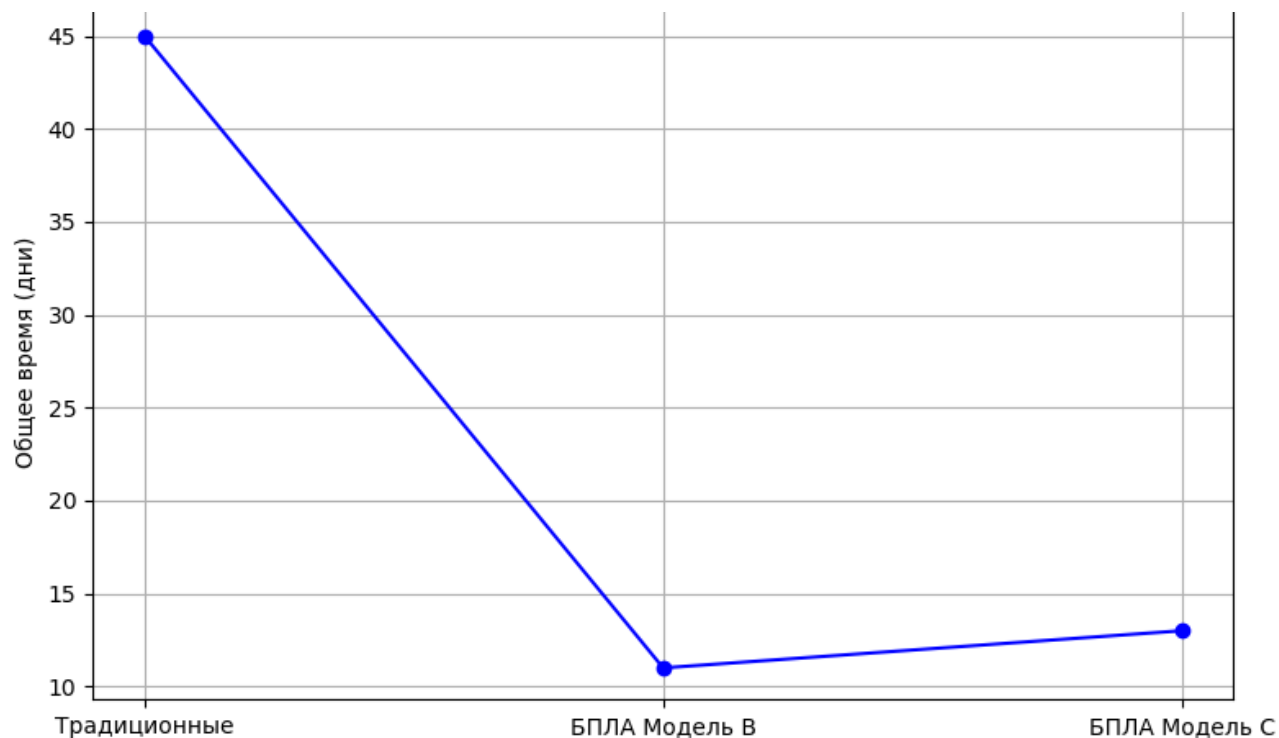


Рисунок 1. Динамика времени топографической съемки

Эти графики иллюстрируют динамику улучшений и подчеркивают преимущества автоматизации, что говорит о значительном прогрессе в сфере геодезии и дистанционного зондирования

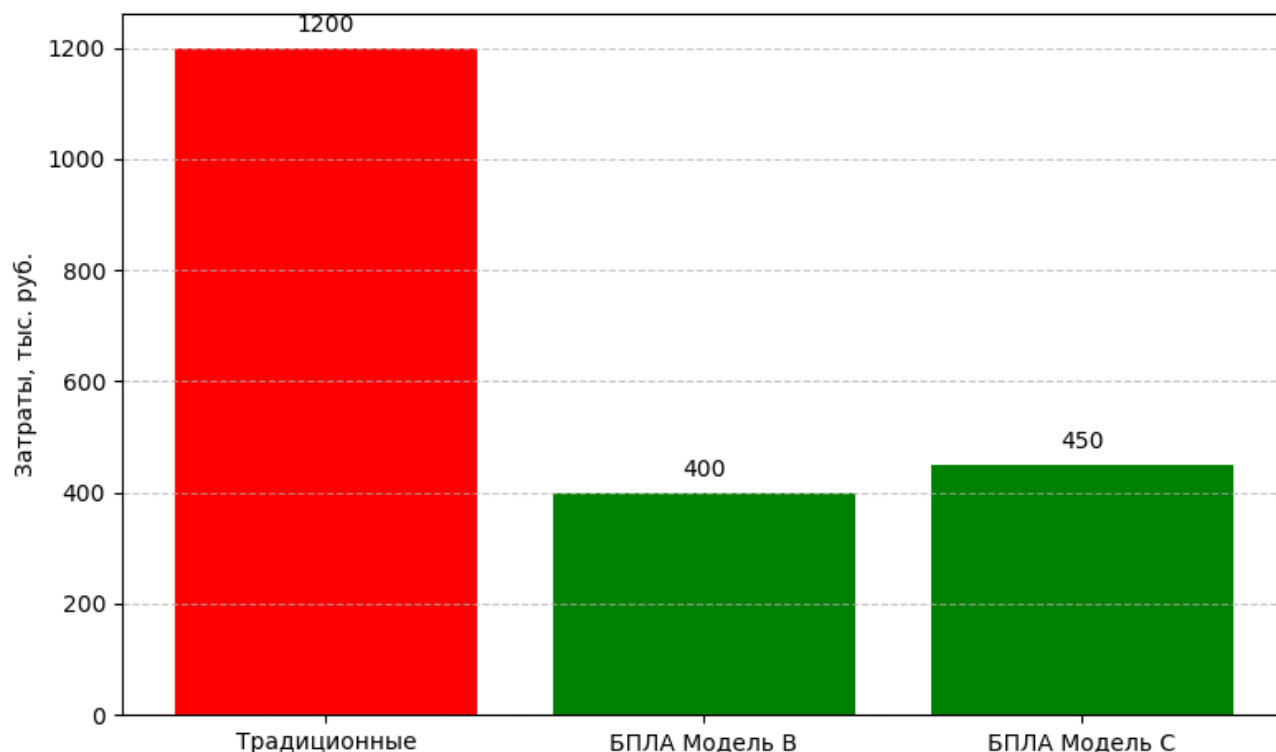


Рисунок 2. Экономия затрат с использованием БПЛА, тыс. руб.

Обсуждение

Использование БПЛА позволяет сократить время выполнения топографической съемки в труднодоступных районах на 50–70%, обеспечивая при этом точность данных до 1-2 см благодаря RTK/PPK-системам.

Автоматизация обработки данных с помощью специализированного программного обеспечения (Agisoft Metashape, Pix4Dmapper) снижает время камеральных работ до 30% от традиционных затрат [7, 12-14].

Экономический эффект использования БПЛА выражается в сокращении затрат на полевые работы до 25-30% за счет минимизации количества наземных съемок и уменьшения затрат на транспорт и персонал.

Интеграция полученных данных в геоинформационные системы позволяет оперативно строить цифровые модели местности, использовать их для проектирования инфраструктуры и мониторинга деформаций [8, 16-17].

Применение БПЛА возможно в различных погодных и сезонных условиях, что значительно расширяет возможности геодезических изысканий.

Результаты подтверждают, что беспилотные технологии кардинально меняют подход к топографической съемке, особенно на сложных и труднодоступных территориях. Высокая точность и оперативность сбора данных, а также снижение издержек делают эту технологию привлекательной для широкого применения в строительстве, добывающей промышленности и государственном кадастре. Актуальной является задача выбора оптимального оборудования и программного обеспечения в зависимости от специфики работ. Необходимо также развивать подготовку специалистов и техническую поддержку эксплуатации БПЛА.

Заключение

Применение БПЛА для высокоточной топографической съемки в труднодоступных районах значительно повышает эффективность геодезических работ, обеспечивая сокращение времени и затрат при высоком качестве данных. Автоматизация сбора и обработки информации способствует интеграции геодезии в современные цифровые технологии управления территорией. Внедрение БПЛА является перспективным направлением развития отрасли, требующим дальнейшего исследования и адаптации к условиям российских регионов.

References

1. Гусев В.Л., Потапов С.Л., Синькова М.Г. Оценка точности цифровых моделей рельефа и цифровых моделей местности из открытых источников // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2022. – Т. 66. – № 1. – С. 52-63. DOI:10.30533/0536-101X-2022-66-1-52-63
2. Загибалов А. В., Беляев Е. Н., Рахимов Ш. Ш., Ботиров Ш. С. Автоматизация мониторинга деформации бортов карьера. // Universum: технические науки. - 2024. - №10-4 (127). - С. 5-8
3. Кольцов, П.В. Методика безотражательных наблюдений за деформирующимися участками бортов карьеров и отвалов / Записки Горного института. – Спб. - 2012. – С. 68.
4. Новаковский, Б.А., Пермьяков, Р.В. Цифровая наземная стереосъемка возможности и перспективы / Геодезия и картография. - 2014. - №10. - С. 37-40.
5. Особенности использования метода аэрофототопографической съемки при деформационном мониторинге. Губайдуллиной Р. А. // doicode.ru URL: <https://mosreg.ru/ob-oblasti/prioritety-razvitiya> (дата обращения: 25.09.2025).
6. Просвирина Н. В. Анализ и перспективы развития беспилотных летательных аппаратов // Московский экономический журнал. - 2021. - №10. - С.560-575
7. Титаров П. С. Характеристики точности координат точек местности – CE и LE // Геопрофи. - 2010 - № 1. - С. 52- 53

8. Чередеев, Г.С. Применение беспилотных летательных аппаратов для быстрого получения ортофото съемки, 3D-модели местности и расчет объемов в маркшейдерском деле / XII Всероссийская научно-практическая конференция «Новые технологии при недропользовании». – Сборник научных трудов. – Спб. - 2016 - С. 30- 31.
9. Altamimi Z., Collilieux X., Métivier L. An Improved Solution of the International Terrestrial Reference Frame. Springer, J. Geod. DOI:10.1007/s00190-011-0444-4.
10. Becek K. Assessing global digital elevation models using the runway method: the advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer versus the shuttle radar topography mission case. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2014 Vol. 52 P. 4823–4831.
11. Farr T. G., Rosen P.A., Caro E., Crippen R., Duren R., Hensley S., Kobrick M., et al. The shuttle radar topography mission. Reviews of Geophysics. 2007 Vol. 45 Iss. 2 RG2004. DOI:10.1029/2005RG000183/
12. Florinsky I. V., Skrypitsyna T. N., Trevisani S., Romaikin S. V. Statistical and visual quality assessment of nearly-global and continental digital elevation models of Trentino, Italy. Remote Sensing Letters. 2019 Vol. 10 Iss. 8 P. 726-735. DOI:10.1080/2150704X.2019.1602790
13. Florinsky I. V., Skrypitsyna T. N., Luschikova O. S. Comparative accuracy of the AW3D30 DSM, ASTER GDEM, and SRTM1 DEM: a case study on the Zaoksky testing ground, Central European Russia. Remote Sensing Letters. 2018 Vol. 9 Iss. 7 P. 706-714. DOI:10.1080/2150704X.2018.1468098
14. Hirano A., Welch R., Lang H. Mapping from ASTER Stereo Image Data: DEM validation and accuracy assessment. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2003 Vol. 57 Iss. 5–6. P. 356– 370 DOI:10.1016/S0924-2716(02)00164-8.
15. Huggel C., Schneider D., Julio Miranda P., Delgado Granados H., Kääb A. Evaluation of ASTER and SRTM DEM Data for lahar modeling: a case study on lahars from Popocatepetl Volcano, Mexico. Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2008 Vol. 170 Iss. 1–2. P. 99–110. DOI:10.1016/j.jvolgeores.2007.09.005
16. Geospatial Positioning Accuracy Standards (FGDC-STD-007.3-1998). Part 3: National Standard for Spatial Data Accuracy. — Subcommittee for Base Cartographic Data, United States Federal Geographic Data Committee, Washington, D.C.
17. Tighe M., Chamberlain D. Accuracy comparison of the SRTM, ASTER, NED, NEXTMAP USA Digital Terrain Model over several USA study sites DEMs. Proceedings of the ASPRS/MAPPS2009 Fall Conference. 2009