### Хасанов Даниил Нургалиевич

инженер, лаборатория геоинформационных и цифровых технологий в недропользовании, Институт горного дела УрО РАН, 620075, Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, д. 58 e-mail: nahadaaaya@gmail.com

### МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ФОТОГРАММЕТРИИ ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ

#### Аннотация:

Одной из задач маркшейдерской службы горного предприятия является съемка горных выработок. Среди различных инструментов, используемых для решения этой задачи, выделяется аэрофотосъемка с последующей фотограмметрической обработкой. Применение аэрофотосъемки и фотограмметрии упрощается за счет доступности беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и современного программного обеспечения (ПО). Преимуществом методики является большой охват съемки и относительно небольшие трудозатраты. Однако проведение аэрофотосъемки по-прежнему требует предварительной расстановки и привязки опознаков<sup>1</sup> что приводит к большим затратам времени на полевые работы. Эта проблема актуализирует вопросы поиска методик, позволяющих сократить необходимое для точного построения фотограмметрической модели числа опознаков.

Основная цель исследований — оценка влияния числа опознаков на точность фотограмметрии с использованием БПЛА в условиях горного предприятия.

По результатам аэрофотосъемки было построено 13 фотограмметрических моделей карьера. Каждая из них отличается числом и расстановкой опознаков. Точность построения была оценена по среднеквадратическим ошибкам в координатах контрольных точек, которые в построении не участвовали. Для оценки взаимосвязи между величиной погрешности и числом опознаков применялись элементы регрессионного анализа. Установлено, что с увеличением количества используемых при построении опознаков величины погрешностей уменьшаются. Наименьшая величина ошибок как в плане, так и по высоте наблюдалась для случая с наибольшим числом опознаков и составляет 0,031 и 0,028 м, соответственно.

Ключевые слова: фотограмметрия, маркшейдерское обеспечение, аэрофотосъемка, БПЛА, квадрокоптер, открытые горные работы, ГНСС-оборудование.

### Hasanov Daniil N.

Engineer, Laboratory of geoinformation and digital technologies in subsurface use, Institute of Mining, UB of RAS, 58 Mamina-Sibiryaka Str., 620075 Ekaterinburg e-mail: nahadaaaya@gmail.com

## METHODS TO IMPROVE ACCURACY IN OPEN-PIT MINES PHOTOGRAMMETRY

#### Abstract:

One of the mining surveying department tasks is to survey mining operations. Among various tools used in surveying, aerial photography with photogrammetric processing stands out. Use of aerial photography and photogrammetry is simplified due to the availability of unmanned aerial vehicles (UAVs) and modern software. The advantages of this method are large coverage and low labor costs. However, aerial photography still requires preliminary site placement and georeferencing of GCPs, which is timeconsuming. This problem raises question about the search for methods that can reduce the number of GCPs necessary for the accurate building of a photogrammetric model.

The main goal of the research is to assess the impact of the number of GCPs on the UAV-based photogrammetric surveying accuracy in open-cut mining. Based on the results of aerial photography, 13 photogrammetric models of the pit were generated. Each of them differs in the quantity and arrangement of used GCPs. Accuracy of the model was estimated using root means square errors (RMSE) of the control points coordinates. Elements of regression analysis were used to assess the relationship between errors and GCPs quantity. It is established that with an increase in the number of GCPs used in the processing, the RMSE values decrease. The smallest horizontal and vertical RMSEs were observed for the case with the largest number of GCPs and are 0.031 m and 0.028 m, respectively.

Key words: photogrammetry, surveying, aerial photography, UAV, quadcopter, open-pit mining, GNSS equipment.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Точка объекта фотограмметрической съемки с известными пространственными координатами, опознанная на фотограмметрическом снимке

## Введение

Фотограмметрия и аэрофотосъемка на открытых горных работах – удобный маркшейдерский инструмент для съемки горных выработок. Главным преимуществом фотограмметрии на основе аэрофотосъемки с использованием БПЛА по сравнению с традиционными видами маркшейдерских инструментов служит широкий охват и относительно небольшие трудозатраты. Тем не менее преимущество методики за счет снижения трудозатрат в значительной степени преуменьшается из-за необходимости использовать опознаки. Последние используются для привязки материалов фотограмметрии к нужной системе координат и минимизации погрешностей. Предполетная расстановка опознаков может занимать в разы больше времени, чем сама аэрофотосъемка. В этой связи возникает вопрос об определении числа опознаков, позволяющих минимизировать полевые работы без потери точности, либо потенциального полного отказа от них.

Целью работы является определение взаимосвязи между числом опознаков и точностью фотограмметрической съемки с использованием БПЛА в условиях открытых горных работ.

За последние годы появилось множество исследований, посвященных факторам, которые влияют на точность фотограмметрической съемки. В [1] авторами по результатам двухфакторного дисперсионного анализа было выявлено, что наибольшее влияние на погрешность фотограмметрических измерений оказывают регулируемые факторы, к которым относится высота полета, число опознаков и величина перекрытий. На долю их влияния приходится 84 %, а наибольшим влиянием обладает высота полета – 48 %. В [2] исследовался уровень значимости и степень влияния высоты полета, качества изображения, перекрытия, количества опознаков и фокусного расстояния камеры на точность фотограмметрии. Влияние факторов оценивалось по среднеквадратическим ошибкам на контрольных точках. По результатам исследования авторы пришли к выводу, что наибольшим влиянием на ошибки обладает перекрытие снимков и число опознаков.

Одной из базовых проблем фотограмметрии является систематическая высотная ошибка, также называемая «эффектом купола» в иностранных источниках. Появление систематической ошибки в высотных отметках связано с неправильным определением элементов внутреннего ориентирования камеры [3]. При этом систематическая ошибка возникает и в случае использования исключительно опознаков для привязки, и в случае применения БПЛА с ГНСС-приемниками<sup>2</sup> [4]. Отдельные авторы называют главным источником систематической погрешности коэффициенты дисторсии<sup>3</sup> [3], другие видят основу погрешности в определении фокусного расстояния [5]. На данный момент источник систематической высотной ошибки однозначно не определен, но связь между ним и погрешностями в определении элементов внутреннего ориентирования зафиксирована в [6].

В современных исследованиях находятся разные подходы к минимизации погрешностей фотограмметрической съемки. Авторы работ [6, 7] предлагают использовать параметры калибровки, подготовленные заранее в лабораторных условиях, что позволяет снизить погрешности. В исследовании [8] среднеквадратические погрешности определения координат контрольных точек при использовании предварительной калибровки в среднем на 3 – 5 см больше, чем при использовании самокалибровки. Авторы связывают появление такой погрешности с потерей актуальности параметров предварительной калибровки. Авторы статьи [5] дополнили плановую съемку перспективной с углом наклона камеры от 15 до 30°, что позволило снизить высотные ошибки с 0,18 до 0,03 м. Ранее эта методика была предложена в [5], высотная ошибка снизилась с 1,5 до 0,01 м. Потенциальная польза подобной методики, особенно в труднодоступных местностях,

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Приемник сигналов глобальных навигационных спутниковых систем

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Параметры, используемые в модели Брауна для коррекции аберраций оптических систем, при которых коэффициент линейного увеличения изменяется при удалении от оптической оси

где трудно размещать опознаки, показана в [9]. Включение наклонных снимков в обработку позволило снизить ошибки по высоте с 0,15 до 0,05 м [10]. В исследовании [11] изучалось влияние методики спутникового позиционирования ГНСС-приемника БПЛА на точность определения координат. В среднем NRTK<sup>4</sup>, RTK<sup>5</sup> и PPK<sup>6</sup> показали сходные значения погрешности от 0,35 до 0,40 м [12]. PPK называют предпочтительным методом спутниковых определений, если связь между коптером и спутниками нестабильна [13].

Максимально сократить систематическую высотную ошибку и добиться наилучшей точности можно, используя стандартный подход – применение опознаков в процессе фотограмметрической обработки. Причем в современной фотограмметрии опознаки используются совместно с данными ГНСС-приемника коптера. Подобная методика позволяет как снизить объем полевых работ до приемлемого уровня, так и получить допустимую точность [14]. В [15] показано, что добавление в процесс фотограмметрической обработки опознаков позволяет уменьшить погрешность по высоте и в плане до 0,032 и 0,015 м, соответственно, тогда как для случая без опознаков погрешности составили 0,087 и 0,041 м. Применяя дрон без RTK-режима позиционирования, можно снизить погрешности в плане и по высоте с 1,38 и 2,45 м до 0,05 и 0,29 м, соответственно [16].

В настоящей работе используется методика аэрофотосъемки с применением БПЛА, оснащенного ГНСС-приемником. Число опознаков для каждого случая фотограмметрической обработки изменялось с целью определения взаимосвязи между погрешностью съемки и количеством опорных точек.

# Материалы и методы исследования Общие сведения об объекте съемки

Объектом съемки послужил Седельниковский щебеночный карьер. Месторождение располагается между поселками Большое Седельниково и Малое Седельниково Сысертского городского округа Свердловской области. Ближайшими к Седельниковскому месторождению населенными пунктами являются город Екатеринбург, поселки Большое и Малое Седельниково, Полевой, село Патруши.

Район месторождения характеризуется увалисто-холмистым рельефом, сильно заболоченным в понижениях. Абсолютные отметки за пределами карьера изменяются от 274 до 308 м с повышением на юго-восток. Дно карьера располагается на отметке 254 м. Карьер в границах горного отвода занимает площадь 21,1 га. Разработка ведется с 2015 г. На фотоплан попала территория площадью порядка 90 га, включающая карьер и часть промплощадки, склады и отвалы, часть прилегающих лесных земель и не тронутые разработкой участки.

## Планирование и проведение аэрофотосъемки

Рабочий процесс состоял из полевых работ по размещению и координатной привязке опознаков, аэрофотосъемки, а также фотограмметрической обработки и анализа полученных результатов.

Для проведения аэрофотосъемки использовался коптер DJI Mavic 3E с ГНСС-приемником, характеристики которого приведены в табл. 1.

Маршрут для дрона (рис. 1б) создавался заранее с помощью фирменного ПО компаниипроизводителя дрона. Заданная высота полета коптера – 100 м над уровнем поверхности, продольное и поперечное перекрытие – 80 и 70 %, соответственно, камера в отвесном положении. Полет контролируется оператором с помощью комплектного пульта управления DJI RC с дальностью связи до 15 км.

Хасанов Д.Н. Методы повышения точности фотограмметрии открытых горных работ

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Network Real-Time Kinematic (NRTK) – метод RTK с получением дифференциальных поправок через интернет

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Real-Time Kinematic (RTK) – метод дифференциальных измерений с использованием опорного и подвижного ГНСС-приемников

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Post Processing Kinematic (PPK) – метод дифференциальных измерений с использованием опорного и подвижного ГНСС-приемников с постобработкой фазовых измерений

Таблица 1

Дрон DJI Mavic 3E		Камера Hasselblad			
Вес, г	915	Матрица	4/3" CMOS, 20 Мп		
Взлетная масса, г	1050	Разрешение изображений	5280×3956		
Время полета, мин	45	Диафрагма	f/2,9-f/11		
Расстояние полета, км	30	Фокусное расстояние, мм			

Технические характеристики дрона



Рис. 1. Схема расстановки опознаков (а) и маршрут коптера (б)

Координаты точек фотографирования определялись встроенным ГНСС-приемником, работающим в режиме RTK. Заявленная производителем точность определения координат точек фотографирования составляет 10 мм в плане и 15 мм по высоте.

Опознавательные знаки размещались за несколько часов до начала аэрофотосъемки. Устанавливались опознаки равномерно по всему карьеру и прилегающей к нему территории (рис. 1а). На земле они обозначаются перекрестными линиями длиной около 1 м. В общем было размещено 20 опознаков, из которых для привязки используется 12, а остальные 8 выступают в качестве контрольных точек для оценки точности съемки.

Полевые работы по геодезической привязке опознаков проводились с использованием ГНСС-приемника PrinCE i80. Определение координат опознаков велось в режиме RTK с поправками от сети постоянно действующих базовых станций PrinNet. Точность определения координат в режиме RTK для ГНСС-приемника составляет 8 мм в плане и 15 мм по высоте, что соответствует классу высокоточных приборов по классификации «Правил осуществления маркшейдерской деятельности» [17]. Координаты опознаков определялись в местной системе координат МСК-66 зоны 1 с локализацией. На рис. 1а представлены схема расположения опознаков и контрольных точек, а также схема с маршрутом полета коптера.

### Обработка данных

По результатам полевых работ был сформирован каталог с координатами опознаков и набор из 708 снимков с метаданными о координатах точек фотографирования. Часть снимков была исключена из обработки из-за потери связи с сетью базовых станций.

В силу технических причин координаты точек фотографирования получены в системе координат WGS84. Для их перевода в местную систему координат применялся QGIS и Exiftool. С помощью Exiftool из области метаданных снимков извлекались, а затем и перезаписывались сведения о координатах точек фотографирования. В QGIS осуществлялось приблизительное преобразование координат методом Гельмерта и их локализация с применением аффинных преобразований и вертикальных трансформаций. Использовались параметры локализации из ГНССприемника.

В качестве средства фотограмметрической обработки выступает Agisoft Metashape. Как следует из сравнительных статей [18, 19], Metashape не уступает по эффективности и точности другим современным программам фотограмметрической обработки. Общая последовательность обработки представлена на рис. 2.



Рис. 2. Последовательность фотограмметрической обработки в Metashape

Обработка в Metashape происходит в несколько этапов. На первом этапе осуществляется загрузка необходимых для обработки снимков, калибровка и внешнее ориентирование в заданной системе координат. Полученное облако связующих точек очищается от шумовой составляющей, после чего производится уточнение элементов внутреннего ориентирования и уравнивание блока. На втором этапе на основе карты глубин и облака связующих точек путем сгущения строится плотное облако точек. Плотное облако очищается от шумовой составляющей фильтрацией по критерию достоверности. Достоверность точек определяется расстоянием до ближайших точек в облаке.

По плотному облаку точек строится цифровая модель местности, с помощью которой производится ортотрансформирование снимков с последующим объединением их в ортофотоплан.

Плотное облако точек, фотоплан и цифровая модель местности являются основными результатами фотограмметрической обработки.

Ортофотоплан и ЦММ экспортируются для дальнейшего совмещения в QGIS. Вручную определяется местоположение каждой контрольной точки на фотоплане. Далее полученные с фотоплана и ЦММ координаты контрольных точек извлекаются в виде таблицы CSV формата для дальнейших расчетов.

Приведенный выше алгоритм использовался для обработки каждого из вариантов привязки. Всего в расчетах использовалось 13 вариантов привязки, начиная со случая без опознаков и заканчивая вариантом со всеми 12 опознаками.

## Оценка точности

Для определения точности полученных в ходе фотограмметрической обработки материалов в соответствии с ГОСТ 59562–2021 [20] используется формула остаточных расхождений:

$$\delta_{\rm cp} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \sqrt{\Delta X_i^2 + \Delta Y_i^2}}{n},\tag{1}$$

где  $\Delta X_i$ ,  $\Delta Y_i$  – расхождения между измеренными и каталожными значениями координат на отдельной контрольной точке; n – количество точек.

Приведенная выше формула (1) позволяет оценить погрешности в плановом положении контрольных точек, тогда как для погрешностей в высотных отметках государственным стандартом формулы не приводятся. В связи с этим для оценки точности высотных отметок рассчитывается среднеквадратическая ошибка по формуле

$$m_H = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta {H_i}^2}{n}},\tag{2}$$

где  $\Delta H_i$  – расхождения между измеренными и каталожными значениями высотных отметок на отдельной контрольной точке; n – количество точек.

Дополнительно были рассчитаны среднеквадратические ошибки отдельно для осей *x*, *y* по следующим формулам:

$$m_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta X_i^2}{n}};\tag{3}$$

$$m_{y} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta Y_{i}^{2}}{n}},\tag{4}$$

где  $\Delta X_i$ ,  $\Delta Y_i$  – расхождения между измеренными и каталожными значениями координат на отдельной контрольной точке.

Формулы (1), (2) позволяют оценить точность ортофотоплана и цифровой модели местности по разнице между координатами фотограмметрическими и координатами, полученными высокоточным спутниковым оборудованием в ходе геодезической привязки контрольных опознаков.

Допустимые погрешности определяются государственным стандартом. В соответствии с ГОСТ 59562–2021 [20], среднее расхождение в плановом положении контрольных точек не должно превышать 0,3 мм в масштабе плана и 3/5 допустимой средней квадратической погрешности (СКП) определений координат границ и контуров объектов, а расхождения высот на контрольных точках не должны превышать 0,25 высоты сечения рельефа при высоте сечения 2,0 и 2,5 м [20]. Полученные в ходе обработки фотопланы представлены в масштабе 1:2000 с высотой сечения рельефа 2 м. В то же время допустимая СКП для земель промышленности составляет 0,5 м. Тогда погрешность в плановом и высотном положении контрольных точек не должна превышать 0,3 и 0,5 м, соответственно.

Результаты расчетов приведены в табл. 2. Кроме остаточных расхождений в плане и по высоте на контрольных точках, в табл. 2 были добавлены соответствующие каждому случаю элементы внутреннего ориентирования.

Связь между расхождениями координат и погрешностями в определении элементов внутреннего ориентирования, выявленная в [5], прослеживается и в таб. 2. Так, наибольшие среднеквадратические погрешности высотных отметок  $m_H$  и планового положения  $m_x$ ,  $m_y$  соответствуют отклонениям фокусного расстояния f и координат главной точки  $x_0$ ,  $y_0$  от средних значений. Из табл. 2 видно, что составляющая среднего расхождения по оси  $x - m_x$  больше составляющей по оси  $y - m_y$ . Именно составляющая  $m_x$  вносит наибольший вклад в величину среднего расхождения в плане.

Производитель коптера предоставляет информацию об элементах внутреннего ориентирования, полученных DJI в лабораторных условиях. Координаты главной точки  $x_0$ ,  $y_0$  составили 7,019 и -8,720 пкс, соответственно, тогда как средние значения по результатам самокалибровки – 20,779 и 1,560 пкс. Большая разница в значениях подтверждает низкую стабильность параметров потребительских камер, обозначенную в статье [6]. Такие параметры нельзя использовать при обработке.

Таблица 2

Количество опознаков	$\delta_{ m cp}$ , м	<i>т</i> <sub><i>H</i></sub> , м	<i>т</i> <sub><i>x</i></sub> , м	<i>т<sub>у</sub></i> , м	<i>f</i> , пкс	<i>х</i> <sub>0</sub> , пкс	<i>у</i> <sub>0</sub> , пкс
Без опознаков	0.098	0.132	0.086	0.048	3798.212	17.296	1.762
1	0.087	0.059	0.074	0.049	3795.151	20.838	1.336
2	0.064	0.046	0.057	0.035	3794.321	20.816	1.336
3	0.052	0.044	0.044	0.030	3794.408	20.802	1.335
4	0.055	0.032	0.044	0.036	3796.140	20.765	1.627
5	0.040	0.033	0.033	0.030	3796.251	20.743	1.655
6	0.042	0.033	0.036	0.028	3796.361	20.736	1.692
7	0.034	0.027	0.028	0.026	3796.177	20.740	1.771
8	0.032	0.028	0.027	0.025	3796.242	20.732	1.794
9	0.032	0.028	0.026	0.017	3796.325	20.699	1.761
10	0.031	0.028	0.025	0.025	3796.321	20.714	1.740
11	0.029	0.028	0.021	0.025	3796.298	20.707	1.716
12	0.031	0.028	0.026	0.016	3796.349	20.706	1.727

Результаты расчетов для различного количества опознаков

Для определения взаимосвязи между количеством опознаков и остаточными погрешностями использовались отдельные элементы регрессионного анализа. Результаты представлены на рис. 3.



Рис. 3. Зависимость погрешности в плане (а) и по высоте (б) от количества опознаков

Как видно из рис. 3, наибольшие расхождения в плановом и высотном положении характерны для случая, когда опознаки не используются совсем и составляют 0,098 и 0,132 м, соответственно. Наименьшие погрешности в плане и по высоте наблюдаются в случае с использованием всех 12 доступных опознаков и составляют 0,031 и 0,028 м, соответственно, что согласуется с результатами из [15]. С увеличением числа используемых в фотограмметрической обработке опознаков величина остаточных расхождений уменьшается. Эту зависимость на рис. 3 характеризуют графики функций  $m_H$  и  $\delta_{cp}$ . На рис. 3а можно увидеть, что увеличение числа используемых опознаков хоть и снижает погрешность в плане, но изменения эти не столь значительны, и после 7 опознаков не превышают нескольких миллиметров. То же можно сказать о расхождениях по высоте (рис. 36) – после 4–5 опознаков дальнейшее увеличение их количества не приводит к значительному уменьшению погрешностей. Тенденция к снижению величины погрешностей с увеличением числа опознаков вполне ожидаема и соответствует результатам, полученным в [21, 22]. Погрешности в плановом и высотном положении не превысили допустимых ни в одном из представленных случаев.

В некоторых случаях добавление опознаков привело к увеличению погрешностей, что можно объяснить субъективными ошибками при ручном определении центров опознаков. Не допустить влияние человеческого фактора можно, используя кодированные опознаки, центры которых определяются в автоматическом режиме.

Результаты расчетов расхождений на контрольных точках показывают, что наименьшие погрешности как в плане, так и по высоте достижимы при использовании всех 12 опознаков и составляют 0,031 и 0,028 м, соответственно. Наибольшие погрешности ожидаемо получены для случая, в котором опознаки не использовались, и составили 0,098 м в плане и 0,132 м по высоте. Однако снижение погрешностей после добавления более 4–5 опознаков не превышает 0,020 м. Такое снижение погрешностей не оправдывает трудозатрат на размещение большего количества опознаков, если целью работ является съемка ситуации или иные работы, не требующие более высокой точности. Кроме того, рассчитанные на основании требований ГОСТ 59562–2021 [20] допустимые расхождения в плане и по высоте (0,30 и 0,50 м, соответственно) не были превышены даже в случае, когда опознаки не использовались для определения элементов внутреннего и внешнего ориентирования съемки.

## Заключение

Из результатов работы следует, что с увеличением числа используемых в фотограмметрической обработке опознаков величины остаточных расхождений в плане и по высоте уменьшаются. Наименьшие погрешности наблюдаются в случае с 12 опознаками и составляют 0,031 м в плане и 0,028 м по высоте. Достаточную точность для ведения съемочных работ можно получить даже в том случае, если опознаки не используются, при условии применения БПЛА с ГНСС-модулем, работающим в режиме RTK. Для фотограмметрических материалов, полученных при обработке без опознаков, остаточные расхождения в плане и по высоте составили 0,098 и 0,132 м, соответственно. При этом погрешности не превышают допустимых по ГОСТ 59562–2021, что доказывает потенциал применения подобной методики для ведения съемочных работ, не требующих повышенной точности.

Полученные выводы согласуются с другими исследованиями в этой области. Результаты подтверждают перспективность дальнейших исследований применения современных методик фотограмметрической съемки с использованием БПЛА для условий открытых горных работ.

# Список литературы

1. Гусев В.Н., Блищенко А.А., Санникова А.П., 2022. Исследование комплекса факторов, оказывающих влияние на погрешность реализации маркшейдерской съемки горных объектов с применением геодезического квадрокоптера. Записки Горного института, Т. 254, С. 173–179.

2. Liu Y., Han K., Rasdorf W., 2022. Assessment and Prediction of Impact of Flight Configuration Factors on UAS-Based Photogrammetric Survey Accuracy. *Remote Sensing*, T. 14, №. 16, C. 4119.

3. James M.R., Robson S., 2014. Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks. *Earth Surface Processes and Landforms*, T. 39, № 10, C. 1413–1420.

4. Przybilla H. J. et al., 2020. Interaction between direct georeferencing, control point configuration and camera self-calibration for RTK-based UAV photogrammetry. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, T. 43., C. 485-492.

5. Štroner M. et al., 2021. Photogrammetry using UAV-mounted GNSS RTK: Georeferencing strategies without GCPs. *Remote Sensing*, T. 13, №. 7, C. 1336.

6. Sanz-Ablanedo E. et al., 2020. Reducing systematic dome errors in digital elevation models through better UAV flight design. *Earth Surface Processes and Landforms*, T. 45, № 9, C. 2134-2147.

7. Senn J. A. et al., 2022. On-site geometric calibration of RPAS mounted sensors for SfM photogrammetric geomorphological surveys. *Earth Surface Processes and Landforms*, T. 47,  $N_{0}$  6, C. 1615-1634.

8. Forlani G. et al., 2020. UAV block georeferencing and control by on-board gnss data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, T. 43, C. 9-16.

9. Nesbit P.R., Hubbard S.M., Hugenholtz C.H., 2022. Direct georeferencing UAV-SfM in high-relief topography: Accuracy assessment and alternative ground control strategies along steep inaccessible rock slopes. *Remote Sensing*, T. 14, № 3, C. 490.

10. Dai W. et al., 2023. Enhancing UAV-SfM Photogrammetry for Terrain Modeling from the Perspective of Spatial Structure of Errors. *Remote Sensing*, T. 15, № 17, C. 4305.

11. Teppati Losè L., Chiabrando F., Giulio Tonolo F., 2020. Boosting the timeliness of UAV large scale mapping. Direct georeferencing approaches: Operational strategies and best practices. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, T. 9, № 10, C. 578.

12. Famiglietti N. A. et al., 2021. A test on the potential of a low cost unmanned aerial vehicle RTK/PPK solution for precision positioning. *Sensors*, T. 21, № 11, C. 3882.

13. Cledat E. et al., 2020. Mapping quality prediction for RTK/PPK-equipped microdrones operating in complex natural environment. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, T. 167, C. 24-38.

14. Taddia Y., Stecchi F., Pellegrinelli A., 2020. Coastal mapping using DJI Phantom 4 RTK in post-processing kinematic mode. *Drones*, T. 4, № 2, C. 9.

15. Liu X. et al., 2022. Accuracy assessment of a UAV direct georeferencing method and impact of the configuration of ground control points. *Drones*, T. 6, № 2, C. 30.

16. Gomes Pessoa G. et al., 2021. Assessment of UAV-based digital surface model and the effects of quantity and distribution of ground control points. *International Journal of Remote Sensing*, T. 42, N 1, C. 65–83.

17. Правила осуществления маркшейдерской деятельности: утв. Ростехнадзором 19.05.2023 : ввод. в действие с 01.09.2023. КонсультантПлюс: электрон. фонд правовой и норматив.-техн. информ. URL: https://www.consultant.ru/document/ cons\_doc\_LAW\_448564/ (дата обращения: 22.12.2024)

18. Kameyama S., Sugiura K., 2021. Effects of differences in structure from motion software on image processing of unmanned aerial vehicle photography and estimation of crown area and tree height in forests. *Remote Sensing*, T. 13, N 4, C. 626.

19. Casella V. et al., 2020. Accuracy assessment of a UAV block by different software packages, processing schemes and validation strategies. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, T. 9, № 3, C. 164.

20. ГОСТ Р 59562–2021 «Съемка аэрофототопографическая. Технические требования». Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии от 10 июня 2021 г. N 542-ст. Национальный стандарт Российской Федерации. Москва: Стандартинформ, 2021.

21. Jiménez-Jiménez S.I. et al., 2021. Digital terrain models generated with low-cost UAV photogrammetry: Methodology and accuracy. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, T. 10, N 5, C. 285.

22. Zimmerman T., Jansen K., Miller J., 2020. Analysis of UAS flight altitude and ground control point parameters on DEM accuracy along a complex, developed coastline. *Remote Sensing*, T. 12, N 14, C. 2305.

# References

1. Gusev V.N., Blishchenko A.A., Sannikova A.P., 2022. Issledovanie kompleksa faktorov, okazyvayushchikh vliyanie na pogreshnost' realizatsii marksheiderskoi s"emki gornykh ob"ektov s primeneniem geodezicheskogo kvadrokoptera [Study of a factors complex influencing the error in the implementation of surveying of mountain objects using a geographic quadcopter]. Zapiski Gornogo instituta, V. 254, P. 173–179.

2. Liu Y., Han K., Rasdorf W., 2022. Assessment and Prediction of Impact of Flight Configuration Factors on UAS-Based Photogrammetric Survey Accuracy. *Remote Sensing*, V. 14, No. 16, P. 4119.

3. James M.R., Robson S., 2014. Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks. *Earth Surface Processes and Landforms*, V. 39, № 10, P. 1413–1420.

4. Przybilla H. J. et al., 2020. Interaction between direct georeferencing, control point configuration and camera self-calibration for RTK-based UAV photogrammetry. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, V. 43., P. 485-492.

5. Štroner M. et al., 2021. Photogrammetry using UAV-mounted GNSS RTK: Georeferencing strategies without GCPs. *Remote Sensing*, V. 13, №. 7, P. 1336.

6. Sanz-Ablanedo E. et al., 2020. Reducing systematic dome errors in digital elevation models through better UAV flight design. *Earth Surface Processes and Landforms*, V. 45, № 9, P. 2134-2147.

7. Senn J. A. et al., 2022. On-site geometric calibration of RPAS mounted sensors for SfM photogrammetric geomorphological surveys. *Earth Surface Processes and Landforms*, V. 47,  $N_{2}$  6, P. 1615-1634.

8. Forlani G. et al., 2020. UAV block georeferencing and control by on-board gnss data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, V. 43, P. 9-16.

9. Nesbit P.R., Hubbard S.M., Hugenholtz C.H., 2022. Direct georeferencing UAV-SfM in high-relief topography: Accuracy assessment and alternative ground control strategies along steep inaccessible rock slopes. *Remote Sensing*, V. 14, № 3, P. 490.

10. Dai W. et al., 2023. Enhancing UAV-SfM Photogrammetry for Terrain Modeling from the Perspective of Spatial Structure of Errors. *Remote Sensing*, V. 15, № 17, P. 4305.

11. Teppati Losè L., Chiabrando F., Giulio Tonolo F., 2020. Boosting the timeliness of UAV large scale mapping. Direct georeferencing approaches: Operational strategies and best practices. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, V. 9, № 10, P. 578.

12. Famiglietti N. A. et al., 2021. A test on the potential of a low cost unmanned aerial vehicle RTK/PPK solution for precision positioning. *Sensors*, V. 21, № 11, P. 3882.

13. Cledat E. et al., 2020. Mapping quality prediction for RTK/PPK-equipped microdrones operating in complex natural environment. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, V. 167, P. 24-38.

14. Taddia Y., Stecchi F., Pellegrinelli A., 2020. Coastal mapping using DJI Phantom 4 RTK in post-processing kinematic mode. *Drones*, V. 4, № 2, P. 9.

15. Liu X. et al., 2022. Accuracy assessment of a UAV direct georeferencing method and impact of the configuration of ground control points. *Drones*, V. 6, № 2, P. 30.

16. Gomes Pessoa G. et al., 2021. Assessment of UAV-based digital surface model and the effects of quantity and distribution of ground control points. *International Journal of Remote Sensing*, V. 42,  $N_{0}$  1, P. 65–83.

17. Pravila osushchestvleniya marksheiderskoi deyatel'nosti: utv. Rostekhnadzorom 19.05.2023 : vvod. v deistvie s 01.09.2023 [Rules for the implementation of surveying activities: approved by Rostechnadzor on 05/19/2023]. Konsul'tantPlyus: elektron. fond pravovoi i normativ.-tekhn. inform. URL: https://www.consultant.ru/document/cons\_doc\_LAW\_448564/ (data obrashcheniya: 22.12.2024).

18. Kameyama S., Sugiura K., 2021. Effects of differences in structure from motion software on image processing of unmanned aerial vehicle photography and estimation of crown area and tree height in forests. *Remote Sensing*, V. 13,  $N_{2}$  4, P. 626.

19. Casella V. et al., 2020. Accuracy assessment of a UAV block by different software packages, processing schemes and validation strategies. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, V. 9, № 3, P. 164.

20. GOST R 59562–2021 "S"emka aerofototopograficheskaya. Tekhnicheskie trebovaniya'. Federal'noe agentstvo po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii ot 10 iyunya 2021 g. N 542-st. [GOST R 59562-2021 "Aerial photography. Technical requirements". Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated June 10, 2021 No. 542-art.] Natsional'nyi standart Rossiiskoi Federatsii. Moscow: Stan-dartinform, 2021.

21. Jiménez-Jiménez S.I. et al., 2021. Digital terrain models generated with low-cost UAV photogrammetry: Methodology and accuracy // *ISPRS International Journal of Geo-Information*, V. 10, № 5, P. 285.

22. Zimmerman T., Jansen K., Miller J., 2020. Analysis of UAS flight altitude and ground control point parameters on DEM accuracy along a complex, developed coastline. *Remote Sensing*, V. 12, No 14, P. 2305.