

УДК [622.1:630]+629.735

DOI: 10.33764/2411-1759-2022-27-1-42-51

ПРИМЕНЕНИЕ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПРИ МАРКШЕЙДЕРСКОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ СЪЕМКИ ЛЕСНОГО ФОНДА

Александр Александрович Блищенко

Санкт-Петербургский горный университет, 199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2, аспирант кафедры маркшейдерского дела, тел. (981)856-08-84, e-mail: alex.blshchenko@yandex.ru

Анна Петровна Санникова

Санкт-Петербургский горный университет, 199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2, кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной геодезии, тел. (911)095-17-45, e-mail: 7sannikova7@gmail.com

На сегодняшний день маркшейдер в своем распоряжении имеет широкий спектр приборного парка, позволяющего достигать инженерных целей, поставленных при геометрическом обеспечении горных объектов. Все большую сферу геодезических измерений завоевывают беспилотные технологии, приводящие к минимальному участию специалиста в полевых работах, однако требующие более классифицированного подхода к камеральной обработке. Стоит отметить, что каждое горное предприятие, такое, как карьер, имея исключительную границу работ, называемую лицензионным участком, в своем контуре может иметь лесной массив, который представляет собой объект, вызывающий определенные трудности для маркшейдерского обеспечения. В данной статье речь идет о возможности использования беспилотного аппарата малой дальности – квадрокоптера для измерения лесного массива, а также анализа полученного результата и определения его соответствия инженерным требованиям при получении актуального топографического плана местности. Для определения возможности использования беспилотной технологии в измерении лесного массива будут использованы теоретический и экспериментальный методы исследования, включающие в себя весомый набор эмпирий, математическая обработка которых поможет выявить корреляционные зависимости параметров аэрофотограмметрической съемки для оптимального применения геодезического квадрокоптера. Результат исследования, приведенного в данной статье, – положение о возможности использования беспилотных технологий при аэрофотограмметрической съемке лесного массива. Определены корреляционные зависимости параметров полетов и их результатов, производными будут топографические планы, сравнение которых осуществлено с планами, созданными классическим методом.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, надирный вид, лесной массив, погрешность аэрофотограмметрической съемки, камеральная обработка, модель поверхности, топографический план

Введение

Лесной массив – объект, являющийся трудоемким для маркшейдерских измерений, представляющих собой набор измерений, расчетов, геометрических построений, необходимых для создания планов, маркшейдерских проектов и подготовки технической документации. Специалисты при измерении леса чаще всего используют классические методы съемки, например, тахеометрическую съемку. Спутниковое геодезическое оборудование применяется не так часто, так как, при высокой плотности леса и его высоте данный

метод не оправдывает свои возможности, как например на открытой местности [1]. Упомянутое оборудование при маркшейдерском обеспечении может применяться, однако его использование – трудоемкий полевой процесс, хоть и оправдывается достаточной точностью конечного результата.

Постановка проблемы

В имеющейся научно-технической литературе, посвященной аэрофотосъемке с применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) недостаточно освещены вопросы

обоснования рациональных параметров полетного задания и способов фотограмметрической обработки аэрофотоснимков [2]. Поэтому сутью анализа в данной статье является доказательство возможности использования беспилотного аппарата малой дальности для производства съемки лесного массива.

Стоит отметить, что в настоящее время беспилотные аппараты уже применяются для обеспечения лесохозяйственных предприятий: дендрометрия, лесотаксационное дешифрирование и др. [3]. Аэросъемка помогает задокументировать, отследить природные явления, которые протекают в засаженной местности, и проконтролировать состояние массива. БПЛА избавляет от надобности совершать объезд крупномасштабной территории и предоставляет подлинные сведения для отслеживания тенденций развития экосистемы и возможной регулировки отклонений [4].

Целью использования БПЛА также является сверка действительных границ насаждений и указанных в кадастровой документации данных [5]. Сведения о территории сказываются на расчетах затрат на обработку и оценку эффективности хозяйства. Однако данное применение БПЛА дает лишь возможность обзора лесного хозяйства. В подобных случаях аэрофотосъемку выполняют БПЛА самолетного типа, оборудованные профессиональным фотоаппаратом [6].

Проведенные исследования

В данной работе для определения возможности выполнения инженерной задачи по измерению поверхности земли (получения координатного обоснования поверхности) и, как следствие, получения актуального топографического плана лесного участка был использован беспилотный аппарат малой дальности (Phantom 4 Pro).

Его возможности, касаемые характеристик как самого изделия, так и параметров камеры, значительно уступают аппаратам самолетного типа [7]. Но стоит отметить, что при производстве открытых горных работ лесной массив не имеет значительной площади, которая в свою очередь обрамлена определенными границами горного отвода [8]. Соответ-

ственно, использование квадрокоптера с точки зрения экономического аспекта на небольших площадях оправдано.

В качестве объекта исследования был выбран небольшой лесной участок в границах лицензионного отвода во Всеволожском районе Ленинградской области (маркшейдерские полевые работы были согласованы с недропользователем и проводились под контролем организации, осуществляющей маркшейдерское обеспечение на данном месторождении). Камеральная обработка аэрофотограмметрических измерений производилась в программном обеспечении Agisoft Matashape Professional [9].

Первоначально, для выполнения аэрофотосъемки и непосредственно полета беспилотного аппарата были настроены параметры камеры, учитывающие погоду и временной промежуток дня [10]. Кроме того, были определены величины продольного и поперечного перекрытия, 85 и 75 % соответственно. Данные значения выбраны на основе рекомендаций по аэрофотосъемке для трудных участков съемки [11]. Исследуемый тип местности – лесной массив, который теоретически не приемлем для маркшейдерских измерений предложенным способом (отсутствуют какие-либо предложенные инструкциями производителей БПЛА исходные величины-регуляторы для выполнения полетов над лесными массивами).

Исследуемый лесной массив имеет определенную плотность, которая является производной от «сомкнутости» – термина, определяющего смыкание крон стоящих рядом деревьев [12]. Кроны могут быть сомкнутыми и разомкнутыми на ту или иную величину [13].

После осуществления аэрофотограмметрической съемки, выполненной на высоте 50 м, на выбранном экспериментальном участке лесного массива были выделены части территории, где отсутствуют кроны деревьев и возможно идентифицирование поверхности. Схема надирного вида выделенной безлесной территории и поверхности, занятой деревьями, представлена на рис. 1. При расчете относительной площади залесенности изучаемого участка лесного массива была определена величина 31 %, фиксирующая процент безлесной территории относительно общей исследуемой площади.

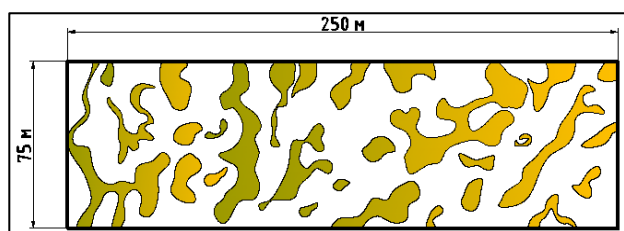


Рис. 1. Схема надирного вида выделенной безлесной территории на исследуемом участке

Однозначно, что плотность леса превышает всего влияет на успешность исследования [14]. Чем величина плотности больше, тем едва ли возможно выполнение маркшейдерской съемки поверхности [15]. Кроме того, следует принимать во внимание время года, напрямую влияющее на состояние деревьев, а именно на их листовенность, которая перекрывает территорию, с учетом работы БПЛА, измеряющего поверхность «сверху». Множественность вышеупомянутых ограничений и трудностей является фактором иррационального выполнения аэрофотографической съемки при таких условиях, что доказывается отсутствием упоминаний такого способа аэрофотограмметрического метода в научно-технической литературе и инструкциях производителей.

Все же, для достижения минимальной погрешности измерения и, как следствие, получения приближенного к истине топографического плана измеряемого участка, первоначально, как исходный параметр, была определена высота полета 50 м, что является небольшой высотой в представлении выполнения тривиальной аэрофотосъемки. С учетом того,

что данная маркшейдерская съемка имеет экспериментальный характер, участок измерения имеет небольшую площадь (≈ 2 га). Предлагаемая площадь имеет демонстрационный характер эксперимента, тем самым использованная методика и ее эмпирические решения могут быть использованы при аэрофотосъемке местности большей площади [16].

Решением определения возможности построения топографического плана на основе производных данных от аэрофотограмметрической съемки с помощью квадрокоптера является способность «расставить» отметки на модели, построенной с использованием специализированного программного обеспечения камеральной обработки эмпирического полета Agisoft Metashape Pro [17]. Постановка отметок на модели в данном эксперименте будет носить периодическое и казуальное значение. Исследуемый участок, обработанный в программном обеспечении обработки аэрофотограмметрического полета (рис. 2) и равный значению площади ≈ 2 га, рассматривается в определенных границах для более эквивалентного и точного ведения эксперимента (рис. 3).

Как правило, после аэрофотограмметрической съемки при камеральной обработке поверхность, занятую определенными препятствиями или излишними объектами, отфильтровывают с помощью инструмента классификации в Agisoft Metashape Pro [18]. Однако в данном случае, с учетом того, что обширная часть исследуемого участка – лесной массив, будет целесообразно и ликвидно использовать «ручное» распределение отметок в местах «пустот».

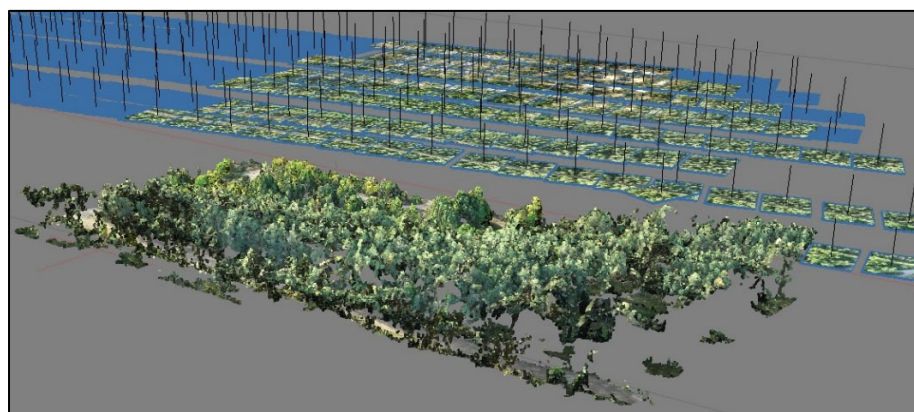


Рис. 2. Обработанная экспериментальная модель лесного массива в ПО Agisoft Metashape Pro



Рис. 3. Обработанная экспериментальная модель лесного массива в ПО Agisoft Metashape Pro с определенными границами

Методы и материалы

Полевые работы, а именно осуществление аэрофотограмметрической съемки указанного участка, проводились на разных высотах (50, 75, 100 м). Стоит обратить внимание, что при выполнении данных экспериментальных маркшейдерских измерений переменным исходным параметром полета являлась только высота полета квадрокоптера, в то время как остальные стартовые величины равнозначны во всех эмпирических опытах.

Таким образом, после производства полевых работ, камеральная обработка, выполняемая в Agisoft Metashape Pro, представляет собой построение модели в несколько этапов, которые во всех трех опытах также будут идентичны: выравнивание фотографий, построение облака точек и построение конечной модели [19]. Результаты текущих функциональных операций претерпевают равную конечную обработку в виде ограничения каждой модели в назначенную границу, представленную на рис. 3. Каждая клетка, представляющая собой квадрат с размерами 25×25 м, будет испытана «постановкой» пяти отметок на уже созданной модели каждой эмпирии.

Необходимо отметить, что «постановка» надирной отметки осуществляется в местах, приближенных к поверхности и малозалесенных [20]. Такая необходимость вызвана достижимостью потенциального построения поверхности [21], иначе отметки, поставлен-

ные на явные зоны и промежутки лиственности крон деревьев, приведут к неблагоприятным и негодным результатам. Впрочем, такая допустимость как раз является производной от сомкнутости исследуемого лесного массива [22].

Кроме того, главным положительным фактором исследования является достижение набора отметок таким образом, чтобы расстояние между ними составляло дистанцию, согласованную в нормативном документе РД-07-603-03 «Инструкция по производству маркшейдерских работ» (раздел III, пункт 89): «пикеты при съемке набираются на всех характерных точках контуров и поверхностей. Расстояние между пикетами на бровках уступов при съемке в масштабе $1 : 1\,000$ принимают не более 20 м, если бровки уступов сложные, и 30 м, если бровки вытянутые близкие к прямолинейным...» [23, 24]. При проведении опыта принимается концепция строения потенциального топографического плана в масштабе $1 : 1\,000$ и с учетом нетривиальности и затруднительности исследуемого пространства – интервальность точек не больше 20 м.

Выполнение аэрофотограмметрического экспериментального измерения при высоте полета беспилотного летательного аппарата, равной 50 м, обусловило получение модели, и, как следствие из последующих камеральных этапов обработки, эвристическую схему результата, приведенную на рис. 4.

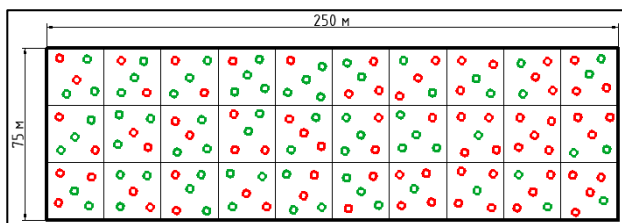


Рис. 4. Эмпирическое схематичное изображение получения отметок поверхности при полете БПЛА на высоте 50 м

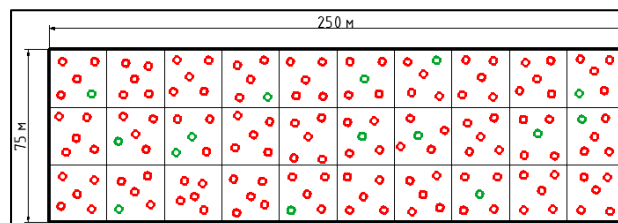


Рис. 6. Эмпирическое схематичное изображение получения отметок поверхности при полете БПЛА на высоте 100 м

Полученная модель, ее параметры расстояния между точками соответствуют регламентирующим требованиям. Таким образом, при осуществлении маркшейдерской съемки с помощью БПЛА над лесным массивом, имеющим действительную спецификацию, на высоте 50 м возможно получение аподиктической модели поверхности, и как следствие, достоверного топографического плана.

Для грамотности и правдивости эксперимента были выполнены маркшейдерские съемки на высоте 75 м (рис. 5) и на высоте 100 м (рис. 6).

Полученная модель, ее параметры расстояния между точками соответствуют регламентирующим требованиям. Таким образом, при осуществлении маркшейдерской съемки с помощью БПЛА над лесным массивом, имеющим действительную спецификацию, на высоте 50 м возможно получение аподиктической модели поверхности, и как следствие, достоверного топографического плана.

Для грамотности и правдивости эксперимента были выполнены маркшейдерские съемки на высоте 75 м (рис. 5) и на высоте 100 м (рис. 6).

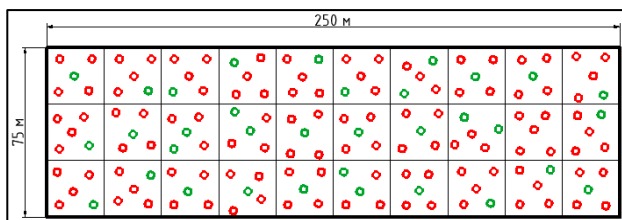


Рис. 5. Эмпирическое схематичное изображение получения отметок поверхности при полете БПЛА на высоте 75 м

Результат постобработки полетов БПЛА на данных высотах подтверждает апорию о проблематичности выполнения такого вида работ в приведенных условиях.

Между тем, реализация цели – выполнение маркшейдерской съемки с помощью БПЛА лесного массива при приведенных его параметрах – полностью валидна. Успешность эмпирии напрямую зависит от высоты полета БПЛА, в нашем исследовании высота 50 м соответствует положительному результату [25].

Конечный показатель маркшейдерской съемки лесного массива – это топографический план, являющийся производным от полета БПЛА на высоте 50 м, постановки надирных отметок и камеральной постобработки маркшейдерского измерения в целом.

Достоверность и наглядность исследования будут выражаться в сравнении топографических планов, полевые работы которых были осуществлены разными методами съемки [26].

В качестве канонического образца был взят план, в основе которого были полевые работы, произведенные с помощью регламентированного относительно классического метода маркшейдерской съемки поверхности с помощью спутниковой геодезической аппаратуры, прошедшей метрологические проверки [27]. Данная маркшейдерская съемка была проведена в масштабе 1 : 1 000 согласно требованиям и рекомендациям руководствующей документации. Результирующий топографический план представлен на рис. 7.

Сравнительный топографический план, составленный по результатам удавшейся эмпирической маркшейдерской съемки с применением БПЛА на высоте 50 м, отображен на рис. 8.

Аналогичность приведенных планов объективна, некоторые расхождения и искажения изогипсов связаны с точками, находящимися за обрамлением приведенной площади рельефа, которые в свою очередь также были частью системы точек, по которым был произведен рельеф.

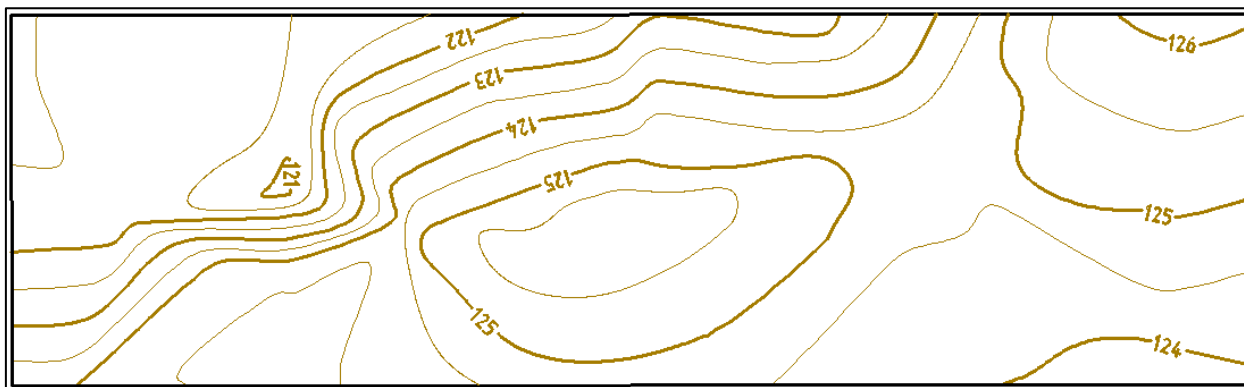


Рис. 7. Топографический план, составленный по результатам маркшейдерской съемки с применением БПЛА

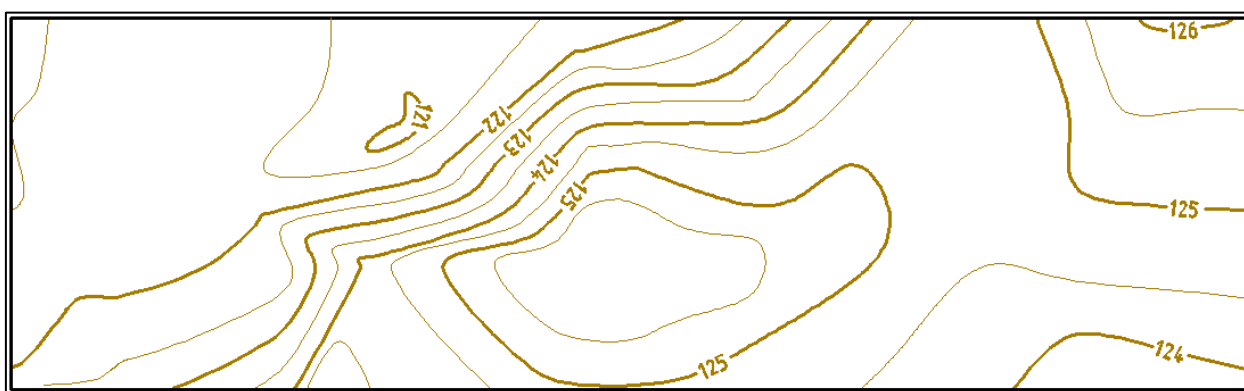


Рис. 8. Топографический план, составленный по результатам маркшейдерской съемки классическим методом

Заключение

Таким образом, исследование возможности использования беспилотного аппарата малой дальности – квадрокоптера – для возможности измерения лесного массива доказало утилитарный ресурс применения БПЛА. Выполнение съемки и ее соответствие инженерным требованиям при получении актуального топографического плана местности до-

пустимы при высоте полета около 50 м. Более детальная корреляционная зависимость высоты полета от возможности выполнения успешной аэрофотограмметрической съемки представляет собой фундаментальный интерес для дополнительных исследований, являющихся неотъемлемой частью однозначно перспективной сферы применения квадрокоптеров в горной промышленности и в других сферах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Блищенко А. А., Гусев В. Н. Совместное использование электронных тахеометров и GNSS-приемников для маркшейдерских съемок на карьерах // Естественные и технические науки. – 2019. – № 4 (130). – С. 79–83.
2. Аврунев Е. И., Ямбаев Х. К., Оприцова О. А., Чернов А. В., Гоголев Д. В. Оценка точности 3D-моделей, построенных с использованием беспилотных авиационных систем // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 3. – С. 211–228.
3. Барбасов В. К., Руднев П. Р., Орлов П. Ю., Гречищев А. В. Применение малых беспилотных летательных аппаратов для съемки местности и подготовки геоинформационного контента в чрезвычайных ситуациях // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр: Междунар. науч. конф.

«Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия»: сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. Т. 2. – С. 158–163.

4. Эпов М. И., Злыгостев И. Н. Применение беспилотных летательных аппаратов в аэрогеофизической разведке // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр.: Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология»: сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск : СГГА, 2012. Т. 2. – С. 22–28.

5. Деришев С. Г. Беспилотные авиационные комплексы для геофизических исследований и мониторинга земной поверхности // ГЕО-Сибирь-2010. VI Междунар. науч. конгр.: сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2010 г.). – Новосибирск : СГГА, 2010. Т. 4, ч. 1. – С. 46–50.

6. Воздушный кодекс Российской Федерации [Электронный ресурс] : федер. закон от 19.03.1997 № 60-ФЗ. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

7. Раков Д. Н., Никитин В. Н. Выбор цифрового неметрического фотоаппарата для беспилотного аэрофотосъемочного комплекса // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : сб. молодых ученых СГГА (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск : СГГА, 2012. – С. 27–36.

8. О недрах [Электронный ресурс] : закон Российской Федерации (в редакции Федер. закона от 03.03.1995 № 27-ФЗ) (с изменениями на 08.12.2020). – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

9. Руководство пользователя Agisoft Metashape Professional Edition, версия 1.5 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_5_ru.pdf. 27.

10. Хлебникова Т. А., Оприцова О. А., Аубакирова С. М. Экспериментальные исследования точности построения фотограмметрической модели по материалам БПЛА // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр.: Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 23–27 апреля 2018 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. Т. 1. – С. 32–37.

11. Товкач С. Е. Информационно-измерительная система пирометрического типа для малоразмерного беспилотного летательного аппарата. – Тула : ТГУ, 2010.

12. Кудравец Д. А., Ткачева О. А. Применение малой авиации в землеустройстве и мониторинге земель // Международный студенческий электронный научный вестник. – 2016. – Вып. 4 (часть 4). – С. 532–534.

13. Кучко А. С. Аэрофотография (Основы и метрология). – М. : Недра, 1974. – 272 с.

14. Костюк А. С. Особенности аэрофотосъемки со сверхлегких беспилотных летательных аппаратов // Омский научный вестник. – 2011. – № 1 (104). – С. 236–240.

15. Антипов И. Т., Хлебникова Т. А. О достоверности вероятностной оценки точности пространственной аналитической фототриангуляции // ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.). – Новосибирск : СГГА, 2011. Т. 4. – С. 47–54.

16. Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов [Электронный ресурс] : федер. нормы и правила в области промышленной безопасности, утвержденные приказом Ростехнадзора от 13.11.2020 № 439. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

17. Оника С. Г., Куликовская О. Е., Атаманенко Ю. Ю. Использование беспилотных летательных аппаратов для решения инженерных задач маркшейдерии и геодезии // Горная механика и машиностроение. – 2018. – № 2. – С. 15–21.

18. Турсбеков С. В., Солтабаева С. Т., Нуртуганов Б. Н., Кенжегалиев Н. Х. Современное маркшейдерско-геодезическое приборостроение // Вестник КРСУ. – 2015. – Т. 15. – С. 145–148.

19. Смирнов С. П. Новые технологии ведения маркшейдерских работ // Записки Горного института. – 2010. – Т. 185. – С. 212.

20. Шеффе Г. Дисперсионный анализ. – М. : Наука, 1980. – 512 с.

21. Лигоцкий Д. Н., Фомин, С. И. Технология разработки месторождений строительных материалов : учеб. пособие. – СПб. : СПГИ, 2011. – 91 с.

22. Шешко Е. Ф. Открытая разработка месторождений полезных ископаемых. – М. : Углетехиздат, 1954. – 223 с.

23. Ржевский В. В. Открытые горные работы. Части 1 и 2. – М. : Недра, 1985.

24. Холодняков Г. А. Проектирование карьеров при разработке комплексных месторождений. – СПб. : Горный университет, 2013. – 193 с.

25. Кузнецова Е. Н. Маркшейдерские методы в обеспечении геодинамической безопасности горных работ // Записки Горного института. – 2010. – Т. 185. – С. 240.

26. Гудков В. М., Хлебников А. В. Математическая обработка маркшейдерско-геодезических измерений : учеб. для вузов. – М. : Недра, 1990. – 335 с.

27. Гусев В. Н., Шеремет А. Н. Математическая обработка маркшейдерской информации статистическими методами : учеб. пособие. – СПб. : СПГИ(ТУ), 2005.

Получено 16.07.2021

© А. А. Блищенко, А. П. Санникова, 2022

ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF SURVEYING THE FOREST FUND USING UAVS

Alexander A. Blishchenko

St. Petersburg Mining University, 21 line, 2, Vasilievsky Island St., St. Petersburg, 199106, Russia, Ph. D. Student, Department of Mine Surveying, phone: (981)856-08-84, e-mail: alex.blshchenko@yandex.ru

Anna P. Sannikova

St. Petersburg Mining University, 21 line, 2, Vasilievsky Island St., St. Petersburg, 199106, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Engineering Geodesy, phone: (911)095-17-45, e-mail: 7sannikova7@gmail.com

Nowadays, the surveyor has at its disposal a wide range of instrument park, which allows you to achieve the engineering goals set in the survey support of mining facilities. Unmanned technologies are gaining an increasing sphere of surveying measurements, which lead to minimal participation of a specialist in field work, but require a more classified approach to off-site processing. However, it is worth noting that each mining enterprise, for example, such as a quarry, having an exclusive boundary of work, called a license area, in its contour may have a forest area, which is an object that causes certain difficulties for surveying support. This article tells about the possibility of using a short-range unmanned UAVs for surveying the forest area, as well as analyzing the result obtained and determining its compliance with engineering requirements when obtaining an up-to-date topographic plan of the area. To determine the possibility of using unmanned technology in mine surveying of a forest, theoretical and experimental research methods will be used, including a significant set of empiricals, the mathematical processing of which will help to reveal the correlation dependences of aerial photogrammetric survey parameters for the optimal use of a geodetic quadcopter. The result of the study given in this article will be a provision on the possibility of using unmanned technologies for aerial photogrammetric survey of a forest land, correlation dependences of flight parameters and their results will be determined, the derivatives of which will be topographic plans, the comparison of which will be carried out with plans, created by the classical method.

Keywords: unmanned aerial vehicle, nadir view, woodland, aerial photogrammetric survey error, off-site processing, surface model, topographic plan

REFERENCES

1. Blishchenko, A. A., & Gusev, V. N. (2019). Joint use of electronic tacheometers and GNSS receivers for mine surveying in open pits. *Estestvennyye i tekhnicheskie nauki [Natural and Technical Sciences]*, 4(130), 79–83 [in Russian].

2. Avrunev, E. I., Yambaev, K. K., Opritova, O. A., Chernov, A. V., & Gogolev, D. V. (2018). Assessment of the accuracy of 3D-models built using unmanned aircraft systems. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 23(3), 211–228 [in Russian].

3. Barbasov, V. K., Rudnev, P. R., Orlov, P. Y., & Grechishchev, A. V. (2013). Application of small unmanned aerial vehicles for survey of terrain and preparation of geoinformation content in emergency situations. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2013: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 2. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, marksheyderiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2013: International Scientific Conference: Vol. 2. Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Mine Surveying]* (pp. 158–163). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].

4. Epov, M. I., & Zlygostev, I. N. (2012). Application of unmanned aerial vehicles in airborne geophysical reconnaissance. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2012: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 2. Distantionnye metody zondirovaniya Zemli i fotogrammetriya, monitoring okruzhayushchey sredy, geoekologiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2012: International Scientific Conference: Vol. 2. Remote Sensing Methods of the Earth and Photogrammetry, Environmental Monitoring, Geoecology]* (pp. 22–28). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
5. Derishev, S. G. (2010). Unmanned aircraft systems for geophysical research and monitoring of the earth's surface. In *Sbornik materialov GEO-Sibir'-2010: T. 4, ch. 1 [Proceedings of GEO-Siberia-2010: Vol. 4, Part 1]* (pp. 46–50). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
6. Federal Law of March 19, 1997 No. 60-FZ. Air Code of the Russian Federation. Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
7. Rakov, D. N., & Nikitin, V. N. (2012). The choice of a digital non-metric camera for an unmanned aerial photography complex. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2012: sbornik molodykh uchenykh SSGA [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2012: Collection of Young Scientists]* (pp. 27–36). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
8. The Law of the Russian Federation "On Subsoil" (as amended by Federal Law of March 3, 1995 No. 27-FZ) (as amended on December 8, 2020). Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
9. Agisoft Metashape Professional Edition User Manual, version 1.5. (n. d.). Retrieved from https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_5_ru.pdf. 27.
10. Khlebnikova, T. A., Opritova, O. A., & Aubakirova, S. M. (2018). Experimental studies of the accuracy of constructing a photogrammetric model based on UAV materials. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2018: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1. Distantionnye metody zondirovaniya Zemli i fotogrammetriya, monitoring okruzhayushchey sredy, geoekologiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2018: International Scientific Conference: Vol. 1. Remote Sensing Methods of the Earth and Photogrammetry, Environmental Monitoring, Geoecology]* (pp. 32–37). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].
11. Tovkach, S. E. (2010). *Informatsionno-izmeritel'naya sistema pirometricheskogo tipa dlya malorazmernogo bespilotnogo letatel'nogo apparata [Information-measuring system of pyrometric type for a small-sized unmanned aerial vehicle]*. Tula: TSU Publ. [in Russian].
12. Kudravets, D. A., & Tkacheva, O. A. (2016). Application of small aircraft in land management and land monitoring. *Mezhdunarodnyy studencheskiy elektronnyy nauchnyy vestnik [International Student Electronic Scientific Bulletin]*, 4(4), 532–534 [in Russian].
13. Kuchko, A. S. (1974). *Aerofotografiya (Osnovy i metrologiya) [Aerial photography (Fundamentals and metrology)]*. Moscow: Nedra Publ., P. 272 [in Russian].
14. Kostyuk, A. S. (2011). Features of aerial photography from ultralight unmanned aerial vehicles. *Omskiy nauchnyy vestnik [Omsk Scientific Bulletin]*, 1(104), 236–240 [in Russian].
15. Antipov, I. T., & Khlebnikova, T. A. (2011). On the reliability of the probabilistic assessment of the accuracy of spatial analytical phototriangulation. In *Sbornik materialov GEO-Sibir'-2011: T. 4 [Proceedings of GEO-Siberia-2011: Vol. 4]* (pp. 47–54). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
16. Federal norms and rules in the field of industrial safety "Rules for ensuring the stability of the sides and benches of open pits, sections and slopes of dumps", approved by order of Rostekhnadzor of November 13, 2020, No. 439. Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
17. Onika, S. G., Kulikovskaya, O. E., & Atamanenko, Y. Y. (2018). The use of unmanned aerial vehicles for solving engineering problems of mine surveying and geodesy. *Gornaya mekhanika i mashinostroenie [Mining Mechanics and Mechanical Engineering]*, 2, 15–21 [in Russian].
18. Tursbekov, S. V., Soltabaeva, S. T., Nurtuganov, B. N., & Kenzhegaliev, N. K. (2015). Modern mine surveying and geodetic instrument making. *Vestnik KRSU [Bulletin of KRSU]*, 15, 145–148 [in Russian].
19. Smirnov, S. P. (2010). New technologies for conducting mine surveying. *Zapiski Gornogo Instituta [Notes of the Mining Institute]*, 185, P. 212 [in Russian].
20. Scheffe, G. (1980). *Dispersionnyy analiz [Analysis of variance]*. Moscow: Nauka Publ., P. 512 [in Russian].
21. Ligotsky, D. N., & Fomin, S. I. (2011). *Tekhnologiya razrabotki mestorozhdeniy stroitel'nykh materialov [Technology of development of deposits of construction materials]*. Saint Petersburg: SPGGI Publ., P. 91 [in Russian].
22. Sheshko, E. F. (1954). *Otkrytaya razrabotka mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh [Open development of mineral deposits]*. Moscow: Ugletekhizdat Publ., P. 223 [in Russian].

23. Rzhovsky, V. V. (1985). *Otkrytye gornye raboty: ch. 1, 2 [Open-pit mining: Parts 1, 2]*. Moscow: Nedra Publ. [in Russian].

24. Holodnyakov, G. A. (2013). *Proektirovanie kar'erov pri razrabotke kompleksnykh mestorozhdeniy [Design of quarries in the development of complex deposits]*. Saint Petersburg: Mining University Publ., P. 193 [in Russian].

25. Kuznetsova, E. N. (2010). Mine surveying methods in ensuring the geodynamic safety of mining operations. *Zapiski Gornogo Instituta [Notes of the Mining Institute]*, 185, P. 240 [in Russian].

26. Gudkov, V. M., & Khlebnikov, A. V. (1990). *Matematicheskaya obrabotka marksheydersko-geodezicheskikh izmereniy [Mathematical processing of mine surveying and geodetic measurements: textbook for universities]*. Moscow: Nedra Publ., P. 335 [in Russian].

27. Gusev, V. N., & Sheremet, A. N. (2005). *Matematicheskaya obrabotka marksheyderskoy informatsii statisticheskimi metodami [Mathematical processing of mine surveying information by statistical methods]*. Saint Petersburg: SPGGI (TU) Publ. [in Russian].

Received 16.07.2021

© A. A. Blishchenko, A. P. Sannikova, 2021