

КОРОВИН Денис Сергеевич

ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ ОБЪЕМА УГОЛЬНОГО СКЛАДА НА ОСНОВЕ АЭРОФОТОСЪЕМКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Специальность: 25.00.16 — «Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр»

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Работа выполнена в Институте угля Федерального государственного бюджетного учреждения «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ УУХ СО РАН)

Научный руководитель – Тайлаков Олег Владимирович

доктор технических наук, профессор,

Институт угля Федерального исследовательского центра угля и углехимии Сибирского отделения

Российской академии наук,

Заведующий лабораторией ресурсов и технологий

извлечения угольного метана

Официальные оппоненты:

Степанов Юрий доктор технических наук, доцент,

Александрович Новокузнецкий филиал (институт) федерального

государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кемеровский

государственный университет»,

доцент кафедры информатики и вычислительной

техники им. В.К. Буторина

Гетман Валерий кандидат технических наук,

Валериевич Акционерное общество «СУЭК-Кузбасс»,

заместитель технического директора

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образо-

вательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный индустриальный

университет»

Защита состоится «27» декабря 2017 г. в 14:00 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.102.02 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» по адресу: 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, тел./ факс: (384-2) 39-69-60, e-mail: kuzstu@kuzstu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» и на сайте:

http://science.kuzstu.ru/activities/gos-attestation/soresearchers/

Автореферат разослан «___» ____2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

Palling

В.В. Иванов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. На территории Кузнецкого угольного бассейна действуют 36 угольных разрезов, 52 шахты (50 из которых применяют открытый способ хранения угля) и 25 обогатительных фабрик. Добыча угля в Кузбассе ежегодно увеличивается (в 2016 г. – более чем на 5%, до 227,4 млн. т), а разведанных запасов хватит более чем на 200 лет эксплуатации. Кроме того, доля тепло- и энергогенерирующих предприятий в России, использующих угольное топливо достигает 30%, большинство из которых применяют для хранения угля открытые склады. Погрузочно-разгрузочные работы при добыче и отгрузке угля требуют постоянного контроля и детализации при измерениях объемов угольных складов для проведения корпоративного аудита и контроля режимов функционирования горно-шахтного оборудования.

В расчетах остатков полезных ископаемых на складах используют данные маркшейдерской съемки, проводимой с помощью электронных тахеометров, наземных лазерных сканеров и геодезических GPS/ГЛОНАСС приемников или аэрофотосъемки с помощью пилотируемой авиации, применение которых трудоемко, не оперативно и не рентабельно. Вместе с тем, внедрение в практику хозяйственной деятельности предприятий беспилотных летательных комплексов для аэрофотосъемки, которые позволяют оперативно получать графическое отображение трехмерной модели земной поверхности, можно отнести к значительным технологическим новшествам в маркшейдерии и геодезии.

Теоретическая база для определения объемов открытых угольных складов на основе использования данных аэрофотосъемки с применением специализированных самолетов достаточно полно разработана и применяется на практике в соответствии с нормативными инструкциями. Однако способы фотограмметрической обработки результатов аэрофотосъемки очень чувствительны к ракурсным искажениям, повороту и масштабированию снимков. Анализ практического опыта применения программной реализации традиционных методов расчета объемов открытых складов по данным аэрофотосъемки с помощью беспилотных комплексов показал, что существующие подходы имеют погрешность измерения до 25 % и не могут применяться для корректной оценки остатков полезного ископаемого.

В имеющейся научно-технической литературе, посвященной аэрофотосъемке с применением беспилотных летательных комплексов, недостаточно освещены вопросы обоснования рациональных параметров полетного задания и способы обработки аэрофотоснимков. Поэтому актуальным является разработка подхода, позволяющего проводить независимые, достоверные и оперативные геометрические измерения пространственно-временных характеристик открытого угольного склада.

Целью работы является обоснование и разработка метода оценки объема угольного склада на основе аэрофотосъемки с применением беспилотных летательных аппаратов.

Объект исследования – открытый угольный склад.

Предмет исследования — пространственное моделирование открытого угольного склада и производство геометрических измерений линейных характеристик его поверхности.

Идея работы заключается в выборе рациональных параметров аэрофотосъемки территории угольного склада с применением беспилотных летательных комплексов и адаптации способов фотограмметрической обработки ее результатов.

Задачи исследования

- обосновать состав технического оснащения беспилотного летательного аппарата, структуру и рациональные параметры полетного задания для проведения аэрофотосъемки территории открытого угольного склада и создания топографического плана с наименьшей доступной погрешностью;
- разработать подход к фотограмметрической обработке аэрофотоснимков для построения и уравнивания цифровой трехмерной модели поверхности открытого угольного склада, обеспечивающий погрешность в плане не более 0,2 м и 0,17 м – по высоте;
- провести верификацию пространственно-цифровых моделей открытых угольных складов, построенных по результатам аэрофотосъемки с применением беспилотных летательных аппаратов.

Научные положения

- беспилотные летательные аппараты с установленным на борту цифровым фотоаппаратом, имеющим светочувствительную матрицу с кропфактором не более 1,5 и объектив с фокусным расстоянием 16-50 мм, обеспечивают проведение аэрофотосъемки открытых угольных складов для создания их цифровой трехмерной модели рельефа с погрешностью в плане не более 0,2 м и по высоте 0,4 м;
- применение данных об объектах, распознанных на аэрофотоснимках с известными линейными характеристиками (горный технологический транспорт) уменьшает погрешность уравнивания цифровой пространственной модели рельефа открытого угольного склада на 0,05 м в плане и 0,1 м по высоте;
- комплексный метод, включающий выбор рациональных параметров проведения аэрофотосъемки с применением беспилотных летательных аппаратов и обработку её результатов позволяет создавать достоверные цифровые модели рельефа территории открытых угольных складов и вычислять их объем способом объемной палетки с шагом разделения, равным линейному размеру одного пикселя модели.

Методология, примененная при подготовке диссертации, заключалась в использовании принципов, приемов и подходах российской научной школы маркшейдерского дела, определивших следующие **методы исследования**:

 систематизация и научное обобщение известных методов фотограмметрической обработки данных аэрофотосъемки с учетом особенностей применения в горном деле;

- методы оценки объемов полезного ископаемого на открытых складах;
- методы нелинейного программирования при обработке экспериментальных данных.

Научная новизна работы заключается в

- обосновании рациональных параметров аэрофотосъемки с применением беспилотных летательных аппаратов;
- адаптации способов фотограмметрической обработки для построения цифровой трехмерной модели рельефа открытого угольного склада;
- развитии способа определения объемов горной массы с помощью объемной палетки.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается:

- удовлетворительным расхождением (не более 1 мм в масштабе плана, 0,4 м по высоте) пространственно-цифровых моделей открытых угольных складов, построенных по результатам маркшейдерской съемки и аэрофотосъемки с применением беспилотных летательных аппаратов, выполненной с использованием разработанных математических моделей;
- допустимой относительной погрешностью значений объема, найденного с помощью созданного автором алгоритмического и программного обеспечения до 3% и разностью с объемом, найденным методом вертикальных параллельных сечений, по данным маркшейдерской съемки, до 5 % при экспериментальных измерениях открытых угольных складов с объемом до 50 тыс. м³.

Личный вклад автора заключается:

- в проведении анализа современных видов маркшейдерской съемки и аэрофотосъемки горных отводов угольных разрезов, отвалов и складов, а также требований нормативных документов к точности их проведения;
- в разработке математической модели определения параметров и условий проведения аэрофотосъемки рельефа угольных складов с помощью беспилотных летательных аппаратов;
- в разработке алгоритмического и программного обеспечения для оценки остатков угля на открытых складах на основе данных аэрофотосъемки, адаптированного к применению в процессе регистрации стереопар беспилотных летательных комплексов;
- в организации экспериментальных испытаний на угледобывающих предприятиях Кузбасса.

Теоретическая значимость работы состоит в разработке метода определения объемов открытых угольных складов на основе изучения способов его геометризации и измерения пространственно-временных линейных характеристик его поверхности.

Отличие от ранее выполненных работ заключается в обосновании рациональных параметров проведения аэрофотосъемки с применением беспилотных летательных аппаратов, в разработке подхода к геометрической коррекции

цифровой модели поверхности угольного склада и развитии способа определения объемов горной массы с помощью объемной палетки.

Практическая значимость работы заключается в том, что разработанное алгоритмическое и программное обеспечения позволяет рассчитывать остатки угля на открытых складах. При этом подход к определению рациональных параметров проведения аэрофотосъемки с помощью беспилотных летательных аппаратов и фотограмметрической обработки ее результатов может быть использован при создании пространственных цифровых моделей поверхности угольных складов.

Реализация работы. По результатам исследования разработаны Методические рекомендации по оценке объемов открытых угольных складов на основе использования данных аэрофотосъемки с применением беспилотных летательных аппаратов / О.В. Тайлаков, Д.С. Коровин. – Кемерово: ФИЦ УУХ СО РАН – 2017. – 14 с. Методические рекомендации излагают возможный метод расчетов объемов открытых угольных складов, математическую модель выбора рациональных параметров аэрофотосъемки территории угольного склада, с применением беспилотных летательных комплексов, рекомендации по фотограмметрической обработке данных аэрофотосъемки с применением беспилотной авиации. Методические рекомендации используются ООО СП «Барзасское товарищество» при проведении оперативного учета остатков угля на открытых складах.

Апробация работы. Результаты исследований докладывались на конференции «Геодезия. Маркшейдерия. Аэросъемка. На рубеже веков» (Москва, 2013), Международной научно-практической конференции «Перспективы инновационного развития угольных регионов России» (Прокопьевск, 2014), Ежегодной молодежной конференции Института угля СО РАН (Кемерово, 2015), Конференции молодых ученых ФИЦ УУХ СО РАН «Развитие – 2016» (Кемерово, 2016) и на семинарах Института угля ФИЦ УУХ СО РАН.

Публикации. Основное содержание работы отражено в 8 статьях, опубликованных в изданиях, включенных в систему Российского индекса научного цитирования, 5 из которых, рекомендованы ВАК МОН РФ по специальности 25.00.16 «Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр».

Содержание диссертации направлено на «Разработку технических средств, технологий и методик производства геометрических измерений пространственно-временных характеристик состояния земной поверхности, недр, подземного пространства городов и графического отображения информации в различных видах» п. 1 паспорта специальности 25.00.16 — «Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр».

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения, изложенных на <u>126</u> страницах машинописного текста, содержит <u>15</u> таблиц, <u>31</u> рисунок и список литературы из 111 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе представлен обзор известных методов и оборудования, которые применяются для съемок горного отвода, отвалов и открытых угольных складов, а также рассмотрены требования нормативных документов к точности их выполнения. Приведены общие сведения об аэрофотосъемке, выполнен анализ возможности использования беспилотных летательных аппаратов для сопровождения маркшейдерского обслуживания на угледобывающих разрезах.

Развитию технологий маркшейдерского обеспечения при разработке угольных месторождений открытым способом способствовали труды таких ученых, как Бахаева С.П., Гусев В.Н., Колесников В.Ф., Новаковский Б.А., Проноза В.Г., Рогова Т.Б., Чибуничев А.Г. и др.

В результате сравнительного анализа способов построения цифровых трехмерных моделей рельефа местности установлено, что маркшейдерская съемка с помощью электронных тахеометров и геодезических GPS/ГЛОНАСС приемников является наиболее распространенной для производства съемки открытых складов. Это обусловливается высокой производительностью и относительно простой обработкой полученной информации. Применение систем лазерного сканирования и аэрофотосъемки с помощью пилотируемой авиации требует много времени и больших затрат на подготовку съемки и поэтому не рентабельно на небольших территориях.

Использование мобильных комплексов беспилотной аэрофотосъемки для создания топографических планов отличается от других способов значительным уменьшением трудоемкости и стоимости выполнения работ на территориях с площадью до 1-2 км². Выделенные преимущества позволяют увеличить количество съемок при высоких темпах работ для повышения контроля и возможности проведения независимого оперативного корпоративного аудита.

Специально для аэрофотосъемки разработано более 50 моделей БПЛА. Большинство картографических аэрофотосъёмочных систем имеют следующие характеристики: взлетная масса от 2 до 20 кг; высота полета при съемке от 100 до 1500 м; время полета от 45 до 240 мин; скорость полета от 54 до 115 км/ч; диапазон рабочей температуры окружающей среды от –30°С до +40°С; действие канала связи от 15 до 75 км. Цифровые фотокамеры, устанавливаемые на борту как полезная нагрузка, представлены в таблице 1.

На основе выполненного анализа показана принципиальная возможность применения беспилотных летательных аппаратов для аэрофотосъемки при построении трехмерных цифровых моделей рельефа угольных складов.

Вторая глава диссертации посвящена построению математической модели для выбора режимов и параметров аэрофотосъемки с использованием беспилотных комплексов. Представлены расчетные и экспериментальные данные создания 3D-модели рельефа участка горных работ с применением наиболее распространенных беспилотных летательных аппаратов.

Tаблица 1-Xарактеристики цифровых фотокамер, устанавливаемых на бор-

ту беспилотных летательных аппаратов для аэрофотосъемки

Но- мер п/п	Наименова- ние	Длина матри- цы, пикс	Ширина матри- цы, пикс	Линей- ный раз- мер пик- селя ρ , мкм	Фокусное расстояние объектива <i>f</i> , мм	Кроп- фактор матри- цы	Разрешение фотокаме- ры, пар ли- ний/мм
1	Sony NEX-5	3056	4592	5,1	16	1,5	65
2	Ricoh GR Digital IV	2736	3648	2,0	6	4,55	75
3	Sony DSC- RX1	4000	6000	6,0	30	1	330
4	Sony ILCE- 6000 (α6000)	4000	6000	3,9	50	1,5	220
5	Canon EOS 5D Mark II	3744	5616	6,4	50	1	330

Количество снимков, регистрируемых с помощью БПЛА, значительно больше в сравнении с использованием специализированных аэрофотокамер и коррекция геометрических искажений каждого снимка невозможна только на основе их привязки к опорным точкам на местности. Погрешность фотограмметрической обработки аэрофотоснимков напрямую зависит от количества снимков без маркеров и их количество необходимо минимизировать при условии полного покрытия изучаемой территории.

Предположим, что необходимо провести аэрофотосъемку территории склада, расположенного на участке длиной X (м) и шириной Y (м). Масштаб плановой съемки M зависит от высоты полета фотографирования H (м) и фокусного расстояния f (мм) аэрофотоаппарата

$$M = \frac{1}{m} = \frac{f}{H} \cdot 10^{-3}.$$
 (1)

При фиксированном формате снимка длиной $l_{\rm x}$ (мм), (ширина снимка $l_{\rm y}$) и заданном продольном перекрытии $P_{\rm x}$ (%) (поперечное перекрытие $P_{\rm y}$) базис фотографирования B (м) в масштабе съемки определяется по формуле

$$B_{xy} = \sqrt{{B_x}^2 + {B_y}^2},\tag{2}$$

$$B_{x} = \frac{(100 - P_{x})}{100} \cdot l_{x} \cdot \frac{H}{f}; \ B_{y} = \frac{(100 - P_{y})}{100} \cdot l_{y} \cdot \frac{H}{f}$$
 (3)

При цифровой аэрофотосъемке вместо понятия масштаб аэрофотосъемки часто используют размер пикселя на местности GSD (м). Линейный размер пикселя на местности соответствующего пикселю светочувствительной матрицы ρ (мкм) определяет точность построения цифровой модели рельефа в плане и рассчитывается по формуле

$$GSD = \frac{H}{f} \cdot \rho \cdot 10^{-3},\tag{4}$$

а длина L_x (м) и ширина L_y (м) одного аэрофотоснимка на местности соответствуют

$$L_x = GSD \cdot l_x \; ; L_v = GSD \cdot l_v. \tag{5}$$

Для обеспечения заданного перекрытия на местности с тремя снимками внутри маршрута должны выполняться условия

$$\left(1 - \frac{P_x}{100}\right) \cdot L_x \cdot (N_{\text{CH}} - 3) \ge X; \left(1 - \frac{P_y}{100}\right) \cdot L_y \cdot (N_{\text{M}} - 1) \ge Y.$$
 (6)

Погрешность цифровой модели рельефа в масштабе аэрофотоснимка при смещении аппарата в пространстве в момент фотографирования при плановой скорости W (м/с) и минимальной доступной выдержке цифровой фотокамеры E (c) составит

$$\lambda_{\text{внутр}} = \frac{H}{f} \cdot W \cdot E \cdot 10^{-3}. \tag{7}$$

Из-за порывов ветра углы тангажа θ и крена γ аппарата могут достигать 10° при его массе до 4 кг; 8° - при массе от 4 до 8 кг; 5° - при массе более 8 кг. При этом смещение точки на снимке при аэрофотосъемке в надире вычисляется как

$$\delta_{x} = \frac{\binom{l_{x/2}}{2} \cdot \sin\theta}{f - \binom{l_{x/2}}{2} \cdot \sin\theta}; \quad \delta_{y} = \frac{\binom{l_{y/2}}{2} \cdot \sin\gamma}{f - \binom{l_{y/2}}{2} \cdot \sin\gamma}, \tag{8}$$

где δ_x , δ_y — смещение точки на снимке, вызванное наклоном аппарата в плоскости тангажа и крена соответственно;

Линейные смещения за рельеф определяют по формуле

$$\delta_h = \frac{r \cdot h}{H},\tag{9}$$

где r — расстояние от пикселя точки снимка до центра светочувствительной матрицы; h — высота в этой точке; H — высота съемки.

Допустим, что наибольшее превышение рельефа h_{\max} достигается в центральной зоне снимка. Площадь центральной зоны опишем радиусом

$$r_h = \frac{\sqrt{(l_x/2)^2 + (l_y/2)^2}}{2}.$$
 (10)

Тогда смещение точки за рельеф можно представить как

$$\delta_h = \frac{r_h \cdot h_{max}}{H},\tag{11}$$

а общее смещение точки на снимке составит

$$d = \sqrt{\delta_{\mathbf{x}}^2 + \delta_{\mathbf{y}}^2} + \delta_h. \tag{12}$$

Геометрические искажения снимков компенсируется при создании цифровой модели рельефа с помощью опорных точек местности. Введем коэффировой модели рельефа с помощью опорных точек местности.

циент K_{om} , определяемый как соотношение количества фотографий в проекте к количеству опорных точек N_{om}

$$K_{\rm or} = \frac{N_{\rm np}}{N_{\rm or}}.\tag{13}$$

Тогда погрешность модели в проекте, вызванную внешними факторами в масштабе аэрофотоснимка с коэффициентом опорных точек, можно представить в виде

$$\lambda_{\text{внеш}} = K_{\text{от}} \cdot \frac{H}{f} \cdot d \cdot 10^{-3} = K_{\text{от}} \cdot \frac{H}{f} \cdot \left(\sqrt{\delta_{\text{x}}^2 + \delta_{\text{y}}^2} + \delta_h \right) \cdot 10^{-3}. \tag{14}$$

При фотограмметрической обработке цифровых аэроснимков прогнозируемое наибольшее значение погрешности цифровой модели рельефа в плане не превышает половине размера пикселя на местности, умноженного на $\sqrt{2}$. Скорректируем размер пикселя на погрешности, вызванные внутренними и внешними искажениями снимков

$$E_{xy} = \sqrt{2} \cdot \left(\frac{1}{2}GSD + \lambda_{\text{внутр}} + \lambda_{\text{внеш}}\right). \tag{15}$$

Погрешность модели по высоте определим из формулы нахождения высотной отметки

$$h = \frac{\Delta p \cdot H}{B},\tag{16}$$

где $\Delta p = p_2 - p_1$ — разность продольных параллаксов снимков стереопары; H — высота аэрофотосъемки; $B = p_1 + \Delta p$ — базис фотографирования в масштабе снимка.

Продифференцировав функцию (16) по входящим в неё переменным B, Δp , H получим среднюю квадратическую погрешность по высоте, равную

$$E_z = \sqrt{\left(\frac{h}{B} \cdot m_b\right)^2 + \left(\frac{H}{B} \cdot m_{\Delta p}\right)^2 + \left(\frac{h}{H} \cdot m_H\right)^2},\tag{17}$$

где m_b , $m_{\Delta p}$, m_H — средние квадратические ошибки определения базиса съемки, разности продольных параллаксов и высоты аэрофотосъемки.

Таким образом, используя формулы (1-17) задачу оптимизации количество снимков в проекте в зависимости от высоты полета БПЛА и необходимой точности пространственно-цифровой модели рельефа можно представить в виде целевой функции (18) и системы ограничений (19)

$$E_z \to min$$
 (18)

$$\begin{cases}
\left(1 - \frac{P_{\chi}}{100}\right) \cdot L_{\chi} \cdot (N_{\text{CH}} - 3) \ge X \\
\left(1 - \frac{P_{y}}{100}\right) \cdot L_{y} \cdot (N_{M} - 1) \ge Y, \\
N_{M}, N_{\text{CH}} \in \mathbb{N}
\end{cases} \tag{19}$$

или в расширенном виде

$$\sqrt{\left(\frac{h_{max}}{B_{xy}} \cdot m_b\right)^2 + \left(\frac{H}{B_{xy}} \cdot m_{\Delta p}\right)^2 + \left(\frac{h_{max}}{H} \cdot m_H\right)^2} \to \min$$
 (20)

$$\begin{cases}
\left(1 - \frac{P_{x}}{100}\right) \cdot l_{x} \cdot \frac{H}{f} \cdot (N_{\text{CH}} - 3) \ge X \\
\left(1 - \frac{P_{y}}{100}\right) \cdot l_{y} \cdot \frac{H}{f} \cdot (N_{M} - 1) \ge Y, \\
H, N_{M}, N_{CH} \in \mathbb{N}
\end{cases} (21)$$

Оптимальное количество снимков в проекте для беспилотных летательных аппаратов самолетного типа с электродвигателями, которые применяются для картографирования местности, представлены в таблице 2.

Таблица 2 — Результаты расчетов высоты полета беспилотных летательных аппаратов с использованием оптимизационной модели для создания планов

территории

Но- мер п/п	Модель БПЛА	Цифровая фотокаме- ра	Высо- та по- лета <i>H</i> , м	Кол-во сним- ков N_{np} , шт	Размер пикселя снимка на местно- сти <i>GSD</i> , см	Погрешность ЦМР в плане E_{xy} , м	Погрешность ЦМР по высоте E_z , м
1	Геоскан 101	Sony NEX-5	150	68	4,8	0,21	0,34
2	Trimble GateWing X100	Ricoh GR Digital IV	130	100	4,3	0,56	1,08
3	Геоскан 201	Sony DSC-RX1	280	36	5,6	0,26	0,50
4	Дельта М	Sony DSC-RX1	180	68	3,6	0,18	0,36
5	Супер- кам S240-f	Sony α6000	270	162	2,1	0,16	0,81
6	Супер- кам S350-f	Sony α6000	270	162	2,1	0,12	0,60
7	ПТЕРО- E5	Canon EOS 5D Mark II	220	110	2,8	0,13	0,42

Как видно из представленных данных аппарат Gatewing X100, оснащенный широкоугольным объективом фотокамеры с фокусным расстоянием 6 мм, значительно отличается от других моделей. При создании цифровых моделей рельефа с помощью данного беспилотного комплекса наилучшая точность модели рельефа в плане составила более 0,5 м, а по высоте — более 1 м. Это вызвано существенными внутренними искажениями снимка из-за низкого качества светочувствительной матрицы камеры с кроп-фактором 4,55 и размером одного пикселя 2 мкм.

Беспилотные летательные аппараты Геоскан 101, Геоскан 201 и Суперкам S240-f имеют взлетный вес до 8 кг. Поэтому внешние факторы оказывают значительное влияние на погрешность ЦМР. Однако у комплекса Суперкам S240-f этот недостаток компенсируется качеством светочувствительной матрицы (линейный размер пикселя равен 3,9 мкм) и погрешность модели в плане (менее 0,2 м) сопоставима с аппаратами Дельта М, Суперкам S350-f и ПТЕРО-E5.

Коэффициент отношения фокусного расстояния объектива к базису съемки варьируется у рассмотренных моделей от 1,6 до 5. На беспилотные комплексы Суперкам S240-f, Суперкам S350-f и ПТЕРО E5 устанавливаются фотокамеры с фокусным расстоянием объективов 50 мм. Поэтому цифровые модели имеют погрешности в плане до 0,2 м, но превышающую ее по высоте в несколько раз.

Экспериментальная аэрофотосъемка проводилась с помощью аэрофотосъемочных комплексов трех производителей: ООО «Геоскан» (Геоскан 101), ООО «АФМ Серверс» (Птеро-Е5), «Trimble Navigation, Ltd» (GateWing X100). В блоке предварительно были расставлены 5 опорных и 7 контрольных точек и рассчитаны геодезические координаты с помощью геодезического GPS/ГЛОНАСС приемника Trimble R4 в статическом режиме с точностью измерения в плане и по высоте до 5 мм.

Критерием точности построения модели были приняты среднеквадратические ошибки на контрольных точках в плане и по высоте, найденные по разностям двойных измерений

$$E_{xy} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta x y_i^2}{2 \cdot n}}, \ E_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta z_i^2}{2 \cdot n}},$$
 (22)

где $\Delta x y_i^2 = (x_i - x_i')^2 + (y_i - y_i')^2$ – квадрат разности координат в плане; $\Delta z_i^2 = (z_i - z_i')^2$ – квадрат разности высотных отметок; n – количество контрольных точек.

Ожидаемые погрешности цифровых моделей поверхности, построенных по результатам аэрофотосъемки с применением БПЛА Геоскан 101, ПТЕРО-Е5 и GateWing X100, расходятся с экспериментальными данными, найденными с применением задачи оптимизации (18, 19), не более, чем на 10% (таблица 3)

Таблица 3 — Сравнение теоретических расчетов погрешности ЦМР с экспериментальными данными, полученными с помощью БПЛА

Параметр аэрофото	Геоскан 101	ПТЕРО- Е5	GateWing X100	
Высота полета Н, м	150	220	130	
Varyyaama ayyyyaa N	Теоретич.	68	110	100
Количество снимков $N_{\rm np}$, шт	Эксперимент.	72	115	110
Разрешение снимка на мест-	Теоретич.	4,8	2,8	4,3
ности <i>GSD</i> , см	Эксперимент.	4,6	2,7	4,1
Потполумо от ПМР в тиско	Теоретич.	0,21	0,13	0,56
Погрешность ЦМР в плане	Эксперимент.	0,19	0,12	0,52
E_{xy} , м	Расхождение, %	9,5	7,7	7,1
Пограмму от НМВ на ручаста	Теоретич.	0,34	0,42	1,08
Погрешность ЦМР по высоте	Эксперимент.	0,31	0,38	0,99
E_{z} , M	Расхождение, %	8,8	9,5	8,3

Третья глава посвящена разработке метода оценки остатков угля на открытых складах с учетом особенностей фотограмметрической обработки аэрофотоснимков, полученных с применением беспилотных летательных комплексов.

Фотограмметрический анализ аэрофотоснимков можно разделить на несколько этапов, первым из которых является внутреннее ориентирование исходных изображений с учетом фокусного расстояния объектива, линейного размера пикселя матрицы фотокамеры и направления полета БПЛА. Для автоматического объединения снимков в группы, соответствующие отдельным маршрутам, используются элементы внешнего ориентирования с известными координатами. Затем следует этап сопоставления аэрофотоснимков по связующим точкам, которые вычисляются по отличительным характерным признакам. Как правило, точки интереса имеют экстремумы яркости изображения и уникальную окрестность.

Уравнивание модели выполняется по внешним опорным точкам на краях и в центре кадра. Однако при съемке с помощью БПЛА на местности одного снимка попадает не более одной реперной точки с заданными координатами. Для уменьшения погрешности предложено анализировать информацию об объектах, изображенных на цифровых снимках, с известными геометрическими размерами. При рассмотрении погрузочно-разгрузочных работ при добыче угля открытым способом может быть использован типичный объект на складе – карьерный транспорт.

Предположим, что для перевозки угля со склада применяются самосвалы с шириной и длиной L_x и L_y (рисунок 1). Обозначим геодезические координаты на углах кузова $P_1(x_1, y_1)$, $P_2(x_2, y_2)$, $P_3(x_3, y_3)$, $P_4(x_4, y_4)$. Реальные координаты угловых точек $P'_2(x'_2, y'_2)$, $P'_3(x'_3, y'_3)$, $P'_4(x'_4, y'_4)$ можно вычислить относительно фиксированной точки $P_1(x_1, y_1)$ с учетом положения кузова в пространстве 0XY и его линейных геометрических размеров.

Система, состоящая из уравнения прямой в общем виде и расстояния для точек P_1 и P_2 имеет решение $(x'_2; \ y'_2)$, где x'_2 и y'_2 – истинные координаты точки P_2 . Уравнение прямой в общем виде для точек P_1 и P_2

$$\frac{x-x_1}{x_2-x_1} = \frac{y-y_1}{y_2-y_1}$$
 или $y = \frac{y_1-y_2}{x_1-x_2} \cdot x + \frac{x_1\cdot(y_1-y_2)}{x_2-x_1} + y_1.$ (23)

Для упрощения представления обозначим коэффициенты А и В

$$A = \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2}, B = \frac{x_1 \cdot (y_1 - y_2)}{x_2 - x_1} + y_1.$$
 (24)

Подставив значение y из уравнения прямой (17) получим квадратное уравнение

$$(1+A^2)\cdot {x'_2}^2+2\cdot (A\cdot B-A\cdot y_1-x_1)\cdot {x'_2}+x_1^2+(B-y_1)^2-d_2^2=0$$
, (25) где d_2 – расстояние между точками P_1 и P'_2 .

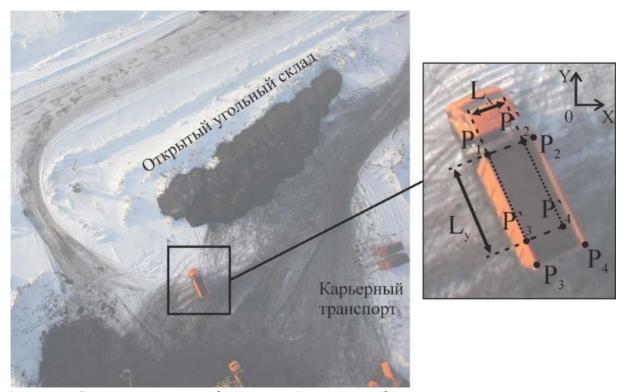


Рисунок 1 — Фрагмент цифровой модели рельефа, построенной по результатам аэрофотосъемки с помощью БПЛА, с отображением расчетных P_j и скорректированных P_j' угловых точек самосвала

Если $x_2 > x_1$, то координата точки $x'_2 > x_1$, и, соответственно, при $x_2 < x_1$ координата точки $x'_2 < x_1$. Таким образом, решение $(x'_2; y'_2)$ будет координатами точки P_2 .

Геометрия кузова имеет форму прямоугольника, следовательно, отрезки P_1P_2 и $P_1P'_3$ должны быть перпендикулярны. Вектор (A;-1) перпендикулярен вектору (1;A), следовательно, прямую $P_1P'_3$, проходящую через точку P_1 можно представить в следующем виде

$$y = -\frac{1}{A}x + \frac{1}{A}x_1 + y_1. \tag{26}$$

Подставив полученное выражение y'_3 в уравнение расстояния между точками P_1 и P'_3 получим уравнение

$$x'_{3} = \pm \sqrt{\frac{d_{3}^{2}}{(^{1}/_{A})^{^{2}+1}}} + x_{1}.$$
 (27)

Решение системы уравнений (20) и (21) будет скорректированными координатами точки $P_3(x'_3; y'_3)$. Аналогично $P_1P'_3$ и $P'_3P'_4$ будут перпендикулярны и координаты точки P'_4 можно найти из уравнений

$$x'_4 = \pm \sqrt{\frac{d_4^2}{A^2 + 1}} + x'_3 \quad \text{if} \quad y'_4 = A(x'_4 - x'_3) + y'_3.$$
 (28)

Координата высоты объекта z_i рассчитывается как сумма средней высотной координаты пикселей модели смежных с объектом и реальной высоты объектом и реальном и реальном

екта. После внесения расчётных данных и пересчета координатной сети цифровой модели линейный размер одного пикселя будет уточнен.

Представив поверхность угольного склада в трехмерной системе координат как совокупность параллелепипедов, каждый из которых соответствует одному пикселю на цифровом аэрофотоснимке (рисунок 2), можно определить координаты точки M_{ij} по формулам прямой фотограмметрической засечки с использованием стереопары $P_I - P_2$. Площадь основания параллелепипедов S_{ij} соответствует приведенной к местности площади одного пикселя модели поверхности склада M. Объем параллелепипеда вычисляется по формуле

$$V_{ij} = S_{ij} (z_{ij} - z_0), (29)$$

где z_{ij} — высота верхнего основания параллелепипеда, которая соответствует третьей координате точки модели M_{ij} ; z_0 — вертикальная координата основания параллелепипеда в геодезической системе координат.

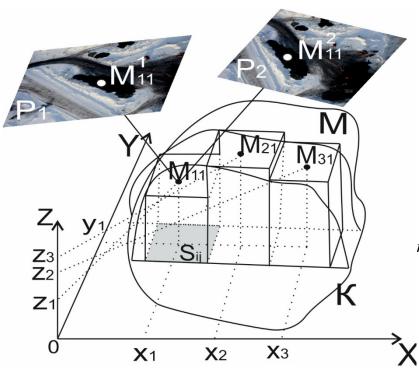


Рисунок 2 — Отображение поверхности M и контура основания K открытого угольного склада в виде совокупности параллелепипедов с основанием S_{ij} и высотой z_{ij} , соответствующих наборам пикселей M_{ij}^1 и M_{ij}^2 на стереопаре изображений $P_1 - P_2$

Открытые угольные склады располагают на специально подготовленных ровных площадках с дренажными системами для водоотведения. При условии подготовленной плоской поверхности для склада z_0 можно вычислить как среднее арифметическое значение высот точек контура K

$$z_0 = \frac{\sum_{i=1}^{n} (z_{i0} + z_{im}) + \sum_{j=1}^{m} (z_{0j} + z_{nj})}{N},$$
(30)

где N – количество точек контура K;

n, m — размерность массива данных, содержащего точки поверхности M.

Поскольку сетка разделения модели на пиксели регулярная, то площади оснований всех параллелепипедов равны и объем угольного склада можно

определить по матрице высот с координатами точек его поверхности по формуле

$$V = S \cdot \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} (z_{ij} - z_{0}).$$
 (31)

В компьютерной реализации алгоритма расчета объёма угольного склада с помощью высотных отметок его поверхности в качестве входных данных используется матрица высот поверхности и основания склада в геодезической системе координат. Разработанная программа позволяет моделировать и рассчитывать объем объекта, находящегося в границах между верхним и нижним основанием, и вертикальными плоскостями на границах контура поверхности. Программное обеспечение, скомпилировано в виде библиотеки динамической компоновки данных и может применяться дополнительно к программному обеспечению для создания трехмерных моделей рельефа.

В четвертой главе представлено практическое применение разработанной оптимизационной модели проведения аэрофотосъемки с фотограмметрической обработкой ее результатов и оценкой остатков угля на открытых складах.

На горном отводе угледобывающего предприятия, расположенного на северо-западе Кемеровской области, выполнена аэрофотосъемка горной массы с применением беспилотного летательного комплекса Геоскан 101, оснащенного цифровой фотокамерой SONY NEX-5 со светочувствительной матрицей CMOS, размерностью 3056×4592 пикселей и объективом с фокусным расстоянием 16 мм. С учетом оптических характеристик съемочной аппаратуры и объекта съемки построено оптимальное полетное задание из 9 параллельных маршрутов, протяженностью 2 км на высоте 150 м.

После посадки беспилотного летательного аппарата были считаны снимки с цифрового фотоаппарата и геоданные с автопилота, содержащие информацию в момент фотографирования об угловых движениях летательного аппарата (крен, тангаж, рысканье) и его геодезических координатах (широта, долгота, высота).

Перед загрузкой данных в цифровую фотограмметрическую станцию РНОТОМОD была проведена эквализация гистограмм яркости изображений. Затем были загружены сведения о цифровой камере и элементы внутреннего ориентирования. Для автоматического объединения фотоснимков в группы, соответствующих отдельным маршрутам, а также построения накидного монтажа схемы блока и его первичного уравнивания использовались геодезические координаты и углы рысканья, тангажа и крена БПЛА в момент фотографирования. Автоматическое сопоставление точек, которые соответствуют одному объекту на стереопарах и триплетах, проводилось встроенными процедурами РНОТОМОD с порогом корреляции 80 %. Установлено, что остаточный поперечный параллакс на стереопарах и межмаршрутных связях не превышает одного пикселя. После добавления опорных и контрольных точек в проект погрешность цифровой модели поверхности составила 0,19 м в плане и 0,31 м по высоте. При этом линейный размер одного пикселя изображения составил 4,6

см на местности. Затем был применен предложенный способ коррекции координатной сети поверхности по известным линейным характеристикам наземных транспортно-технологических средств. На фрагменте созданной цифровой модели с открытым угольным складом были обозначены и вычислены прямо-угольные координаты угловых точек кузовов пяти самосвалов Scania с объемом кузова 31 м³, шириной 2,3 м и длиной 6,4 м. После внесения скорректированных данных и пересчета координатной сети участка модели с открытым угольным складом среднеквадратическая ошибка на контрольных точках уменьшилась до 0,12 м в плане и 0,17 м по высоте, а линейный размер пикселя составил 3,1 см. Для наглядного представления результатов обработки данных, в цифровой фотограмметрической станции PHOTOMOD был создан ортофотоплан местности (рисунок 3, а) и смоделирована карта высот (рисунок 3, б) всего участка горных работ.

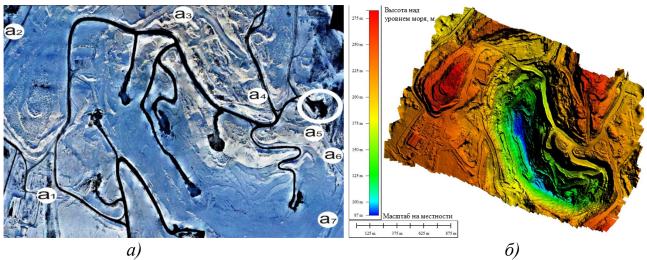


Рисунок 3 — Представление результатов обработки аэрофотосъемки участка горных работ с помощью беспилотных летательных аппаратов:

а)- ортофотоплан с отображением наземных опорных точек a_i и открытого угольного склада; б) - карта высот рельефа над уровнем моря

По требованиям инструкции по производству маркшейдерских работ пространственно-цифровые модели открытого угольного склада, построенные по результатам маркшейдерской съемки и аэрофотосъемки с применением беспилотных летательных аппаратов, должны иметь расхождения не более 0,5 м в плане при масштабе 1:500 и 0,4 м по высоте.

На цифровой фотограмметрической станции PHOTOMOD выполнены измерения в 143 контрольных точках на контуре и поверхности трех складов. Затем в стереорежиме были найдены соответствующие координаты точек на топографическом маркшейдерском плане, используемого в качестве подложки, которая сопоставлена с полученной моделью по известным опорным и контрольным точкам. На основе вычисления разности соответствующих координат в каждой точке была найдена погрешность двойного измерения, которая составила не более 0,3 м в плане и 0,4 м по высоте.

Для измерения объемов угольных складов необходимо ограничить основания склада векторными полигонами и построить отдельные матрицы высот их поверхности. Контуры складов были нанесены с помощью стереорежима отображения снимков на цифровой фотограмметрической станции с режимом трассировки точек. Полученные полигоны были разбиты на квадратные ячейки с шагом, равным линейному размеру одного пикселя ортофотоплана 3,1 см, по которым были рассчитаны пикеты в 2392315 точках для матриц высот.

Некоторые высотные отметки, соответствующие пикселям с существенными радиометрическими и геометрическими искажениями исходных изображений, были вычислены с ошибками. Для устранения погрешности искажений применялся медианный фильтр, который эффективно устраняет помехи импульсного вида.

Для оценки погрешности измерения объема угольного склада представим его поверхность в форме цилиндра. При этом площади основания цилиндра и склада должны совпадать, а средняя высота склада равняться высоте цилиндра (рисунок 4).

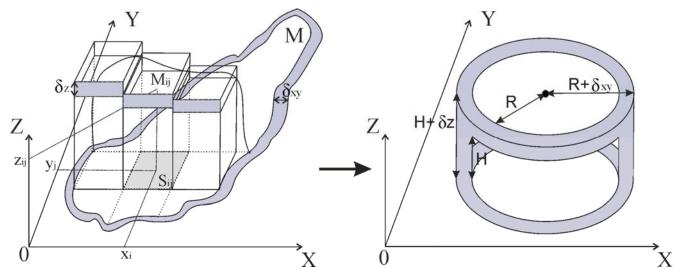


Рисунок 4 — Представление поверхности угольного склада в виде фигуры с правильной геометрической формой

Радиус основания цилиндра, соответствующего основанию первого склада площадью $0.031^2 \cdot 2392315 = 2299 \text{ m}^2$, составил

$$R = \sqrt{S/\pi} = \sqrt{\frac{2299}{\pi}} = 27,05 \text{ (M)}.$$
 (32)

Общая средняя квадратическая погрешность площади δ_{xy} зависит от суммарных влияний погрешностей измерений при съемке в плане E_{xy} и контура основания склада по плану, равной $\frac{1}{2}$ GSD

$$\delta_{xy} = \pm \sqrt{(E_{xy})^2 + (\frac{1}{2}GSD)^2} = \pm \sqrt{(0.12)^2 + (0.0275)^2} = \pm 0.123 \text{ (M)}. (33)$$

Поскольку высотные отметки рассчитываются с применением специализированного программного обеспечения автоматически, среднюю квадратическую погрешность определения высотных отметок δ_z можно приравнять к погрешности измерений при съемке по высоте E_z .

В общем виде погрешность объема угольного склада, определенного по результатам аэрофотосъемки с применением беспилотного летательного аппарата, можно выразить формулой

$$M_{\nu} = \pm \frac{\pi \cdot (R + \delta_{xy})^2 \cdot (H + \delta_z) - V}{V}, \tag{34}$$

$$M_v = \pm \frac{\pi \cdot (27,05+0,123)^2 \cdot (9,36+0,17)-21522}{21522} = \pm \frac{584}{21522} = \pm 2,7 \%.$$
 (35)

Результаты вычислений объемов трех складов, выполненных с помощью разработанного подхода, обеспечили относительную погрешность до 3 % и разность с объемом, найденным методом вертикальных параллельных сечений по данным маркшейдерской съемки, до 5 % (таблица 4).

Таблица 4 – Оценка погрешности расчета остатков угля на открытом складе

	Маркшейдерская съемка	Аэрофотосъемка						
Номер склада	Метод вертикальных параллельных сечений	Способ треугольных призм		Метод разделения модели на объемные фрагменты с шагом основания равным линейному размеру одного пикселя				
	Объем, м ³	Объем, м ³	Разность,	Объем, м ³	Разность,	Относительная погрешность, %		
1	22550	17731	21,4	21522	4,6	2,7		
2	12950	10534	18,6	12314	4,9	2,9		
3	6400	5148	19,6	6095	4,8	3,0		

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение актуальной научной задачи по разработке метода оценки объема угольного склада на основе оптимизации параметров аэрофотосъемки с применением беспилотных летательных аппаратов и адаптации способов фотограмметрической обработки ее результатов, имеющее существенное значение для отрасли наук о Земле.

Основные научные выводы и практические результаты работы заключаются в следующем:

- 1. Разработан подход к выбору рациональных параметров аэрофотосъемки с помощью беспилотного летательного аппарата поверхности угольного склада, основанный на решении оптимизационной задачи нелинейного программирования с ошибкой моделирования до 10%.
- 2. Установлено, что беспилотные летательные аппараты с размещенной на борту фотокамерой со светочувствительной матрицей с кропфактором не более 1,5 и объективом с фокусным расстоянием 16-50 мм, обеспечивают построение цифровой модели рельефа с погрешностью в плане менее 0,2 м и по высоте 0,4 м.
- 3. Определено, что применение разработанного подхода к линейной коррекции цифровой модели рельефа территории открытого угольного склада на основе обработки данных об объектах с заданными геометрическими размерами, распознанными на снимках, уменьшает погрешность уравнивания на 0,05 м в плане и 0,1 м по высоте.
- 4. Показано, что применение комплексного метода, включающего выбор рациональных параметров аэрофотосъемки с помощью беспилотных летательных аппаратов и дополнительную фотограмметрическую обработку аэрофотоснимков, позволяет оперативно регистрировать пространственно-временные характеристики открытого угольного склада с погрешностью в плане и по высоте, соответствующей планам в масштабе до 1:500 с сечением рельефа 0,5 м.
- 5. Установлено, что цифровые модели поверхности открытых угольных складов, построенные по результатам маркшейдерской съемки и аэрофотосъемки с применением беспилотных летательных аппаратов, выполненной с использованием разработанных математических моделей, расходятся в плане не более, чем на 0,3 м и 0,4 м по высоте.
- 6. Представлено алгоритмическое и программное обеспечение для оценки остатков угля на открытых складах способом объемной палетки с шагом разделения основания, равным линейному размеру одного пикселя модели его поверхности, с относительной погрешностью не более 3 % и разностью с объемом, найденным методом вертикальных параллельных сечений, до 5 %.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рецензируемых ВАК МОН РФ:

- 1. **Коровин** Д.С. Построение цифровой модели рельефа открытого угольного склада по данным аэрофотосъемки / О.В. Тайлаков, Д.С. Коровин // Известия вузов. Горный журнал. -2017. -№ 8. -10 с.
- 2. **Коровин** Д.С. Верификация пространственно-цифровых моделей открытых угольных складов, построенных по результатам аэрофотосъемки / О.В. Тайлаков, Д.С. Коровин // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2017. № 5. 7 с.
- 3. **Коровин** Д.С. Выбор рациональных параметров аэрофотосъемки угольного склада, выполняемой с применением беспилотного летательного аппарата / О.В. Тайлаков, В.И. Ефимов, Д.С. Коровин // Известия вузов. Горный журнал. 2016. № 1. С. 50-57.
- 4. **Коровин** Д.С. Особенности фотограмметрической обработки аэрофотоснимков открытого угольного склада при использовании беспилотных летательных аппаратов / О.В. Тайлаков, Д.С. Коровин // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2016. № 5. С. 3-7.
- 5. **Коровин** Д.С. Алгоритмическое и программное обеспечение с применением беспилотных летательных аппаратов для оценки остатков угля на открытых складах / О.В. Тайлаков, Д.С. Коровин, М.П. Макеев, С.В. Соколов // Уголь. $-2015.- \mathbb{N} \ 2.- \mathbb{C}. \ 68-71.$

в прочих изданиях

- 6. **Коровин** Д.С. Применение беспилотных летательных аппаратов в условиях Кемеровской области // Перспективы инновационного развития угольных регионов России: Сборник трудов IV Международная научно-практическая конференция, 4-5 марта 2014 г. Прокопьевск: КузГТУ в г. Прокопьевске, 2014. С. 124-125.
- 7. **Коровин Д.С.** Программно-аналитическое обеспечение обработки аэрофотоснимков для формирования региональной картографической основы // Ежегодная молодежная конференция ИУ СО РАН 2015 [Электронный ресурс]: сб. тр. конференции, 16-17 апреля 2015 г. Кемерово: ФИЦ УУХ СО РАН, 2015. С. 20-27.
- 8. **Коровин Д.С.** Разработка и исследование модели рельефа угольного склада, построенной по результатам аэрофотосъемки с применением беспилотных летательных аппаратов // Ежегодная конференция молодых ученых ФИЦ УУХ СО РАН «Развитие 2016» [Электронный ресурс]: сборник трудов конференции, 11-13 мая 2016 г. Кемерово: ФИЦ УУХ СО РАН, 2016. С. 239-245.

Личный вклад автора в работах, выполненных в соавторстве, заключается в проведении аналитического обзора, построении математических моделей, проведении вычислительных экспериментов, формулировании выводов.