НАУКИ О ЗЕМЛЕ

УДК 622.33:528.7

ОСОБЕННОСТИ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ АЭРОФОТОСНИМКОВ ОТКРЫТОГО УГОЛЬНОГО СКЛАДА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

FEATURES DIGITAL PHOTOGRAMMETRY OF AERIAL PHOTOGRAPHY OPEN-COAL STORE WITH USING UNMANNED AERIAL VEHICLES

Тайлаков Олег Владимирович[1,2],
доктор техн. наук, профессор, e-mail: tov@kuzstu.ru
Tailakov Oleg V.[1,2], Dr. Sc., Professor
Коровин Денис Сергеевич[1], e-mail: KorovinDS@gmail.com
Korovin Denis S.[1], e-mail: KorovinDS@gmail.com

[1]Институт угля ФИЦ УУХ СО РАН, 650065, Россия, г. Кемерово, Ленинградский проспект, 10
[1]Coal Institute of FRC CCC SB RAS / KuzSTU, 10, Leningradsky Prospekt, Kemerovo, 650065, Russian Federation
[2]Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28
[2]T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 street Vesennyaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation

Аннотация: *Представлен подход к геометрической коррекции цифровой модели рельефа открытого угольного склада, построенной на основе данных аэрофотосъемки горного отвода угольного разреза с помощью беспилотных летательных аппаратов. Описан процесс уточнения координатной сети 3D-модели горной массы с применением дешифрированного на снимках карьерного транспорта как типичного объекта при погрузочно-разгрузочных работах при добыче угля открытым способом. Показано, что разработанный способ устранения погрешности вычисления линейных размеров объектов, изображенных на аэрофотоснимках может быть использован для повышения точности подсчета запасов и учета объемов добычи угля.*

Abstract: *An approach to the geometric correction of digital elevation model of the open-coal store, created on the basis of aerial photography mine take with using of unmanned aerial vehicles.Correction network of coordinate 3D-model of the mined rock with interpretation pictures of open pit transport as a typical object during loading and unloading operations at the coal open pit. Article show that the developed method for eliminating errors calculating the linear dimensions of the objects depicted on the aerial photographs can be used to improve the accuracy of calculation of reserves and accounting for coal production.*

Ключевые слова: *беспилотный летательный аппарат, аэрофотосъемка, цифровая фотограмметрия, цифровая модель рельефа, открытый угольный склад.*

Keywords: *unmanned air vehicle, aerial photography, digital photogrammetry, digital elevation model, open coal store.*

Алгоритмы построения и анализа цифровых моделей рельефа на основе материалов аэрофотосъемки широко применяются на угледобывающих предприятиях [1] для планирования геологоразведочных работ, подсчета запасов и учета объемов добычи угля, а также могут быть использованы для оценки влияния горных работ на режимы фильтрации флюидов в углепородном массиве [2, 3], дегазацию угольных пластов через систему пор и трещин, выходящих на поверхность [4]. Внедрение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в картографию и аэрофотосъемку для создания топографических карт значительно снижает затраты на привлечение пилотируемой авиации. Однако способы фотограмметрической обработки ориентированы на малое количество высокодетализированных изображений и требуют адаптации при использовании снимков, полученных с помощью беспилотных летательных аппаратов [5].

Геометрические искажения цифровой модели рельефа (ЦМР), созданной по результатам аэрофотосъемки устраняются выравниванием по опорным точкам на краях и в центре кадра. При съемке с помощью БПЛА на местности одного

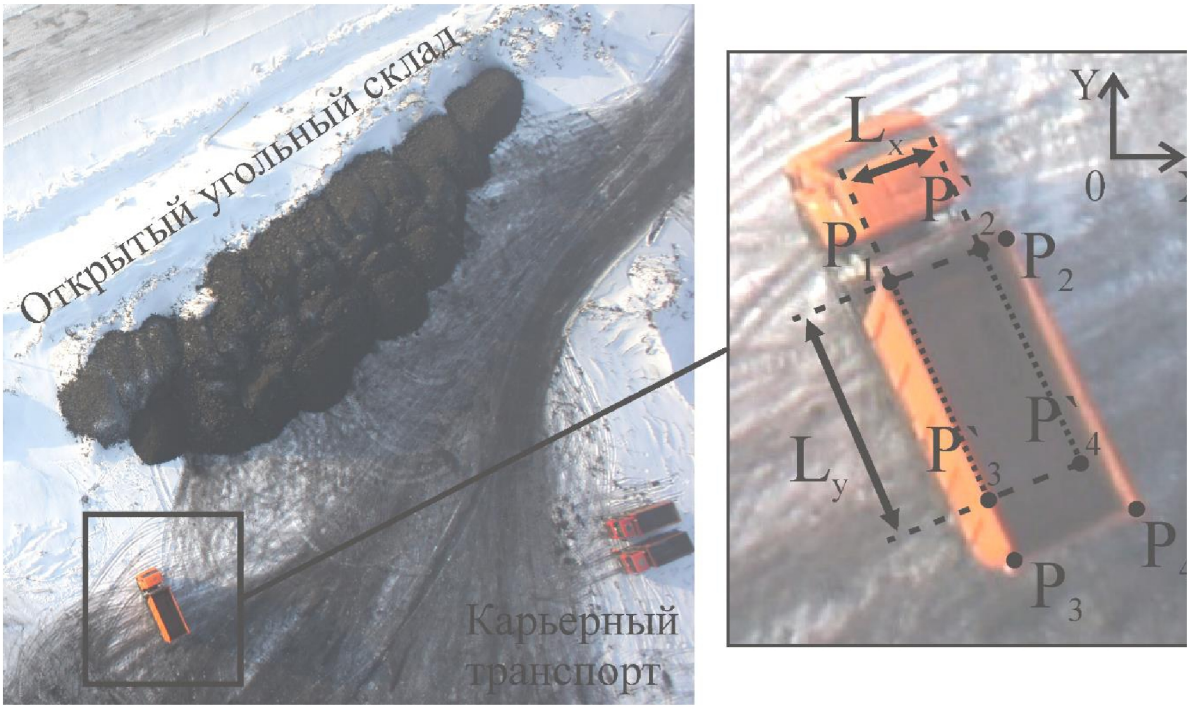

Рис. 1. Фрагмент цифровой модели рельефа, построенной по результатам аэрофотосъемки с помощью беспилотного летательного аппарата, с отображением расчетных P_j и скорректированных P'_j угловых точек самосвала (j = 1…4)

Fig. 1. Detail of a digital elevation model, which built on the results of aerial photography using an unmanned aerial vehicle, displaying the calculated P_j and corrected P'_j points and corner points of tipper (j = 1…4)

снимка попадает не более одной реперной точки с заданными координатами [6]. Для уменьшения погрешности предлагается использовать информацию об объектах, изображенных на цифровых снимках с известными геометрическими размерами [7, 8]. 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 используются самосвалы с шириной и длиной L_x и L_y (рис. 1). Геодезические координаты кузова $P_1(x_1, y_1)$, $P_2(x_2, y_2)$, $P_3(x_3, y_3)$, $P_4(x_4, y_4)$. Поскольку реальные координаты угловых точек не-

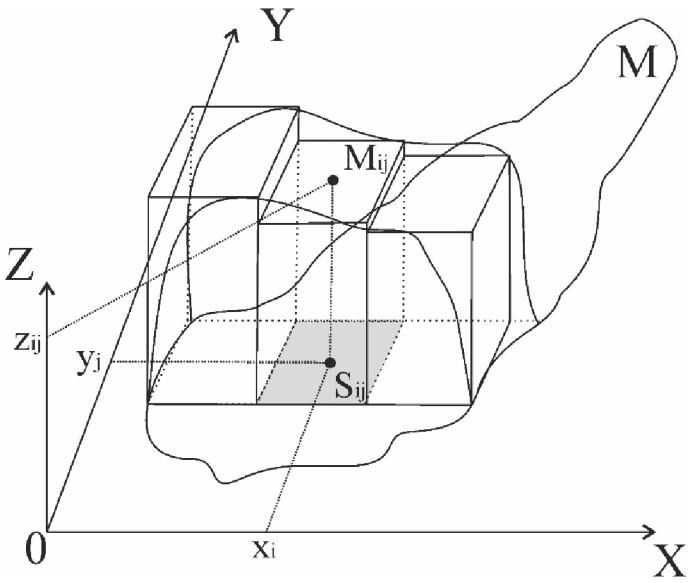

Рис. 2. Отображение поверхности открытого угольного склада M в виде совокупности параллелепипедов с основанием S_{ij} и высотой z_{ij}

Fig. 2. Display surface open coal storage M as a set of parallelepipeds with a base S_{ij} and height z_{ij}

известны, точки $P'_2(x'_2, y'_2)$, $P'_3(x'_3, y'_3)$, $P'_4(x'_4, y'_4)$ вычислим относительно фиксированной точки $P_1(x_1, y_1)$ с учетом положения кузова в пространстве $0XY$ и его геометрических размеров. После внесения расчётных данных и пересчета координатной сети ЦМР будет получена уточненная оценка линейного размера одного пикселя. Следовательно, площадь основания параллелепипеда S_{ij}, соответствующая приведенной к местности площади одного пикселя поверхности склада M и количество параллелепипедов, будет скорректирована, и повысится точность вычисления объема открытого угольного склада способом его разделения на параллелепипеды с основанием, равным одному пикселю изображения (рис. 2) [9].

Рассмотрим цифровую модель рельефа угольного склада, на котором для перевозки угля применяются самосвалы Scania с объемом кузова 31 м^3, шириной 2,3 м и длиной 6,4 м. Прямоугольные координаты угловых точек кузова, рассчитанные при построении модели, представлены в табл. 1.

Система, состоящая из уравнений прямой в общем виде и расстояния для точек P_1 и P_2, имеет решения при значениях $x'_2 = 81,4$ и $x'_2 = 82,9$. 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, координаты точки P'_2 $(x'_2 = 81,4; y'_2 = 30,4)$. Аналогично решив системы уравнений для пар точек $P_1 – P_3$ и $P_1 – P_4$ получены координаты точек P'_3 $(88,5; 29,2)$ и P'_4 $(87,9; 31,9)$.

Объем склада, рассчитанный способом его разделения на параллелепипеды с основанием равным одному пикселю изображения равнялся 21522 м^3. При этом расхождение с результатами вычислений, выполненных способом вертикального сечения по данным маркшейдерской съемки составляло 4,6% [9]. После внесения скорректированных данных и пересчета координатной сети всей модели линейный размер пикселя увеличился с 5,2 см до 5,5 см, а погрешность вычисления объема открытого угольного склада тем же способом уменьшилась на 0,5 % (табл. 2).

Таким образом, использование предложенного подхода для геометрической коррекции цифровой модели рельефа открытого угольного склада позволяет повысить точность расчета его объема по данным, полученным с помощью беспилотных летательных аппаратов. Рассмотренный способ не требует дополнительных наземных маркшейдерских измерений и может применяться при условии размещения на исследуемой поверхности технологических объектов с известными геометрическими размерами.

Таблица 1. Координаты угловых точек кузова самосвала, рассчитанные при создании цифровой модели рельефа с применением беспилотного летательного аппарата
Table 1. The coordinates of the corner points of the tipper body, which were calculated to create a digital terrain model with using an unmanned aerial vehicle

Наименование точки	x, м	y, м	Расстояние до точки $P_1(x_1, y_1)$, м	Реальное расстояние до точки $P_1(x_1, y_1)$, м
$P_1(x_1, y_1)$	82,2	28,2	0	0
$P_2(x_2, y_2)$	81,4	30,4	2,4	2,3
$P_3(x_3, y_3)$	87,3	29,0	5,2	6,4
$P_4(x_4, y_4)$	86,7	31,2	5,5	6,8

Таблица 2. Оценка точности расчета остатков угля на открытом складе способом объемной палетки с основанием равным одному пикселю изображения цифровой модели рельефа
Table 2. Evaluation of the accuracy of calculation of coal reserves at open storage with using method of bulk reticulation model with a base value equal one pixel of the image of digital elevation model

Применяемые данные для расчета объема склада	Линейный размер одного пикселя модели, см	Количество элементов матрицы разделения склада	Объем склада, м^3	Объема склада, рассчитанный способом вертикального сечения, м^3	Отклонение, %
До геометрической коррекции	5,2	849299	21522	22550	4,6
После геометрической коррекции	5,5	759175	23474	22550	4,1

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Эпов М. И., Злыгостев И. Н. Применение беспилотных летательных аппаратов в аэрогеофизической разведке // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2012. – №-3. – С. 22-27.

2. Тайлаков О.В., Уткаев Е.А., Застрелов Д.Н., Смыслов А.И. Физическое моделирование фильтра-

ции флюида в угольном пласте для оценки радиуса скин-эффекта // Горный Информационно-аналитический бюллетень, Москва: Издательство «ГОРНАЯ КНИГА». – 2013. – Отдельный выпуск № 6. – С. 165-169.

3. Тайлаков О.В., Смыслов А.И., Уткаев Е.А. Оценка фильтрационных свойств угольных пластов // Горная промышленность. – 2012. – № 5672 (672) . – С. 24-25.

4. Тайлаков О.В. Разработка методики определения газоносности угольных пластов в процессе ведения горных работ / О.В. Тайлаков, Е.В. Мазаник, А.Н. Кормин // Горный Информационно-аналитический бюллетень. Экология, метанобезопасность. М. . – 2011. – № 8. – С. 210-214.

5. Ессин А. С., Ессин С. С. Особенности фотограмметрической обработки материалов цифровой аэрофотосъемки с БПЛА // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2010. – №-1. – С. 80-82.

6. Тайлаков О.В. Выбор рациональных параметров аэрофотосъемки поверхности угольных предприятий беспилотными летательными аппаратами / О.В. Тайлаков, В.И. Ефимов, Д.С. Коровин // Известия вузов. Горный журнал. – 2016. – № 1. – С. 50-57.

7. Буланов В. А., Волосатова Т. М. Программный комплекс предварительной обработки изображений для обнаружения и распознавания изображений // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2014. – № 4. – С. 321-338.

8. Ильясова Н. Ю., Костин В. И., Котляр В. В., Куприянов А. В., Рощин А. В., Устинов А. В. Система распознавания объектов на фотограмметрических изображениях // Компьютерная оптика. – 2001. – № 21. – С. 185-192.

9. Тайлаков О.В., Коровин Д.С., Макеев М.П., Соколов С.В. Алгоритмическое и программное обеспечение с применением беспилотных летательных аппаратов для оценки остатков угля на открытых складах // Уголь. – 2015. – № 5. – С. 68–71.

REFERENCES

1. Ehpov M. I., Zlygostev I. N. Primenenie bespilotnyh letatel'nyh apparatov v aehrogeofizicheskoj razvedke // Interehkspo Geo-Sibir'. – 2012. – №-3. – S. 22-27.

2. Tailakov O.V., Utkaev E.A., Zastrelov D.N., Smyslov A.I. Fizicheskoe modelirovanie fil'tracii flyuida v ugol'nom plaste dlya ocenki radiusa skin-ehffekta // Gornyj Informacionno-analiticheskij byulleten', Moskva: Izdatel'stvo «GORNAYA KNIGA». – 2013. – Otdel'nyj vypusk № 6. – S. 165-169.

3. Tailakov O.V., Smyslov A.I., Utkaev E.A. Ocenka fil'tracionnyh svojstv ugol'nyh plastov // Gornaya promyshlennost'. – 2012. – № 5672 (672) . – S. 24-25.

4. Tailakov O.V. Razrabotka metodiki opredeleniya gazonosnosti ugol'nyh plastov v processe vedeniya gornyh rabot / O.V. Tajlakov, E.V. Mazanik, A.N. Kormin // Gornyj Informacionno-analiticheskij byulleten'. EHkologiya, metanobezopasnost'. M. . – 2011. – № 8. – S. 210-214.

5. Essin A. S., Essin S. S. Osobennosti fotogrammetricheskoj obrabotki materialov cifrovoj aehrofotos"emki s BPLA // Interehkspo Geo-Sibir'. – 2010. – №-1. – S. 80-82.

6. Tailakov O.V. Vybor racional'nyh parametrov aehrofotos"emki poverhnosti ugol'nyh predpriyatij bespilotnymi letatel'nymi apparatami / O.V. Tajlakov, V.I. Efimov, D.S. Korovin // Izvestiya vuzov. Gornyj zhurnal. – 2016. – № 1. – S. 50-57.

7. Bulanov V. A., Volosatova T. M. Programmnyj kompleks predvaritel'-noj obrabotki izobrazhenij dlya obnaruzheniya i raspoznavaniya izobrazhenij // Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.EH. Baumana. – 2014. – № 4. – S. 321-338.

8. Il'yasova N. YU., Kostin V. I., Kotlyar V. V., Kupriyanov A. V., Roshchin A. V., Ustinov A. V. Sistema raspoznavaniya ob"ektov na fotogrammetricheskih izobrazheniyah // Komp'yuternaya optika. – 2001. – № 21. – S. 185-192.

9. Tailakov O.V., Korovin D.S., Makeev M.P., Sokolov S.V. Algoritmicheskoe i programmnoe obespechenie s primeneniem bespilotnyh letatel'nyh apparatov dlya ocenki ostatkov uglya na otkrytyh skladah // Ugol'. – 2015. – № 5. – S. 68–71.

Поступило в редакцию 1.09.2016
Received 1 September 2016