

УДК 622.1:528.7:528.9

**МЕТОДИКА МАРКШЕЙДЕРСКОЙ СЪЕМКИ
ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ШАХТНОГО ПОЛЯ**

Д. В. Дорохов, Ф. К. Низаметдинов, С. Г. Ожигин, С. Б. Ожигина

*Карагандинский государственный технический университет,
E-mail: niz36@mail.ru, бульвар Мира, 56, 100027, г. Караганда, Казахстан*

Рассмотрены варианты применения дистанционных технологий измерений, таких как лазерное сканирование и аэрофотосъемка. На основе мирового опыта в области фотограмметрии предложена методика съемки с использованием фотокамеры, квадрокоптера, электронного тахеометра и соответствующего программного обеспечения. Установлены причины возникновения погрешностей и требования к точности выполнения съемных работ при определении положений точек в плане и по высоте. Проведена экспериментальная апробация предложенной методики с оценкой точности полученных данных в условиях шахты “Соколовская” АО “Соколовско-Сарбайского горно-обогатительного производственного объединения”.

Геомеханический мониторинг, маркшейдерская съемка, сдвигение горных пород, просадки дневной поверхности, подземные горные работы, фотограмметрия, квадрокоптер, трехмерная модель, погрешность, оценка точности измерений

DOI: 10.15372/FTPRPI20180519

Исследование направлено на совершенствование методики производства маркшейдерских съемок опасных объектов на земной поверхности шахтного поля для мониторинга процесса выхода техногенных деформаций на поверхность (просадок или так называемых “воронки”). Техногенное воздействие опасных деформаций на подработанных территориях обусловлено проявлением деформаций в нарушенном массиве и активизацией процесса сдвижения горных пород при ликвидации пустот. По мере интенсификации горных работ, как по площади, так и по глубине возрастает площадь земной поверхности, подверженная значительному деформированию [1]. Инструкция по производству маркшейдерских работ требует отображения на планах земной поверхности проявлений деформаций (провалы, воронки и крупные трещины) [2]. На участках, где в результате хозяйственной деятельности рельеф и ситуация земной поверхности значительно изменяются, выполняют топографические съемки с целью обновления планов с соблюдением требований [2, 3]. Среднеквадратическая погрешность положения на планах изображения предметов и контуров местности с четкими очертаниями относительно ближайших точек съемочного обоснования при топографо-геодезических изысканиях на горных предприятиях в масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500 не должна превышать 0.5 мм в установленном масштабе [4]. Таким образом, цель данного исследования — разработка альтернативной методики фиксации планового положения воронок с точностью до 0.5 м для масштаба 1:1000 относительно пунктов съемочного обоснования.

В мировой практике широкое распространение приобретают технологии съемок с применением фотограмметрии и лазерного сканирования. Технология лазерного сканирования позволяет проводить измерения с миллиметровой точностью, достаточной для обнаружения сдвижений в горизонтальной и вертикальной плоскостях [5]. Результаты наземного лазерного сканирования дают возможность выявить системы трещин на поверхности горного массива и их ориентирование в пространстве [6]. Сканирование на изучаемых участках проводится перекрестно с нескольких точек [7]. Это вызвано препятствиями видимости, что приводит к большому количеству дополнительных стоянок. Проблема отсутствия прямой видимости связана с наземными способами съемки, следовательно, решение проблемы заключается в применении технологий съемок с воздуха [8]. Другим примером является спутниковая интерферометрия, получившая широкое применение в горной промышленности [9].

Наиболее доступной технологией для съемок опасных объектов шахтного поля представляется аэрофотосъемка с летальных аппаратов (аэрофотосканирование с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), а также аэрофотограмметрия с quadro- и гексакоптеров). Недостатком аэрофотосканирования с БПЛА является необходимость размещения на поверхности снимаемой территории специальных знаков, что на шахтном поле невозможно.

Альтернативное решение данной проблемы — применение технологии фотограмметрии в сочетании с quadroкоптерами. Подобное сочетание фотограмметрии, дополненное технологией GPS, рассматривается в [10, 11]. Гексакоптер оснащается фотограмметрической камерой и однофазовым GPS-приемником, который определяет координаты камеры во время выполнения снимков земной поверхности. Сочетание quadroкоптера с легковесными малыми фотокамерами — эффективная система для аэрофотограмметрической съемки.

В данном исследовании низкую точность навигационного GPS-приемника, размещенного на quadroкоптере, предлагается компенсировать измерениями посредством электронного тахеометра. Тахеометр находит координаты положения quadroкоптера во время того, как камера совершает серии снимков. Обработка снимков выполняется на современных программах по фотограмметрии. Опорные точки (координаты положения камер) определяются фотограмметрическими программами для задания системы координат, оптимизации выравнивания фотографий, измерения расстояний и объемов. Для задания системы координат на основе опорных точек необходимо знать положение в пространстве минимум трех точек (оптических центров снимков) [12]. Следовательно, съемка образовавшихся воронок quadroкоптером должна проводиться тремя снимками, которые выполняются сериями. Снимки группируются в серии по времени. Дополнительным условием съемки является синхронизация по времени электронного тахеометра и камеры quadroкоптера. Снимкам в одной серии, выполненной с одного положения камеры, присваиваются соответствующие серии одинаковых координат. Получаемые тахеометром координаты характеризуют положение камеры не при одиночном снимке, а при всей серии снимков, т. е. серия снимков, позиционируется по одному измерению тахеометром, и всем снимкам одной серии присваиваются одинаковые координаты.

Пространственные координаты точек местности находятся путем совместного решения уравнений коллинеарности пары соответствующих проектирующих лучей, принадлежащих смежным перекрывающимся снимкам в общей системе координат. Для этого необходимо связать координатные системы пары перекрывающихся снимков, т.е. найти их элементы взаимного и внешнего ориентирования. Взаимное ориентирование снимков определяется условием компланарности трех векторов (рис. 1) базисного и двух одноименных проектирующих лучей, что равнозначно условию компланарности четырех точек (S_1, S_2, m_1, m_2) [4].

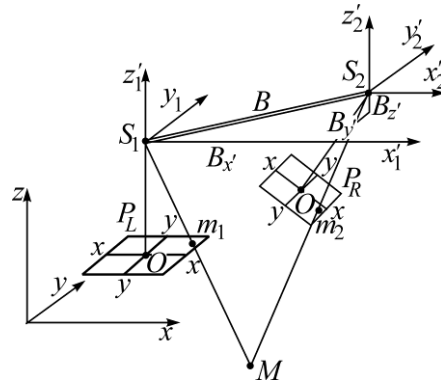


Рис. 1. Базисная система элементов взаимного ориентирования аэрофотоснимков [4]: S_i — оптические центры камеры; B — базис, m ; B_x', B_y', B_z' — проекции базиса на соответствующие оси; P_L и P_R — соответственно левый и правый снимки; O — центры снимков; $(x-x)$ и $(y-y)$ — оси внутри снимков; M — точка, связующая снимки; m_i — точки, описывающие положение точки M во внутренней системе снимков

При определении положения объектов по снимкам с квадрокоптера основным источником погрешностей является процесс нахождения координат оптического центра фотокамеры S_i . Полученные тахеометром координаты не являются истинными координатами оптического центра камеры из-за влияния следующих факторов: нестабильности квадрокоптера в воздухе, визирования тахеометра на корпус квадрокоптера и погрешностей измерений тахеометром.

Нестабильность квадрокоптера вовремя фотографирования и координирования тахеометром (рис. 2) вызывает погрешность нестабильности квадрокоптера $m_{N,Q}$. Из схемы, приведенной на рис. 2, следует, что погрешность нестабильности квадрокоптера $m_{N,Q}$ находится в зависимости от отрезка D , который ограничивается координатами предельных положений камер S_i в одной серии снимков. Проекции отрезка D на координатные оси содержат минимальные и максимальные значения координат оптических центров одной серии снимков, определенных в относительной системе серии снимков; координаты, измеренные тахеометром. Таким образом, значение D можно считать равным значению $m_{N,Q}$. Погрешность $m_{N,Q}$ участвует в определении, как планового положения камеры, так и высотного.

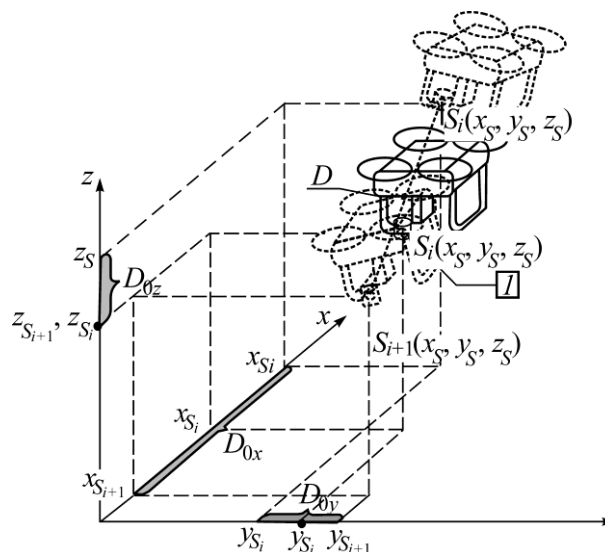


Рис. 2. Схема влияния фактора нестабильности на точность измерения: I — оптический центр камеры S_i

Визирование на корпус квадрокоптера, где закреплены пленочные отражатели вместо визирования на камеру (рис. 3), вызывает погрешность визирования на корпус $m_{V,Q}$.

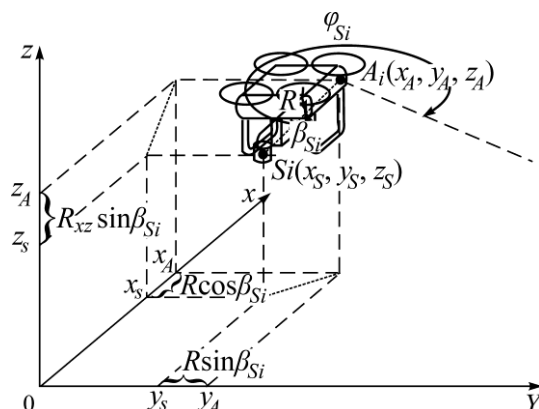


Рис. 3. Схема определения положения камеры по точке на корпусе: A_i — точка визирования тахеометра на корпус; R — смещение между точками A_i и S_i ; A_i-T — ось визирования тахеометра; φ_{S_i} — горизонтальный угол между отрезком A_iS_i и осью A_i-T , °; β_{S_i} — угол наклона отрезка A_iS_i

Согласно рис. 3, оценка влияния смещения R основывается на габаритах корпуса квадрокоптера и положении камеры. Корпус квадрокоптера имеет плавные и сложные очертания. Для проведения оценки точности используются габариты корпуса, которые составляют $0.290 \times 0.290 \times 0.196$ м. В соответствии со схемой конструкции, камера квадрокоптера смещена с центра к краю корпуса и вниз на размер подвеса камеры [13]. Таким образом, упрощенно обозначив корпус по габаритам и положение на нем оптического центра камеры, можно установить максимальное смещение R , соответствующее погрешности визирования на корпус $m_{V,Q}$. Значения смещения R , а следовательно $m_{V,Q}$, достигают 0.290 м в горизонтальной плоскости и 0.175 м в вертикальной.

Погрешность положения фотокамеры определяется тахеометром полярным способом:

$$m_{P.M} = \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{m_L^2 + \left(\frac{m_\beta}{\rho}\right)^2} L^2, \quad (1)$$

где $n = 1$ — число приемов при измерениях; $m_L = 0.003 \pm 0.002$ мм / 1000 м = ± 0.005 м — ошибка измерения расстояния исходя из характеристик тахеометра; $m_\beta = 5''$ — средняя квадратическая погрешность измерения угла; $\rho = 206265''$ — постоянная; $L = 500$ м — длина измеряемой стороны шахтного поля.

Погрешность высотного положения определяется тригонометрическим нивелированием:

$$m_{T.N}^2 = L^2 \cos^2 \delta \frac{m_\delta^2}{\rho^2} + m_L^2 \sin^2 \delta + 2m_V^2, \quad (2)$$

здесь δ — вертикальный угол наклона визирной оси тахеометра, град; m_δ — средняя квадратическая погрешность измерения вертикального угла δ , принимается равной угловой точности тахеометра, в данном исследовании $5''$; $m_V = 0.001$ м — средняя квадратическая погрешность измерения высоты инструмента, принимается согласно точности применяемых рулеток с минимальной ценой деления 1 мм, используемых при измерениях на точке маркшейдерского съемочного обоснования.

Зависимость средней квадратической погрешности определения превышения от угла наклона визирного луча зрительной трубы и расстояния от тахеометра до квадрокоптера представлена в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Средняя квадратическая погрешность определения превышения тахеометром с точностью измерений $5''$ $m_{T,N}$, $1 \cdot 10^{-4}$ м

Угол наклона визирной оси δ , град	Расстояние от тахеометра до квадрокоптера L , м			
	200	300	400	500
4	50	74	98	122
9	50	73	97	121
18	49	71	94	117
27	48	68	89	110
36	46	64	83	102
45	44	59	75	91
54	42	54	66	80

Для дальнейших вычислений принимается максимальное значение $m_{T,N}$ из табл. 1, равное 0.012 м. Обобщая изложенное, результирующая погрешность определения планового положения камеры находится из выражения

$$m_{PL,CAM}^2 = m_{N,Q}^2 + m_{V,Q}^2 + m_{P,M}^2, \tag{3}$$

а погрешность определения высотного положения камеры — из выражения

$$m_{H,CAM}^2 = m_{N,Q}^2 + m_{V,Q}^2 + m_{T,N}^2. \tag{4}$$

Оценка точности предлагаемого метода проводится путем установления погрешности определения положения точки трехмерной модели в плане $m_{A-F,PL}$ и по высоте $m_{A-F,Z}$. Данная погрешность возникает в процессе съемки в результате влияния среднеквадратической погрешности определения планового ($m_{PL,CAM}$) и высотного ($m_{H,CAM}$) положения камеры (рис. 4).

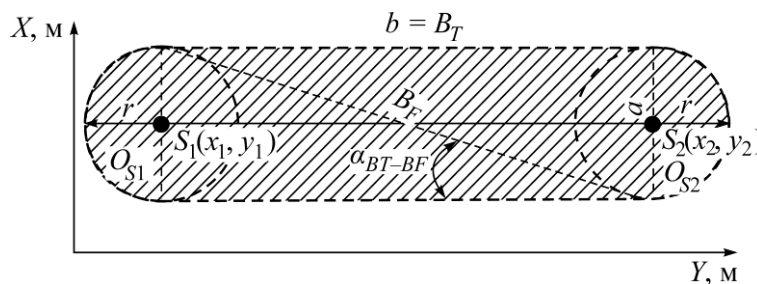


Рис. 4. Схема смещений в горизонтальной плоскости базиса съемки: o_{Si} — область, ограниченная окружностью; $S_1(x_1, y_1)$ и $S_2(x_2, y_2)$ — оптические центры камеры; r — радиус окружности; a и b — стороны прямоугольной области; B_T — базис, определенный тахеометром; B_F — истинный базис; α_{BT-BF} — угол между базисами B_T и B_F

Причина возникновения погрешностей заключается в том, что два оптических центра камеры S_1 и S_2 образуют базис, в котором положение каждой камеры определено с погрешностями в плане $m_{PL,CAM}$ и по высоте $m_{H,CAM}$. Координаты x_i, y_i точки оптического центра камеры S_i , определенные тахеометром, принадлежат не истинному оптическому центру, а области, ограниченной окружностью o_{Si} , с центром в точке S_i . Окружность o_{Si} описывается радиусом r , который соответствует $m_{PL,CAM}$ и содержит также неизвестную точку истинного положения оптического центра камеры.

Таким образом, два положения оптических центров камер, согласно схеме на рис. 4, образуют два базиса B : базис между точками, определенными тахеометром B_T , и неизвестный истинный базис B_F . Возможные положения B_F создают область в пространстве, в пределах которой находились камеры. Данная область возникает в результате наложения окружностей o_{Si} , с центрами в точках, определенных тахеометром, и прямоугольника со стороной a , равной диаметру окружности o_{Si} и стороной b , параллельной базису B_T .

Исходя из схемы на рис. 1, неизвестный истинный базис характеризуется длиной B_F и углом α_{BF-BT} к базису B_T . Интервал, определяемый выражением:

$$(B_T - 2m_{PL.CAM}) \leq B_{II} \leq (B_T + 2m_{PL.CAM}), \tag{5}$$

где B_T — длина базиса, полученная тахеометром, м; $m_{PL.CAM}$ — средняя квадратическая погрешность определения планового положения камеры, м; B_F — длина истинного базиса, м, содержит возможные значения B_F . Угол α_{BF-BT} между базисами B_T и B_F находится значением, лежащем в интервале

$$0 \leq \alpha_{BF-BT} \leq \arctg\left(\frac{2m_{PL.CAM}}{B_T}\right), \tag{6}$$

где α_{BF-BT} — угол между базисами B_T и B_F , град.

Зависимость погрешности определения координат точек в плане предлагаемой методикой аэрофотосъемки с тахеометрическими измерениями $m_{A-F.PL}$ от значений длины базиса между точками B_T приведена на рис. 5 и описывается выражением

$$m_{A-F.PL} = \left(\left(\frac{0.708L_{MOD}}{0.708 + B_T} \right)^2 + \left(\frac{0.708}{L_{MOD}} \right)^2 + 9.748 \cdot 10^{-7} \cdot 2H_{CAM}^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \tag{7}$$

где L_{MOD} — протяженность области моделирования (размеры участка, подлежащего съемке), м; H_{CAM} — высота полета камеры (квадрокоптера), м.

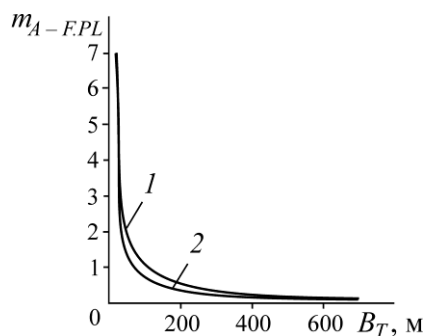


Рис. 5. Анализ изменения точности определения планового положения точки при изменениях в расстоянии между камерами: 1 — график функции $m_{A-F.PL} = f(B_T)$ при $L_{MOD} = 300$ м, $H_{CAM} = 5 - 100$ м; 2 — график функции $m_{A-F.PL} = f(B_T)$ при $L_{MOD} = 200$ м, $H_{CAM} = 5 - 100$ м

Погрешность определения высотных отметок точек объектов шахтного поля $m_{A-F.Z}$ оценивается исходя из погрешности высотной отметки положения камеры во время серии снимков $m_{H.CAM}$. Процесс влияния $m_{H.CAM}$ аналогичен процессу влияния $m_{PL.CAM}$, согласно схеме на рис. 1, но учитывает поправку на то, что данный процесс протекает в вертикальной плоскости.

Проводились две экспериментальные съемки предлагаемым способом, обработка выполнялась в фотограмметрическом программном обеспечении для вычисления координат точек. В первом эксперименте на местности была закреплена знаком точка и проводилась ее съемка (рис. 6). Во втором эксперименте выполнялась съемка фактического положения “воронки” на шахтном поле.

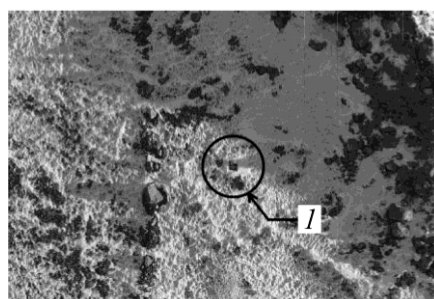


Рис. 6. Снимок с квадрокоптера в первом эксперименте: *I* — точка, закреплённая знаком, координаты которой определялись в ходе эксперимента

Для установления погрешностей в первом эксперименте сравнивались координаты определяемых точек с альтернативным способом съемки. В качестве последнего применяется GPS-технология, которая выполнялась в режиме кинематики с точностью от 0.01 до 0.03 м [14]. Для повышения точности измерения проводились со стационарного штатива путем увеличения времени наблюдений на 5 мин [15]. В первом эксперименте полеты квадрокоптера проходили на высоте 5 и 15 м. Выполнено 59 снимков. Для интерпретации результатов вводится величина L_{ALT} — отклонение между координатами, полученными GPS-съемкой и фотограмметрическим способом. Отклонение координат вызвано влиянием погрешностей фотограмметрической съемки, законов оптических искажений снимков [16] и дополнительно внесенными погрешностями $m_{A-F,PL}$, $m_{A-F,Z}$. В табл. 2 приводится сравнение точности предлагаемого метода съемки с альтернативным методом на основе результатов экспериментальной съемки.

ТАБЛИЦА 2. Пример результатов съемки и сравнение с альтернативными данными

Пары серий снимков	Теоретическая $m_{A-F,PL}$, м	Координаты знака, определенные методом дополненной аэрофотограмметрии, м			Координаты знака, определенные технологией GPS, м			Отклонение в плане L_{ALT} , м
		<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>	<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>	
4–6	10.898	7518.264	3459.501	194.956				2.839
4–7	32.184	7518.817	3452.543	193.663				4.484
4–10	0.642	7517.201	3456.741	197.391				0.205
4–11	0.655	7517.481	3457.187	195.145	7517.398	3456.797	195.270	0.399
5–10	0.630	7516.353	3456.553	195.694				1.073
5–11	0.641	7516.579	3457.211	195.473				0.918
6–8	27.233	7516.834	3456.119	195.995				0.882

Полученные результаты представлены на рис. 7, где показаны отклонения в плане L_{ALT} и зависимости $m_{A-F,PL} = f(B_T)$ при фактических значениях длин базиса B_T между камерами. Большинство полученных эмпирически значений L_{ALT} находится внутри области, ограниченной $m_{A-F,PL} = f(B_T)$, исходя из чего можно утверждать, что предлагаемый метод съемки и способ оценки его точности отвечает поставленным целям и требованиям.

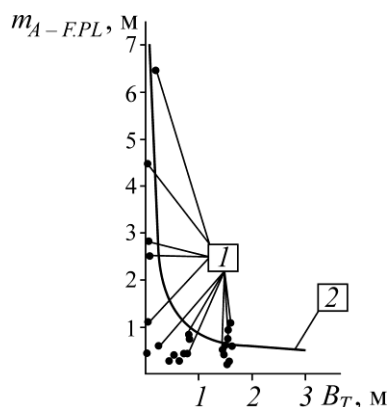


Рис. 7. Сопоставление теоретических и практических данных: 1 — фактические отклонения координат в плане L_{ALT} от координат, определенных альтернативным способом; 2 — теоретическая зависимость $m_{A-F.PL} = f(B_T)$ при фактических условиях аэрофотосъемки

В ходе обработки снимков получались некорректные трехмерные модели по парам тех серий снимков, которые характеризуются высокими значениями погрешности $m_{A-F.PL}$, что указывает на появление грубой ошибки, вызванной малыми фактическими значениями длины базиса между камерами B_T .

Результаты второй экспериментальной съемки отображены на рис. 8, где выполнены три серии снимков воронки на поверхности шахтного поля. Тахеометром определены координаты положения квадрокоптера и установлена точность. Согласно предлагаемому способу оценки погрешностей, она составляет $m_{A-F.PL} = 0.336$ м. На полученную трехмерную модель с использованием фотограмметрического программного обеспечения накладывается текстура, по которой можно определить раскрытие трещин, глубину заколов и другие проявления деформаций.

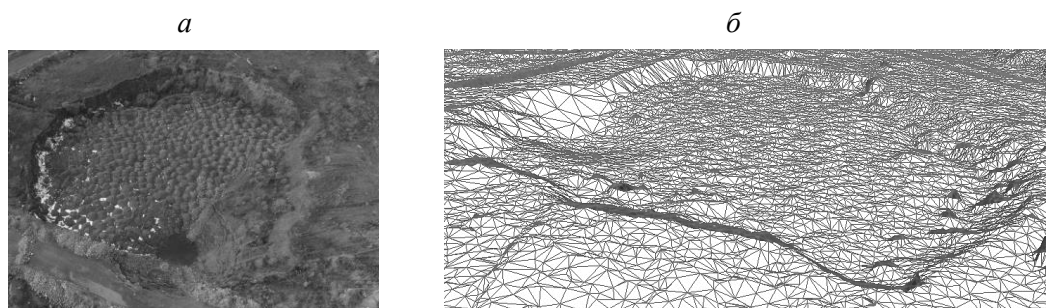


Рис. 8. Результаты обработки аэрофотоснимков воронки обрушения: а — снимок с квадрокоптера; б — трехмерная модель

Таким образом, предлагаемый способ привязки планового положения воронок на поверхности шахтного поля при среднеквадратической погрешности определения положения обеспечивает установленное требование 0.5 м для масштаба съемки 1:1000 относительно пунктов обоснования.

ВЫВОДЫ

Предложена методика съемки поверхности шахтного поля в условиях вероятного возникновения провалов, основанная на применении дистанционной технологии измерений при помощи аэрофотосъемки с использованием квадрокоптера, фотокамеры и электронного тахеометра.

Определены основные этапы измерений, включающие: синхронизацию времени съемки тахеометра и квадрокоптера; выполнение серии снимков с одного положения камеры с при-

своением снимкам из одной серии одинаковых координат; обработку серии снимков с использованием специального фотограмметрического программного обеспечения; определение области модели, пригодной для дальнейшей обработки; оценку точности полученных данных по предложенной методике съемки. Результатом съемки являются координаты объектов, трехмерная модель, ортофотоплан, облако точек, каркасная модель, карта высот, топографические поверхности в горизонталях, данные об объеме и площади воронки обрушений поверхности шахтного поля.

Выполнен анализ погрешностей измерений по предлагаемой методике съемки. Установлены источники возникновения ошибок и метод их расчета. Приведены графики зависимостей, позволяющие оценить точность осуществляемых работ. Проведена экспериментальная апробация методики в условиях шахты “Соколовская” АО “ССГПО” и дана сравнительная оценка полученных данных с результатами GPS-измерений. Установлено, что предложенный метод определения погрешностей планового положения воронки обрушения относительно пунктов съемного обоснования обеспечивает допустимую точность измерений (до 0.5 м для масштаба 1:1000).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барсуков И. В., Морин С. В. Геомеханическое и маркшейдерское обеспечение безопасной эксплуатации зданий и сооружений, возводимых на подработанных территориях ликвидированных шахт // Горная геомеханика и маркшейдерское дело: сб. науч. тр. — СПб.: ВНИМИ, 2009. — С. 198–203.
2. Охрана недр и геолого-маркшейдерский контроль. Инструкция по производству маркшейдерских работ / Федеральный горный и промышленный надзор России. — М.: ФГУП НТЦ Промышленная безопасность, 2004. — 120 с.
3. Инструкция по топографической съемке в масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 и 1:500 / ГУГК. — М.: Недра, 1983. — 98 с.
4. Попов В. Н., Ворковастов К. С., Столчнев В. Г., Руденко В. В., Алферов А. Ю., Макурин А. Б. Маркшейдерские работы на карьерах и приисках: справочник. — М.: Недра, 1989. — 424 с.
5. Желтышева О. Д. Применение технологии лазерного сканирования для мониторинга деформаций зданий и сооружений // Геомеханика в горном деле: докл. науч.-техн. конф. (Екатеринбург, 12–14 октября 2011 г.). — Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2012. — С. 189–194.
6. Ожигин Д. С. Обеспечение устойчивости откосов борта разреза в зоне бестранспортной отработки вскрыши // Труды КарГТУ. — 2017. — № 4 (69). — С. 68–72.
7. Токунжин Е. Н., Ростов С. А., Ожигин С. Г., Ожигина С. Б. Геомеханический мониторинг с использованием современных методов измерений // Труды междунар. форума. Инновационные технологии в геодезии, маркшейдерии и геотехнике: сб. науч. тр. (Караганда, 14–15 сентября 2017 г.). — Караганда: Изд-во КарГТУ, 2017. — С. 103–109.
8. Meng X., Wang L., Silván-Cárdenas J.L., and Currit N. A multi-directional ground filtering algorithm for airborne LIDAR, ISPRS J. of Photogrammetry and Remote Sensing, 2009, Vol. 64, No. 1 — P. 117–124.
9. Sanchez F., Royo B., and Meloni F. InSAR ground motion monitoring for mining areas // Труды междунар. форума. Инновационные технологии в геодезии, маркшейдерии и геотехнике: сб. науч. трудов (Караганда, 14–15 сентября 2017 г.). — Караганда: Изд-во КарГТУ, 2017. — С. 15–21.
10. Daakir M., Pierrot-Desilligny M., Bosser P., Pichard F. UAV onboard photogrammetry and GPS positioning for earthworks, Proc. ISPRS Geospatial Week (La Grande Motte, France, 28 Sep. – 03 Oct. 2015), The Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2015, Vol. XL-3/W3. — P. 293–298.

11. **Blaha M., Eisenbeiss H., Grimm D., and Limpach P.** Direct georeferencing of UAVs, The Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2011, Vol. XXXVIII-1/C22. — P. 131–136.
12. **Руководство** пользователя Agisoft PhotoScan: Professional Edition, версия 1.2. Agisoft LLC, 2016. — 113 с. (http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_2_ru.pdf) (дата обращения 20.03.2018).
13. **PHANTOM 4** Инструкция по эксплуатации V1.2 // DJI, 2016. — 65 с. — (https://dl.djicdn.com/downloads/phantom_4/en/Phantom_4_User_Manual_ru_v1.2.pdf) (дата обращения 20.03.2018).
14. **Ожигин С. Г., Низаметдинов Ф. К., Ожигина С. Б.** Маркшейдерское обеспечение устойчивости прибортовых массивов. Система мониторинга состояния устойчивости карьерных откосов. — Саарбрюккен: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. — 316 с.
15. **Низаметдинов Ф. К., Ожигин С. Г., Ожигина С. Б., Долгоносков В. Н., Радей К., Станькова Г.** Мониторинг состояния откосов уступов и бортов карьеров — Здибы.: Научно-исследовательский геодезический, топографический и картографический институт, 2015. — 350 с.
16. **Teeuw R., Whiteside M., McWilliam N., and Zukowskyj P.** Field Techniques: GIS, GPS and Remote Sensing, London: Geography Outdoors Royal Geographical Society (with IBG), 2005. — 368 с.

Поступила в редакцию 3/IX 2018