

## УДК 622.1:528.74

Д.И. ГУЩА, ассистент кафедры «Маркшейдерского дела» (СФУ),  
И.Ю. БООС, ассистент кафедры «Маркшейдерского дела» (СФУ),  
Н.В. ЕРЕТНОВ ассистент кафедры «Маркшейдерского дела» (СФУ),  
Научный руководитель Ю.Л. ЮНАКОВ, к.т.н., профессор (СФУ),  
г. Красноярск

### **ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ БПЛА ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ СТРУКТУРНОГО КАРТИРОВАНИЯ ОТКОСОВ КАРЬЕРОВ И СРАВНЕНИЯ С РЕЗУЛЬТАТАМИ ПОЛУЧЕННЫМИ ДРУГИМИ МЕТОДАМИ**

В современном мире беспилотные летательные аппараты стали частью обыденной жизни. Такие системы широко применяются как в промышленности, так и в повседневности. Получаемые материалы с БПЛА мы используем для выполнения множества задач, таких как:

- получение обзорных фото- и видеоматериалов;
- проектирование наблюдательных станций;
- определение элементов залегания трещин при выполнении структурного картирования уступов;
- комплексное изучение откосов уступов карьеров;
- создание топографических планов различной сложности.

В настоящее время нами выполняется большой объем работ в области геомеханики. Полевые работы при выполнении структурного картирования часто сопровождаются повышенным риском для специалиста. Вследствие этого мы начали внедрять аэрофотосъемку для получения данных структурного картирования.

Использование аэрофотосъемки вместо выполнения замеров горным компасом позволяет избежать таких недостатков, как:

- опасность выполнения работ (специалисту приходится находиться в непосредственной близости от откоса уступа);
- трудоёмкость полевых работ;
- человеческий фактор при производстве измерений;
- необходимость вести «в поле» большое количество абрисов, схем, зарисовок, записей;
- невозможность в полной мере охватить весь откос уступа по высоте;
- ограниченное количество замерных станций;
- малое количество измерений на станциях, которого недостаточно для качественного статистического анализа;
- трудоёмкость камеральной обработки данных;
- невозможность быстрого получения результата, что делает прогнозирование устойчивости неактуальным.

Однако самоочевидно, что все новые методики всегда требуется проверять на практике и сравнивать с уже существующими способами выполнения того или иного вида работ. Проведем сравнение следующих способов:

- съемка горным компасом и рулеткой;
- съемка электронным тахеометром;
- съемка по данным наземной фотограмметрии;
- съемка по данным аэрофотосъемки с БПЛА.

Основным экспериментальным участком стала юго-западная часть борта карьера золоторудного месторождения «Эльдорадо». На участке откоса были пронумерованы видимые поверхности трещин; вместе с тем на некоторых, хорошо видимых «контрольных» плоскостях были нанесены «марки» по вершинам треугольника. Эти треугольники определяют плоскость трещины. После этого на участке были выполнены вышеперечисленные виды работ.

1. Съёмка горным компасом выполнялась после введения поправок на магнитное склонение и сближение меридианов:

$$\Delta\alpha = (\pm\delta) - (\pm\gamma) \quad (1)$$

где  $\delta$  – поправка за магнитное склонение ( $+4^\circ30'$  для данного района);  
 $\gamma$  – поправка за сближение меридианов ( $+0^\circ20'$ ).

$$\Delta\alpha = 4^\circ10'$$

Натурная съемка трещиноватости выполнялась по каждой доступной макротрещине, имеющей обнаженную поверхность. Замер элементов залегания «контрольных» плоскостей производился в контурах намеченных треугольников (рисунок 1).



Рисунок 1. Участок подготовленной замерной станции

2. Съёмка электронным тахеометром осуществлялась только по «контрольным» плоскостям (см. рисунок 2).

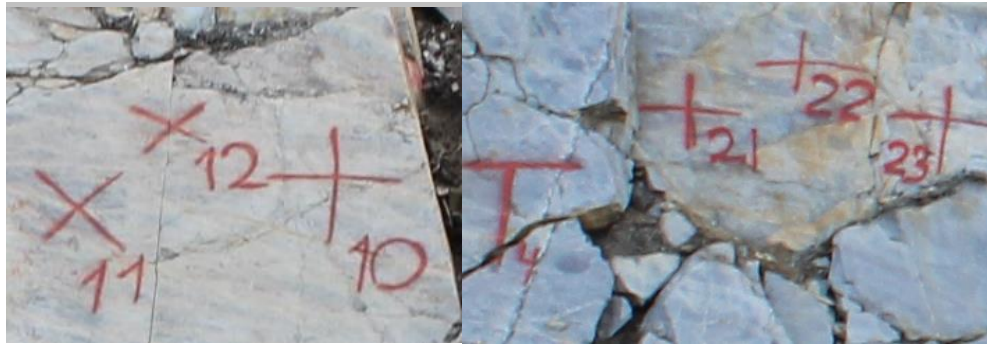


Рисунок 2. Контрольные плоскости

3. Съёмка методом «наземной» фотограмметрии производилась с помощью цифровой фотокамеры Canon EOS 600 D с разрешением 5184x3456 и объективом с фокусным расстоянием 18 мм. Съёмка была выполнена по методическим рекомендациям компании Data Mine для обработки в ПО «Sirovision». В результате нами было получено несколько стереопар экспериментального участка (см. рисунок 3). Привязка стереопар осуществлялась по «маркам», нанесенным на откос ранее.



Рисунок 3. Левый и правый снимки стереопары

4. Съёмка экспериментального участка с помощью БПЛА осуществлялась квадрокоптером DJI PHANTOM 4 с установленной на него системой ТЕОКИТ производителя TEODRONE® Для получения необходимой детализации съёмка выполнялась при положении камеры перпендикулярно откосу, на расстоянии не более 30 м от откоса.

По результатам съёмки в программной среде Agisoft Metashape была построена детальная 3D-модель участка с разрешением не более 0.5 см/пиксель. На полученной модели экспериментального участка выделены все видимые трещины, имеющие открытые поверхности, включая «контрольные» (см. рисунок 4).





Рисунок 4. Выделение плоскостей трещин

Угол падения и простирания каждой поверхности ослабления, выделенной на 3D-модели участка и заданной характерными тремя точками, не лежащих на одной прямой, определялись методами аналитической геометрии.

Результаты выполненных работ сведены в таблице 1. Диаграммы трещиноватости приведены на рисунке 5.

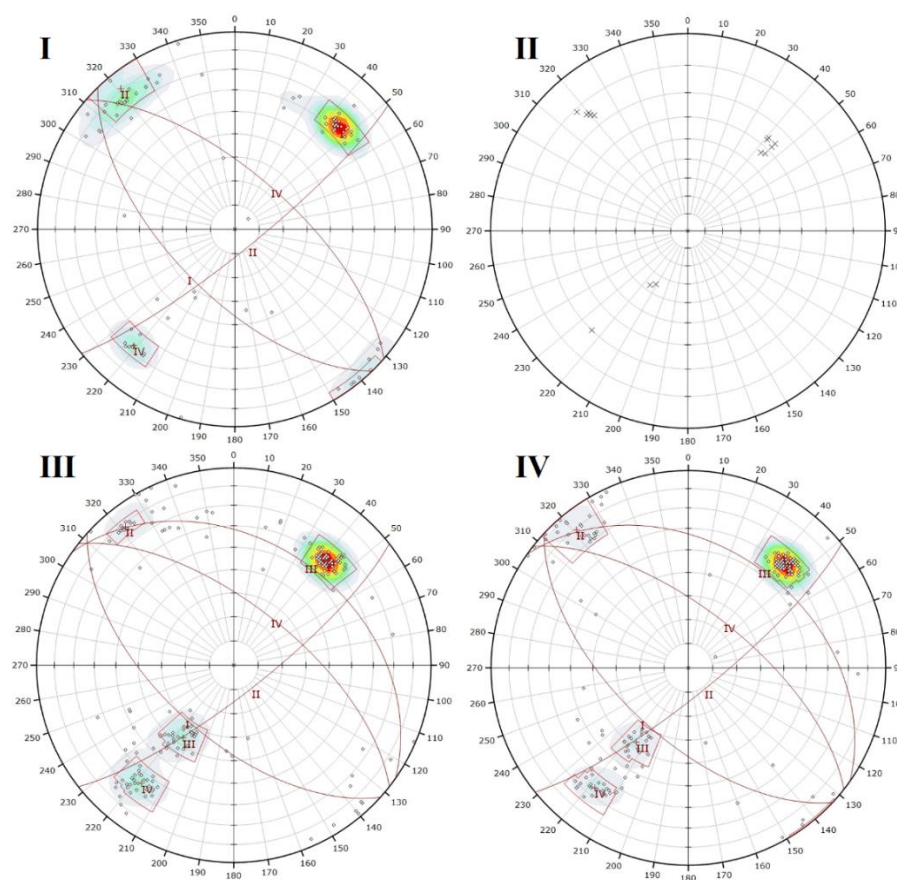


Рисунок 5. Диаграммы трещиноватости по результатам съемки:

I – горным компасом; II – электронным тахеометром;  
III – методом наземной фотограмметрии; IV – с использованием БПЛА

Таблица 1 – Элементы залегания контрольных плоскостей

№ к/п	Тахеометр		Горный компас		Фотоаппарат		Квадрокоптер	
	Угол падения $\delta$ , град	Азимут падения $\alpha$ , град	Угол падения $\delta$ , град	Азимут падения $\alpha$ , град	Угол падения $\delta$ , град	Азимут падения $\alpha$ , град	Угол падения $\delta$ , град	Азимут падения $\alpha$ , град
1	62	45	59	49	62	45	62	45
2	74	321	74	317	75	320	76	321
3	76	320	74	316	76	320	73	322
4	57	43	54	47	59	42	58	43
5	63	41	60	46	63	41	62	41
6	58	45	55	41	59	46	58	45
7	64	45	60	50	64	45	64	46
8	35	211	31	213	36	212	35	210
9	37	215	33	210	38	214	37	215
10	70	224	67	220	70	225	69	224
11	64	41	61	43	63	41	64	41
13	75	320	72	318	74	320	75	322
14	79	317	76	314	79	316	79	316
15	76	319	72	320	75	319	74	322

Анализ точности результатов измерений производился путем сравнения данных, полученных различными методами и выявлением среднего значения всех способов. Итог представлен в таблице 2 и графиках на рисунках 6 и 7.

Таблица 2. Сравнение значений, полученных каждым методом  
(со средним значением)

№ к/п	Тахеометр		Горный компас		Фотоаппарат		Квадрокоптер	
	$\Delta\delta$ , град	$\Delta\alpha$ , град	$\Delta\delta$ , град	$\Delta\alpha$ , град	$\Delta\delta$ , град	$\Delta\alpha$ , град	$\Delta\delta$ , град	$\Delta\alpha$ , град
1	0.8	-1	-2.3	3	0.8	-1	0.8	-1
2	-0.8	1.3	-0.8	-2.8	0.3	0.3	1.3	1.3
3	1.3	0.5	-0.8	-3.5	1.3	0.5	-1.8	2.5
4	0	-0.8	-3	3.3	2	-1.8	1	-0.8
5	1	-1.3	-2	3.8	1	-1.3	0	-1.3
6	0.5	0.8	-2.5	-3.3	1.5	1.8	0.5	0.8
7	1	-1.5	-3	3.5	1	-1.5	1	-0.5
8	0.8	-0.5	-3.3	1.5	1.8	0.5	0.8	-1.5
9	0.8	1.5	-3.3	-3.5	1.8	0.5	0.8	1.5
10	1	0.8	-2	-3.3	1	1.8	0	0.8
11	1	-0.5	-2	1.5	0	-0.5	1	-0.5
13	1	0	-2	-2	0	0	1	2
14	0.8	1.3	-2.3	-1.8	0.8	0.3	0.8	0.3
15	1.8	-1	-2.3	0	0.8	-1	-0.3	2
$\Sigma/n$	0.8	0	-2.2	-0.3	1	-0.1	0.5	0.4

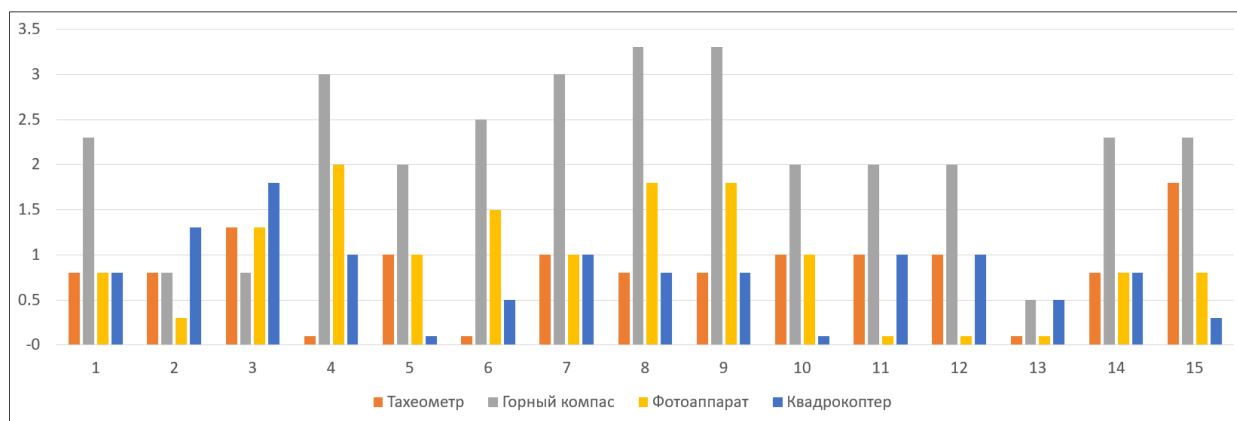


Рисунок 6. График отклонений углов падения от средних значений

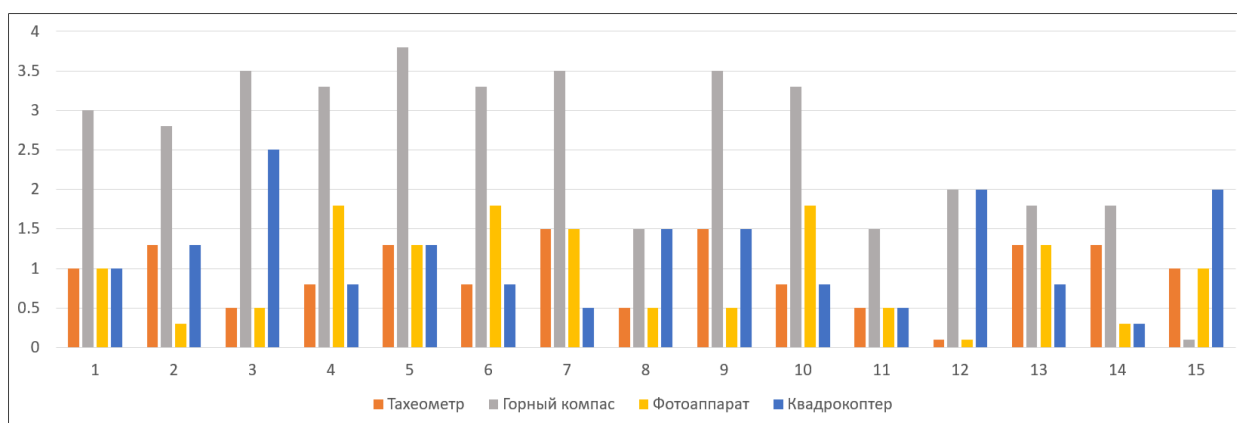


Рисунок 7. График отклонений азимутов падения от средних значений

При анализе таблиц 1, 2 и графиков, представленных на рисунках 6 и 7, можно сделать вывод, что максимальное расхождение значений единичных («контрольных») замеров наблюдается у значений, полученных горным компасом. Оно достигает  $\approx 4^\circ$  по углу падения и азимуту простирания. В то же время отклонение значений элементов залеганий, полученных методами фотограмметрии и тахеометрической съемки, от средних показателей достигает меньших значений  $\approx 2^\circ$ , что говорит о хорошей сходимости данных.

Кроме определения параметров залегания отдельных трещин был проведен анализ сходимости параметров систем трещин, выделяемых по совокупности всех зафиксированных поверхностей ослабления. Результаты замера трещиноватости по представленным методам сведены в таблице 3 и на рисунке 7.

Таблица 3. Параметры систем трещин, полученные различными методами

Система трещин	Параметр	Классический метод (горный компас)	По 3D модели построенной с помощью БПЛА	По 3D модели построенной с помощью наземной стереосъемки
I	Азимут падения	46	43	42
	Угол падения	63	61	60
II	Азимут падения	324	321	322
	Угол падения	81	79	78
III	Азимут падения	-	215	215
	Угол падения	-	38	37
IV	Азимут падения	221	218	218
	Угол падения	68	66	65

По результатам анализа рисунка 5 и таблицы 3 можно сделать вывод, что расхождения элементов залегания систем трещин сопоставимы с расхождениями единичных замеров, которые представлены выше.

По диаграммам трещиноватости, построенным по результатам массового замера, можно сделать следующий вывод. По данным, полученным с помощью горного компаса, выделяются 3 системы трещин, в то время как методы цифровой фотограмметрии (наземной и с применением БПЛА) позволяют выделить четыре системы. Это связано с тем, что некоторые плоскости недоступны для съемки горным компасом (вследствие ограниченности исполнения съемки по высоте и опасности выполнения работ), в то время как цифровые 3D-модели обеспечивают более полную съемку откоса.

По результатам проведенного исследования сделаны выводы о сходимости характеристик структурно-тектонических особенностей, получаемых по 3D-модели, построенной с применением БПЛА, с результатами, полученными другими известными методами.

Это позволяет сделать вывод о том, что на производстве возможно успешное использование БПЛА для выполнения структурного картирования. Данный метод позволяет производить структурную съемку откосов, избегая недостатков других способов и используя следующие преимущества такой съемки:

- высокая производительность (на съемку среднего карьера уходит не более часа полевых работ);
- безопасность проведения работ;
- возможность более полного изучения структурных особенностей прибортового массива и статистической обработки результатов измерений;
- более простая и точная плановая привязка измерений;

- возможность замера трещиноватости в труднодоступных участках.

Из недостатков рассматриваемого способа следует отметить следующие: для эффективного использования предлагаемой методики необходимо наличие мощной вычислительной техники; существует сложность определения элементов залегания трещин, не имеющих открытых поверхностей; 3D-модель не позволяет определять такие параметры как шероховатость и выветренность стенок трещин, а также вид и прочность заполнителя.

#### Список литературы:

1. Боос И.Ю., Юнаков Ю.Л., Патачаков И.В., Гришин А.А. Изучение структурных особенностей прибортового массива по 3D-модели откоса, построенной с применением мультикоптера // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 12. – С. 19–30.
2. А.Б. Макаров, Д. Пржедецкий, Э. Хормазабаль, И.С. Ливинский. Методика обратного анализа сцепления и трения по трещинам на основании событий разрушения с бортов карьера// Австралийский журнал по безопасности на шахте. 2019. 95-98 с.
3. А.Б. Макаров, Э. Хормазабаль, И.С. Ливинский, В.И. Спиринов, И.О. Солуянов. Методика обратных расчетов сцепления и трения по трещинам по фактам вывалов с бортов карьеров // Сборник научных трудов «Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий». 2017. 166-172 с.
4. Руководство по проектированию бортов карьера / П. Стейси и др.; под. ред. Дж. Рида, П. Стейси; пер. с англ. А.С. Бентхен. — Екатеринбург: Правовед: Полиметалл, 2015. - 528 с.
- Guidelines for open pit slope design / P. Stacey and others; edited by John Read, P. Stacey; translated from English A.S. Bentkhen. — Ekaterinburg: Pravoved: Polimetall. 2015. - 528 p.
5. Фисенко Г.Л. Методические указания по определению углов наклона бортов, откосов уступов и отвалов строящихся и эксплуатируемых карьеров/ Г.Л. Фисенко, В.Т. Сапожников, А.М. Мочалов, В.И. Пушкарёв, Ю.С. Козлов. – Л.: ВНИМИ, 1972. – 164 с.
6. Фисенко Г.Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов // Москва «Недра». 1965. 367 с.
7. ФНИП в области промышленной безопасности «Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов» от 18.12.2020 № 61603: Приказ Ростехнадзора от 18 декабря 2020 года N 439.