

УДК 622.271.333

**МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ОТКОСА БОРТА КАРЬЕРА МЕЛЬБУР
ПРИ ДОБЫЧЕ КАОЛИНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Э. Манда-Мвула¹, Р. Б. Каунда²

¹Университет Конпербелт, а/я 21962, г. Китве, Замбия

²Колорадская горная школа, E-mail: rkaunda@mines.edu,
1500, штат Иллинойс, г. Голден, Колорадо, США

Проведена оценка устойчивости откоса борта карьера Мельбур по добыче каолина в Корнуолле (Великобритания) с использованием цифровых технологий. В целях повышения полноты и достоверности получаемых данных в условиях большой нарушенности горных пород обосновано применение трех методов оценки состояния откосов бортов карьера: лазерное 3D-сканирование, фотограмметрия, пакет программного обеспечения Split FX. Лазерное 3D-сканирование применяется при изучении структур откоса борта карьера, фотограмметрия — для получения снимков, используемых при обработке данных, и последующего визуального представления откоса. Показано, что комплексный подход обеспечивает более качественную оценку структурных нарушений сплошности и их ориентации в прибортовом массиве горных пород, а использование новейших цифровых технологий позволяет сформировать полную и достоверную базу данных для анализа устойчивости откоса во время проведения на карьере работ по добыче.

Фотограмметрия, лазерное 3D-сканирование, борт карьера, устойчивость откоса, структурные данные, кинематический анализ

DOI: 10.15372/FTPRPI20190113

Зоны значительных геологических нарушений на открытых горных работах с включением, например, сапролитов, каолинизированного гранита и других разностей создают проблемы для обеспечения безопасности и вызывают трудности при ведении горных работ из-за неустойчивости уступов и бортов карьера [1 – 5]. Для характеристики горных пород в сильно деформированных откосах бортов карьера необходимо применение новейших технологий и методов для оценки их состояния. Инновационные технологии, такие как дистанционное измерение, фотограмметрия в высоком разрешении, воздушные и наземные лазерные интерферометры для определения локализации, а также применение беспилотных летательных аппаратов способствуют улучшению сбора натурных данных для исследования устойчивости откоса. В [6] проведены исследования по применению лазерного наземного сканирования для описания и наблюдения за горным склоном. Показано, что лазерное сканирование более полно, точно и быстро собирает информацию о местности в трехмерном формате, что делает последующую обработку более эффективной. Отмечено, что использование наземного лазерного сканирования с большой точностью способствует определению динамических характеристик склона в количественном анализе при расчете скорости обрушения породы по всей ширине склона и в пространственно-временном моделировании его деформации. Основные трудности в при-

менении наземного лазерного сканирования заключаются в обосновании фрактальных особенностей поверхности горного склона и определении начальной деформации для прогноза потенциальных обрушений [6].

В [7] с помощью камеры для картографирования получены аэрофотоснимки высокого разрешения для определения неустойчивости откоса преимущественно глинистых горных склонов Вустершира (Великобритания). Используя такие методы обработки аэроснимков, как создание композитных изображений, термография и улучшение текстуры снимка, в процессе исследования удалось с точностью до 83 % определить стабильные и нестабильные склоны. Используя беспилотный летательный аппарат (БПЛА), получены видеоизображения для создания облака точек на основе способа определения структуры объекта по отображению движения его элементов, необходимые для характеристики откосов бортов карьеров в Канаде [8]. В результате исследований удалось охарактеризовать такие особенности, как пространственные ориентации трещин. С помощью наземного лазерного сканирования [9] в течение 5 лет наблюдали за участком отвесной скалы в районе острова Рюген (Германия). Снимки скалы в высоком разрешении, включая распространение оползней, пространственно-временные изменения и количественное представление объемов породы, позволили обосновать процесс эрозии и нестабильности откоса. В [10] использовали БПЛА и фотограмметрическую технику для построения цифровых моделей поверхности двух железорудных карьеров в Китае. Удалось выделить их геоморфные особенности, включая ориентированность по длине, форму и размеры уступов.

Наземное лазерное сканирование с разных точек для кинематического анализа и анализа неустойчивости проведено на карьере Мельбур в Корнуолле [3]. Использованы сводные данные для проектирования схемы взрывных работ с целью снижения рисков, связанных с 26-метровым уступом, путем уменьшения углов его откоса. Для анализа возможных способов смягчения последствий при выполнении взрывных работ на карьере Мельбур применены данные наземного лазерного сканирования и техника фотограмметрии для исследования механизмов, влияющих на неустойчивость откоса его бортов [11]. На основе системы классификации горных массивов, разработанной [12, 13], удалось установить, что прямое и клиновидное обрушения бортов являются потенциальными механизмами при сползании откоса северо-восточного борта карьера Мельбур.

Полный и систематизированный сбор структурных и геологических данных служит основой для проектирования устойчивого откоса борта карьера и анализа его состояния. На протяжении долгих лет горное дело переживало множество трудностей в плане сбора структурных данных, связанных с откосом бортов карьера, при использовании традиционных методов картографии, таких как компас Брантона и измерительные ленты [14]. Эти методы не только трудоемки и опасны для работников, но также необъективны и трудозатратны. В условиях возрастающих требований к безопасности открытых горных работ для инженеров-технологов несомненный интерес представляет упреждающий мониторинг бортов карьеров.

В настоящей работе представлено подтверждение целесообразности использования лазерного 3D-сканирования, фотограмметрии и пакета программ Split FX [15] с целью получения структурных данных и анализа устойчивости откоса на сильно деформированных участках. Данное исследование основано на длительном мониторинге описанной ситуации на карьере Мельбур в Корнуолле [16].

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводилось неподалеку от производственной зоны компании “Imerys” в центральном Корнуолле, на карьере Мельбур, расположенном к северо-западу от Сент-Остелла. Добываемый материал известен как белая глина (каолин). Свое название он получил

от названия местности в Китае, где впервые был обнаружен и начал использоваться более 10 тыс. лет назад в изготовлении тонкого белого фарфора. Белая глина — продукт преобразования гранита вследствие взаимодействия грунтовых вод и минералов полевого шпата с образованием каолинита. Каолинизированные участки в граните имеют воронкообразную или желобообразную форму на поперечном срезе, широкую на поверхности и сужающуюся внизу. Некоторые каолинитовые образования отличаются достаточно большой протяженностью и глубиной залегания, с основанием, уходящим вглубь более чем на 300 м от поверхности. Каолинизированный гранит более рыхлый и в целом более мягкий, чем неизменная порода, состоит преимущественно из кварца или слюды, полевого шпата и каолинита. В Корнуолле сконцентрировано пять крупных образований (плутонов) гранита и множество меньших по размеру скоплений обнаженных пород, берущих начало в крупных залежах. Запасы белой глины обнаруживаются на трех из пяти крупных залежей гранита — на мысе Лэндс-Энд, Хенсбарроу (север Сент-Остелла) и Бодмин-Мур, а также в малых залежах в Годольфин/Трегоннинг-Хилл и деревне Белауда, как показано на рис. 1 [17]. Месторождения в Сент-Остелле считаются одними из крупнейших мире, а карьер Мельбур — действующим карьером по добыче белой глины на месторождении с высокими уровнями каолинизации.



Рис. 1. Гранитные скопления обнаженной породы и области каолинизации на юго-западе Англии (предоставлено ECC Int. Ltd, 1991)

МЕТОДЫ СБОРА ДАННЫХ

Все три метода сбора структурных данных рассматриваются согласно их ключевым возможностям на отдельных участках разработки.

Лазерное 3D-сканирование завоевало популярность в горной промышленности в силу высокой точности, достоверности и скорости, что является преимуществом по сравнению с использованием традиционных способов точечного измерения с применением ручных инструментов — компаса или рулетки [18–23]. Метод лазерного 3D-сканирования позволяет полу-

чить пространственные данные при помощи лазерного луча. Существуют различные виды сканирующих устройств, работа которых основана на одном и том же принципе лазерного дальномера (ЛИДАР).

Каждое сканирование занимает всего лишь несколько минут с высокой частотой семплирования (тысячи точек в секунду) и способно обработать сотни квадратных метров с оптимальной разрешающей способностью [24]. Сканер записывает большое количество цифровой информации о трехмерных параметрах объекта, таких как форма, место на плоскости и пространственное расположение. Каждая точка сканирования может описываться четырьмя параметрами: широта, долгота, уровень возвышения и интенсивность отраженного излучения. Некоторые лазерные сканеры способны передавать информацию в цветном формате (R, G, B) посредством одновременного использования цифрового фотографирования. Расстояние между точками может измеряться с точностью до миллиметра, так как каждая точка имеет координаты.

Перед проведением сканирования обозначаются цели и осуществляется привязка к местности. Затем проводится сканирование участков, представляющих интерес для исследования при создании полного и подробного рельефа поверхности в форме трехмерного точечного облака, состоящего из миллионов точек, содержащих информацию (рис. 2). Точечное облако разбивается на три секции 1, 2 и 3 с целью уменьшения размера для дальнейшего анализа в программе Split FX.

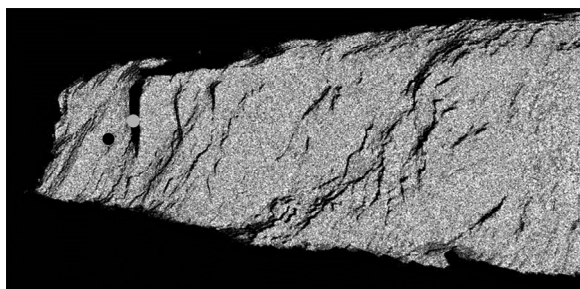


Рис. 2. Точечное облако 1, содержащее 2 680 302 точки, полученное с помощью лазерного сканера

Фотограмметрия — быстрый и простой способ картографирования в трехмерном формате, в основе которого лежит использование фотоснимков в качестве средства для измерений. Фундаментальная основа фотограмметрии — триангуляция. При помощи фотоснимков, сделанных с двух различных местоположений, визирные линии математически пересекаются, образуя координаты любой интересующей точки в трех измерениях [25]. Фотографии и полученные координаты контрольных точек в пределах области изображения являются единственным видом получаемых натурных данных. Контрольные точки и точки привязки определяются при помощи наложения фотографий. Различные контрольные точки имеют отличительные особенности на поверхности горных пород. При отсутствии визуального контакта с последними, могут использоваться отмеченные или восстановленные точки (рис. 3).

Программа Split FX — это инструмент программного обеспечения для визуализации, исследования и работы с данными по горным массивам в двухмерном и трехмерном формате, полученными при помощи лазерного сканирования и техники цифрового формирования изображений с целью извлечения и анализа данных о нарушениях сплошности [26–28]. Программа предназначена для работы с облаком точек для описания характеристик горных пород. В нее легко можно импортировать 3D-облако точек в следующих форматах: файлы двухмерных изображений с расширениями .tiff и .jpeg, 3D-файлы с расширениями .xyz (ASCII в форме то-

чечного облака), с пользовательским форматом .fx для структурированных файлов (коллекция изображений в виде координатного облака, изображения и/или стереографическая сетка). Текстовые файлы с расширениями .txt и .dat могут быть открыты программой Split-FX. Данный программный инструмент позволяет загружать, обрабатывать и анализировать любое необходимое количество координатных облаков и изображений. Для хранения входных данных используется папка “region”.



Рис. 3. Геодезические ориентиры, используемые в качестве контрольных точек (отмечены белыми кружками) в районе западного борта карьера Мельбур

Программа воссоздает загруженное точечное облако и генерирует модель поверхности, уменьшая размер файла и позволяя просматривать изображения, а также осуществляет компьютерный анализ. Создание поверхности обычно происходит при помощи построения нерегулярной триангуляционной сети. Параметры, используемые для преобразования облака координат в сеть, имеют важное значение при построении поверхности горного массива. К этим параметрам относятся количество точек в треугольнике и интервалы между ними. Минимум три точки с координатами позволяют точно определить треугольную грань в пределах сети. Для автоматического определения плоских поверхностей, на которых присутствует нарушение сплошности в породе, используется преобразование точечного облака в модель полигональной поверхности с последующей статистической группировкой смежных планарных многоугольников (в данном случае треугольников) в крупные плоскостные участки, представляющие собой независимые плоскости отдельностей [29]. Автоматическая обрисовка структурных несплошностей сети — это процесс, который контролируется тремя переменными: плотность поверхностной сетки, максимальный соседний угол и минимальный размер плоскости отдельности [29].

Оптимальное значение плотности поверхностной сетки может быть получено в процессе анализа количества поверхностей разрыва, автоматически рассчитываемом при различных значениях плотности. Важно определить минимальный размер плоскости отдельности. Чем меньше минимальный размер, тем больше искажений данных. Большой размер участка приведет к потере информации о смежных поверхностях в окончательных данных.

Фотоснимки, полученные в процессе фотограмметрии, далее прикрепляются к поверхности точечного облака для более точного расчета структурных данных, таких как впадины, направление впадин, интервалы, а также протяженность разрывов, видимых на поверхности породного массива. Каждая поверхность может быть классифицирована и индивидуально названа, что обеспечивает удобство при выборе различных групп нарушений сплошности. Установленные участки могут быть автоматически нанесены на стереосеть с данными о впадинах, их направлении и отнесены к определенной группе (рис. 4).

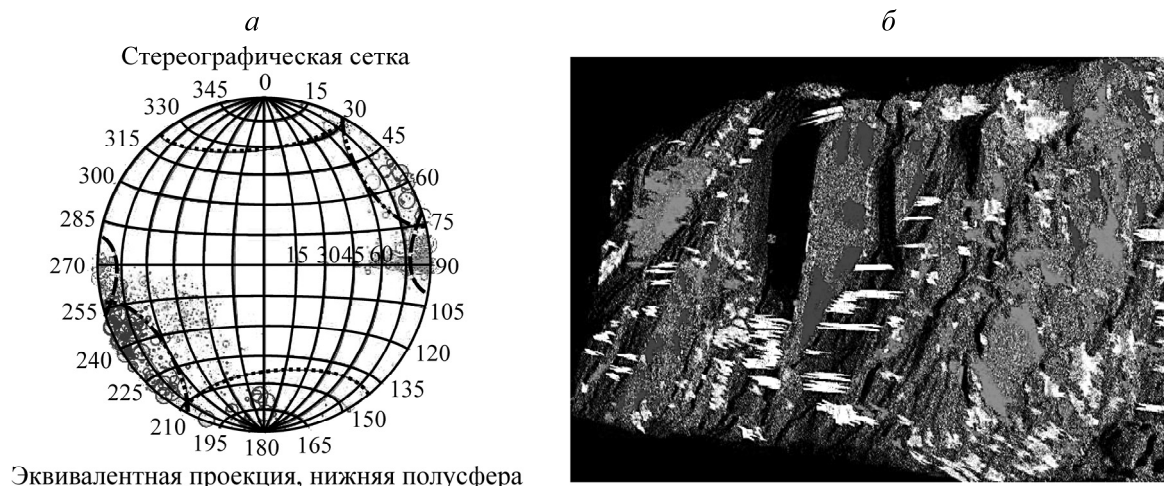


Рис. 4. Иллюстрация различных нарушений сплошности (а) в области откоса уступа карьера Мельбур с использованием образца снимка (б)

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Основная цель сбора структурных/геотехнических данных для проведения анализа устойчивости откоса бортов достигнута на основе цифровых технологий, в частности при помощи программы Split FX, лазерного 3D-сканирования и фотограмметрии. Используя точечное облако, созданное лазерным 3D-сканированием и наложением снимков, полученных в процессе фотограмметрии, программа Split FX определила пять отдельных систем трещин (путем автоматической и ручной обрисовки участков). Результаты работы приведены в таблице и представлены на рис. 5. Усовершенствованные цифровые технологии для сбора структурных данных имеют ряд преимуществ и потенциальное применение в горном деле.

Результаты определения систем трещин при помощи программы Split FX

Система трещин	Впадина, град	Направление впадины, град	Средний интервал, м	Средняя длина, м	Показатель шероховатости
1	83.9	090.0	1.03	4.0	1.000
2	81.4	060.1	5.00	2.5	1.004
3	75.4	004.8	1.12	4.0	1.081
4	79.9	309.1	1.74	7.0	1.000
5	19.6	266.5	2.00	5.0	1.000

Лазерное 3D-сканирование. Наиболее важное преимущество данного метода — достижение высокой плотности точек с разрешением порядка 5–10 мм. Форма исследуемого объекта или участка может быть смоделирована максимально точно в трехмерном формате, с высоким уровнем детализации. С помощью этого метода в идеальных условиях можно измерять объекты и участки на расстоянии около 200 м. Методика является достаточно быстрой: полное сканирование на 360° при использовании последних моделей сканирующих устройств может быть проведено менее чем за 4 мин. В качестве недостатка следует отметить невозможность доступа к трещинам, лежащим параллельно направлению сканирующего лазера либо находящимся в тени. В итоге — отсутствие этих трещин в точечном облаке. Помехи служат причиной того, что открытые поверхности могут быть не охвачены при наблюдениях с помощью единичной линии прямой видимости (рис. 6).

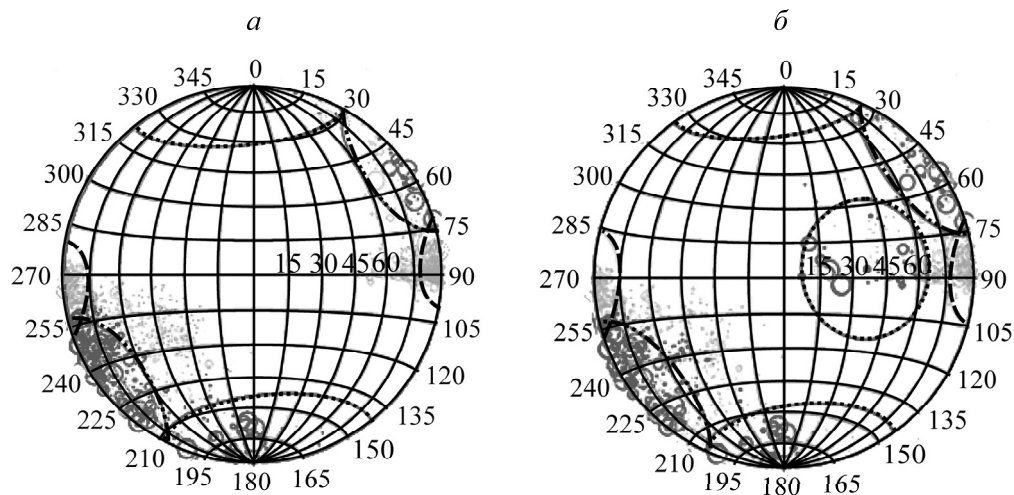


Рис. 5. Нарушения сплошности, полученные с помощью автоматической и ручной обрисовки на стереографической сетке, в результате чего обнаружены пять систем трещин: *а* — метод автоматической обрисовки; *б* — метод ручной обрисовки



Рис. 6. Сравнение фотографического снимка и снимка, полученного при помощи лазерного сканирования, демонстрирующее влияние помех — открытые поверхности могут быть не охвачены при наблюдениях с помощью единичной линии прямой видимости: *а* — затемнение при лазерном 3D-сканировании; *б* — реальное изображение

При помощи лазерного 3D-сканирования удастся получить большую базу данных точек с достоверными трехмерными координатами, которые можно просмотреть, но невозможно передать рельеф поверхности горных пород, что приводит к трудностям в определении неровностей откоса по точечному облаку. Другое ограничение лазерного 3D-сканирования заключается в том, что сбор характеристик предела прочности при признаках нарушения сплошности находится за пределами возможностей современного программного обеспечения. В результате при отсутствии таких инженерных данных невозможно установить действительный угол локализованной каолинизации гранита на некоторых участках, опираясь только на данные точечного облака.

Фотограмметрия. Снимки, полученные посредством фотограмметрии, отображают действительную структуру объекта, и неровности легко определяются с помощью программы Split FX. Эти изображения могут храниться в разных форматах и использоваться для проведения анализа в различных программах и компьютерных приложениях. Однако фотограмметрические изображения имеют некоторые ограничения в тех случаях, когда объект расположен перед отко-

сом борта карьера и проецируется на его поверхность. В подобной ситуации целесообразно делать снимки на открытых зонах уступа, с минимальным количеством помех в виде растительности и обломков породы. Каолинизированный гранит и обломки горных пород, встречающиеся на откосе борта карьера Мельбур, расположены в зоне нарушения сплошности, что также могло привести к искажениям на трехмерных изображениях.

Программа Split FX. Программное обеспечение Split FX направлено на более эффективный сбор информации и определение нарушений сплошности в горных породах. К достоинствам и преимуществам данного программного инструмента относятся:

- уменьшение времени полевых измерений и ручного картографирования;
- возможность получить данные в труднодоступных участках;
- быстрая обработка данных;
- расширение базы данных, касающихся нарушений сплошности;
- интерактивное отображение стереографической сетки и статистический анализ;
- возможность проведения совместного и самостоятельного анализа 2D- и 3D-изображений;
- усовершенствованное моделирование поверхности;
- построение 3D-моделей поверхности, полностью совместимых с автоматизированной системой проектирования CAD;
- инженерно-техническая поддержка;
- автоматическая обрисовка чертежей (рис. 7).

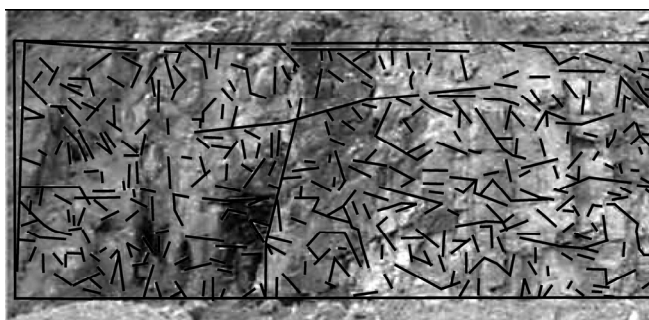


Рис. 7. Линии автоматической обрисовки трещин карьера Мельбур при помощи программы Split FX

Используя изображение, чертеж может быть обрисован автоматически и затем привязан к системе трещин, обозначенной на точечном облаке, с помощью полученной гистограммы (рис. 8). Сгруппированные данные вместе с данными ориентации можно экспортировать в папку впадины/направление впадин, а затем применить в любой геотехнической программе, например Dips [30]. Несмотря на то, что в программе Split FX содержится функция автоматической обрисовки, что может облегчить работу и сохранить много времени, существуют также некоторые ограничения. При автоматической обрисовке участков могут произойти потери данных о некоторых системах трещин, так как программа не способна распознавать горизонтальные структуры. В некоторых случаях программа Split FX ошибочно принимает нарушения сплошности на участках откоса карьера за плоскую поверхность. При проведении автоматической обрисовки для карьера Мельбур были определены всего три системы трещин: 1 ($84/081^\circ$), 4 ($88/308^\circ$) и 5 ($37/246^\circ$), еще две системы были упущены программой: 2 ($88/046^\circ$) и 3 ($76/359^\circ$), но впоследствии обнаружены при помощи ручной обрисовки. Эта проблема связана с тем, что программа использует структурную координатную сетку в формате 2.5D, а не 3D. В силу этих причин проведена ручная обрисовка участков, что заняло больше времени.

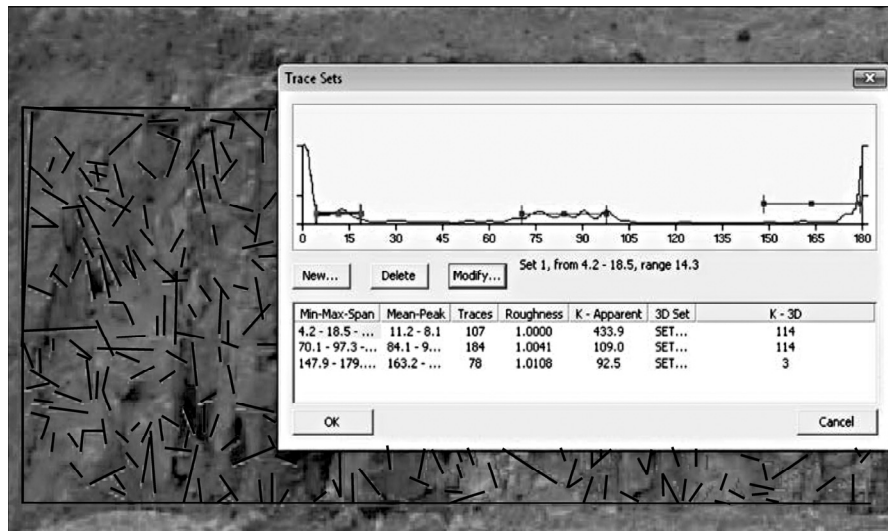


Рис. 8. Процедура обрисовки систем трещин

Построение сетки в программе Split FX в целом контролируется желаемым количеством точек, которые будут использоваться для построения ячеек сетки поверхности. Неплотная сетка может потеряться в области углов и границ и привести к неточностям в отображении. Слишком плотная сетка может исказить данные. При низкой плотности ячеек сетки генерируемая поверхность получается слишком упрощенной, а небольшие углы сглаживаются и теряются, таким образом могут быть потеряны важные данные. Преобразованные участки не отражают действительную информацию о нарушениях сплошности, потому что ориентация каждого треугольника в пределах сетки усреднена по отношению к нереалистично большой площади. И наоборот, если плотность ячеек сетки превышает оптимальные размеры, треугольники, представляющие топографию сопряженных участков, будут содержать искажения в силу неточности расположения точек и отсутствия усреднения. Следовательно, оптимальная сетка будет сгенерирована только при достижении обоснованных и приемлемых результатов.

Результаты низкой плотности ячеек сетки приведены на рис. 9 [27]. Еще одним недостатком Split FX является то, что данная программа не способна распознавать различные типы нарушения сплошности, например разломы, трещины, жилы или слоистости, что делает невозможным использование определенных структур в программах Rocscience, Dips. Однако при натурных наблюдениях, совместно с использованием фотограмметрии, этот недостаток может быть устранен.

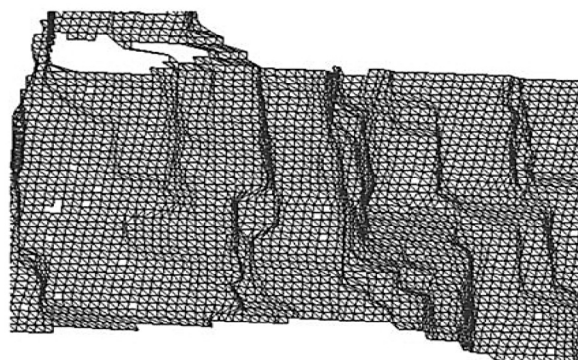


Рис. 9. Изображение, демонстрирующее низкую плотность ячеек сетки

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ, АНАЛИЗЕ И МОНИТОРИНГЕ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСА БОРТА КАРЬЕРА

Сбор и обработка данных, выполненных с помощью лазерного 3D-сканирования, фотограмметрии и программы Split FX, существенно улучшились по сравнению с традиционными методами, используемыми при разработке карьера Мельбур. Внедрение новейшей технологии по сбору и анализу данных значительно усовершенствовало исследование устойчивости борта карьера. Одно из преимуществ применения данных технологий — возможность охватить большую территорию с получением более объективных данных в сравнении со способом картографирования [31]. Этот способ, как и другие традиционные методы, является субъективным, занимает много времени и возможен только на легкодоступных участках борта карьера (рис. 10).

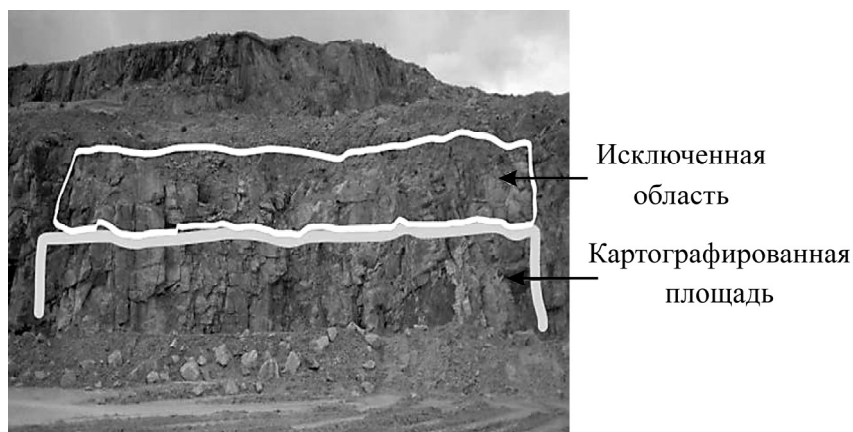


Рис. 10. Исследуемая область откоса уступа карьера (отмечена жирной линией) и участок, на котором применяются традиционные методы картографирования (отмечен белой линией)

При осуществлении фотограмметрии и лазерного 3D-сканирования можно охватить весь борт карьера и получить точные и достоверные данные. Благодаря тому, что применяемая методика оказалась несложной, ее использовали непосредственно на месте разработки карьера Мельбур. Программа Split FX способна обрабатывать данные, полученные при лазерном 3D-сканировании и фотограмметрии, поэтому процесс обработки проходит достаточно быстро. Следует заметить, что на фоне уменьшающегося количества квалифицированных горных инженеров применение менее трудоемкой технологии лазерного 3D-сканирования и фотограмметрии будет способствовать совершенствованию горного производства. Использование новейших технологий поможет также в предварительном определении зон каолинизации (геологических изменений), областей возможных разрушений и участков, требующих постоянного наблюдения.

Фотограмметрия оказалась быстрым, надежным и точным способом измерения по сравнению с традиционными инструментами, такими как эктензометры и измерительные ленты. Упреждающий мониторинг и анализ данных с применением эффективной коммуникации значительно улучшили безопасность персонала и оборудования, расположенного в районе борта карьера Мельбур. Быстрое и раннее обнаружение деформаций и потенциальных зон разрушения способствовали проведению работ по стабилизации откоса и прогнозированию непредвиденных ситуаций. К недостаткам, связанным с применением рассмотренных технологий, можно отнести высокую стоимость оборудования и расходы на его эксплуатацию, а также влияние человеческого фактора при работе с техникой, например ошибки при геопривязке, что может привести к некорректности итоговых данных.

ВЫВОДЫ

Комплексное использование цифровых технологий при ведении открытых горных работ в сравнении с традиционными методами дает значительные преимущества и совершенствует процесс картографирования поверхности откоса бортов карьера. В результате исследований с помощью трех цифровых технологий (лазерное 3D-сканирование, фотограмметрия и пакет программ Split FX) получены обширные структурные данные, включающие нарушения сплошности, трещины, расстояния между трещинами, впадины и их протяженность, направление и устойчивость. На этой основе создана большая база данных по карьере Мельбур, которая использовалась в качестве исходной в системе программ Rocscience, включая Dips, Swedge и др.

Применение цифровых технологий значительно повышает возможности инженерного персонала, обеспечивая их структурными данными об откосе борта карьера без риска оказаться в зоне обрушения породы. Разработаны рекомендации, касающиеся применения цифровых технологий. Для получения высоких результатов, наряду с приведенным способом при сборе структурных данных, должны использоваться и другие методы, такие как бурение прибортового массива с отбором образцов породы. Кроме того, необходим четко осуществляться контроль, а геопривязка выполняться при помощи лазерного 3D-сканирования и программы Split FX. Трудности, связанные с недоступностью некоторых участков откоса и возможные ошибки при лазерном 3D-сканировании могут быть решены при помощи многократного сканирования.

Авторы выражают благодарность доктору Дениз Пэскоу из Эксетерского университета за поддержку, ценные советы во время работы над статьей, а также большую признательность компании “Imerys Mine” за предоставление доступа на территорию месторождения Мельбур. Точка зрения, комментарии и заключение, представленные в данной работе, принадлежат исключительно авторам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Aydin A.** Stability of saprolitic slopes: nature and role of field scale heterogeneities, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2006, Vol. 6, No. 1. — P. 89–96.
2. **Hernandez C.** An updated geological model of the Carlin Formation for slope stability purposes at the Gold Quarry mine, Eureka County, NV, PhD thesis, 2015.
3. **Keverne B., Howe J., Pascoe D., Eyre M., and Coggan J.** Remediation of a hazardous legacy slope face using pre-split blasting, *Proc. of ISRM Regional Symp. EUROCK*, 2015.
4. **Reid M. E., Sisson T. W., and Brien D. L.** Volcano collapse promoted by hydrothermal alteration and edifice shape, *Mount Rainier, Washington, Geol.*, 2001, Vol. 29, No. 9. — P. 779–782.
5. **Sheets R. J., Douglas S. J., St Louis R. M., and Bailey J. A.** Remediation of large-scale slope failures and impact on mine development at the Gold Quarry Mine, *Min. Eng.*, 2014, Vol. 66, No. 11. — P. 57–71.
6. **Abellan A., Oppikofer T., Jaboyedoff M., Rosser N. J., Lim M., and Lato M. J.** Terrestrial laser scanning of rock slope instabilities, *Earth Surf. Processes Landforms*, 2014, Vol. 39, No. 1. — P. 80–97.
7. **Whitworth M. C. Z., Giles D. P., and Murphy W.** Airborne remote sensing for landslide hazard assessment: a case study on the Jurassic escarpment slopes of Worcestershire, UK, *Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol.*, 2005, Vol. 38, No. 3. — P. 285–300.
8. **McLeod T., Samson C., Labrie M., Shehata K., Mah J., Lai P., Wang L., and Elder J. H.** Using video acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV) to measure fracture orientation in an open-pit mine, *Geomatica*, 2013, Vol. 67, No. 3. — P. 173–180.
9. **Kuhn D. and Prufer S.** Coastal cliff monitoring and analysis of mass wasting processes with the application of terrestrial laser scanning: A case study of Rugen, Germany, *Geomorphol.*, 2014, Vol. 213. — P. 153–165.
10. **Chen J., Li K., Chang K. J., Sofia G., and Tarolli P.** Open-pit mining geomorphic feature characterisation, *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinform.*, 2015, Vol. 42. — P. 76–86.

11. **Gandhi G. D. K.** Slope instability analysis of the north-east slope of the Melbur pit comprised of Kaolinised-granite based on the laser scanned data acquired post a trial blast. PhD. Thesis, Camborne School of Mines, University of Exeter, Cornwall, UK, 2016
12. **Hencher S. R. and Martin R. P.** The description and classification of weathered rocks in Hong Kong for engineering purposes, Proc. of 7th Southeast Asian Geotechnical Conference, Hong Kong, 1982, Vol. 1. — P. 125–142.
13. **Wyllie D. and Mah C.** Rock slope engineering: civil and mining fourth ed, NY, Spoon Press, 2004. — 431 p.
14. **Van der Merwe J. W. and Andersen D. C.** Applications and benefits of 3D laser scanning for the mining industry, J. S. Afr. Inst. Min. Metall., 2013, Vol. 113, No. 3. — P. 213–219.
15. **Split Engineering LLC**, Split FX user manual, version 2.1 Tucson, AZ, <http://spliteng.com>, 2007.
16. **Pascoe D. M.** Geostatistics applied to probabilistic slope stability analysis in the China clay deposits of Cornwall, PhD Thesis, University of Exeter, Camborne School of Mines, 1996.
17. **Coggan J. S. and Pascoe D. M.** Melbur pit images, Personal Communication, 2014.
18. **Adami A., Guerra F., and Vernier P.** Laser Scanner and architectural Accuracy, Proc. of 21st Int. CIPA Symp., Athens, Greece, 2007.
19. **Haneberg W. C., Norrish N. I., and Findley D. P.** Digital outcrop characterization for 3-D structural mapping and rock slope design along interstate 90 near Snoqualmie Pass, Washington, Proc. of 57th Annual Highway Geology Symp., Breckenridge, CO, 2006. — P. 146–160.
20. **Kwong A. K. L., Kwok H., and Wong A.** Use of 3D laser scanner for rock fractures mapping, Hong Kong SAR, China, 2007.
21. **Nicholas D. E. and Sims D. B.** Collecting and using geologic structure data for slope design, In Hustrulid, McCarter and Van Zyl (eds), Slope Stability in Surface Mining, 2001. — P. 11–26.
22. **Olaleye B. M. and Jegede G.** Investigation of the stability of alaguntan limestone quarry face, Southwestern Nigeria, Mineral Wealth Journal, 2006, No. 141. — P. 9–14.
23. **Vicki S.** Integration of Technology in slope management programs, SME Annual Meeting, Salt Lake City, UT, 2005.
24. **Feng Q.** Novel methods for 3-D semi-automatic mapping of fracture geometry at exposed rock faces, Ph.D. Thesis, Division of Engineering Geology, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, ISBN 91-7283-113-8., 2001.
25. **Feng Q., Anders B., and Stephansson O.** Fracture mapping at exposed rock faces by using close-range digital photogrammetry and geodetic total station, Proc. of 38th U.S. Rock Mechanics Symp., Washington D. C., 2001.
26. **Kemeny J., Turner K., and Norton B.** LIDAR for rock mass characterization: hardware, software, accuracy and best-practices. In: ToNon F, Kottenstette J. (eds), Laser and Photogrammetric Methods for Rock Face Characterization, 2005. — P. 49–61.
27. **Kemeny J., Henwood J., and Turner K.** The use of ground-based LiDAR for geotechnical aspects of highway projects, Proc. of 57th Annual Highway Geological Symposium, Breckenridge, CO, 2006. — P. 161–170.
28. **Kemeny J., Brian N., Jeff H., and DoNovan J.** Three-dimensional digital imaging for the identification, evaluation, and management of unstable highway slopes, Rep. IDEA Project 119 ed. Vol. Final Report, 2008.
29. **Slob S., Van Knapen B., Hack R., Turner K., and Kemeny J.** Method for automated discontinuity analysis of rock slopes with three-dimensional laser scanning, Proc. Transportation Research Board 84th Annual Meeting, Washington D. C., 2005.
30. **Rocscience**, 2014, DIPSV6 User Manual. www.rocscience.com.
31. **Mathis J. I.** Discontinuity mapping — a comparison between line and area mapping, Proc. of 6th ISRM Int. Congr. Rock Mechanics, Montreal, Canada, 1987, Vol. 2. — P. 1111–1114.

Поступила в редакцию 27/XII 2017

После доработки 05/IX 2018

Принята к публикации 29/I 2019