

НОВЫЕ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ В ГОРНОМ ДЕЛЕ

УДК 004.031.2, 621.3.08

МНОГОКАНАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ДВУХКООРДИНАТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ СМЕЩЕНИЙ БЛОКОВ ГОРНЫХ ПОРОД НА ГЛУБОКИХ КАРЬЕРАХ

В. И. Востриков¹, А. А. Потака²

¹*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
E-mail: vvi.49@mail.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

²*Удачинский горно-обогатительный комбинат,
E-mail: potakaaa@alposa.ru, мкр. Новый город, 678188,
г. Удачный, Республика Саха (Якутия)*

Разработан и изготовлен экспериментальный вариант комплекса для двухкоординатных деформационных измерений, позволяющий регистрировать смещение геоблоков в нормальном по отношению к трещине направлении, а также их сдвиговое движение относительно друг друга. В 2020 г. на карьере алмазоносной трубки “Зарница” комплекс развернут и включен в режим долговременного мониторинга геодинамического состояния массивов горных пород в приразломной зоне тектонического разлома, пересекающего карьер. Установлено, что смещения геоблоков в нормальном направлении по отношению к трещине носят колебательный характер с максимальным размахом 3.5 мм, сдвиговое движение происходит с изменением направления (максимальное смещение 1 мм).

Измерительная система, мониторинг, карьер, разлом

DOI: 10.15372/FTPRPI20210117

Массивы горных пород на рудниках и карьерах характеризуются блочно-иерархическим строением, т. е. блоки разделяются трещинами и расщелинами, ширина которых составляет от десятых долей сантиметра до десятков сантиметров. Системы трещин в массиве, независимо от их генезиса, играют роль систем поверхностей ослабления и подлежат контролю при мониторинге сдвижения горных пород и устойчивости откосов. Алмазоносные трубки Якутии (“Нюрбинская”, “Комсомольская”, “Зарница” и др.) приурочены к зонам тектонических разломов [1, 2]. Ширина приразломных зон достигает 10–15 м.

Работа выполнена в рамках госзадания (№ 0321-2018-0001) и при частичной финансовой поддержке РФФИ (№ 18-05-00757А).

В данной работе рассмотрено геодинамическое состояние сложнопостроенного массива горных пород в районе алмазонасной трубки “Зарница” с точки зрения перемещений краевых блоков в зоне разломов, распространенного вида разрушения в глубоких карьерах (сдвигового разрушения), а также оценки устойчивости бортовых откосов. Применение новых современных технологий исследования геомеханического состояния прибортовых массивов глубоких карьеров — важный аспект улучшения и оптимизации процесса мониторинга и эксплуатации карьеров со своевременным обнаружением опасного уровня деформаций. Организация постоянного мониторинга прибортовых массивов глубоких карьеров позволяет сделать процесс более информативным и эффективным в плане безопасности.

СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВОВ ГОРНЫХ ПОРОД

В настоящее время в России и за рубежом системы мониторинга геомеханического состояния массивов горных пород создаются применительно к конкретным горным предприятиям. Анализ современных разработок систем контроля и методов мониторинга геомеханического состояния массивов горных пород с использованием различного рода измерительных комплексов позволяет определить направление исследований в этой области.

Так, для разработки рекомендаций по углублению железорудного карьера в Китае выполнено 3D-моделирование, развернута измерительная система, состоящая из акустических и оптических датчиков [3]. Применялись методы радиолокации и фотограмметрии, в результате удалось увеличить угол наклона бортов на $1-6^\circ$. На руднике Nanfen (Китай) развернута измерительная сеть, основанная на датчиках смещения [4]. В Австрии контроль деформаций горных склонов осуществлялся с помощью фотограмметрических моделей, построенных по данным аэрофотоснимков, а также сейсмических методов и GPS-навигации [5, 6]. В [7, 8] описаны системы деформационных оптоволоконных датчиков и показано, что данные системы контроля хорошо подходят для оценки сползания горного склона. Для раннего предупреждения опасного состояния бортового откоса использовались датчики наклона [9]. В [10–14] контроль движения оползней на карьерах осуществлялся радиолокационным и лазерным методами сканирования, позволяющими быстро измерять движение поверхности с точностью в субмиллиметровом диапазоне. Для оценки состояния бортов карьера “Нюрбинский” развернута сеть реперных станций [15].

Анализ современных систем мониторинга геодинамического состояния массивов горных пород позволяет отметить следующие моменты:

- методы GPS-навигации могут давать низкую точность определения координат. На карьере трубки “Удачная”, начиная с глубины 300 м, борта карьера экранируют сигналы спутников;
- сейсмические методы не дают возможности оценить движение блоков, а показывают лишь деформацию массива;
- радиолокационные и лазерные системы требуют дорогостоящих станций, существенного энергопитания;
- при применении волоконно-оптических датчиков высока вероятность разрыва волоконного кабеля, возникают сложности построения широко разветвленной мониторинговой сети;
- существующие системы реперных станций, в том числе и на карьере трубки “Нюрбинская”, не позволяют работать в режиме реального времени.

Разработанные методы и системы мониторинга не отвечают требованиям работы на глубоких карьерах в жестких климатических условиях. В России построением систем мониторинга геодинамического состояния массивов горных пород занимаются Институт земной коры СО РАН, Институт горного дела СО РАН и др. организации [16–18]. Системы с деформационными датчиками щелевого типа, а также тросиковыми датчиками испытывались на карьерах алмазоносных трубок в Якутии и имели следующие недостатки: не реализовывалась дистанционная передача измерительной информации на экраны специалистов деформационного отдела; наблюдалось существенное потребление энергопитания при использовании карьерных трансформаторов или тяжелых батарей с большими весогабаритными параметрами.

КОМПЛЕКС ДЛЯ ДВУХКООРДИНАТНЫХ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

С целью мониторинга геодинамического состояния массивов горных пород глубоких карьеров в ИГД СО РАН разработан и изготовлен экспериментальный вариант многоканальной измерительной системы “Карьер” [19–20]. Движение геоблоков в массиве горных пород происходит по разным направлениям. Изменяется ширина трещин, геоблоки движутся по трещине параллельно друг другу (сдвиговое движение), регистрируется квазивращательное движение. Проведенные ранее исследования геодинамического состояния массивов горных пород на бермах карьеров “Удачный” и “Зарница” осуществлялись путем измерений ширины трещин.

Для исследования сдвига геоблоков, а также регистрации изменения ширины трещины разработан комплекс, состоящий из двух датчиков, расположенных под углом друг к другу. Функциональная схема комплекса приведена на рис. 1.

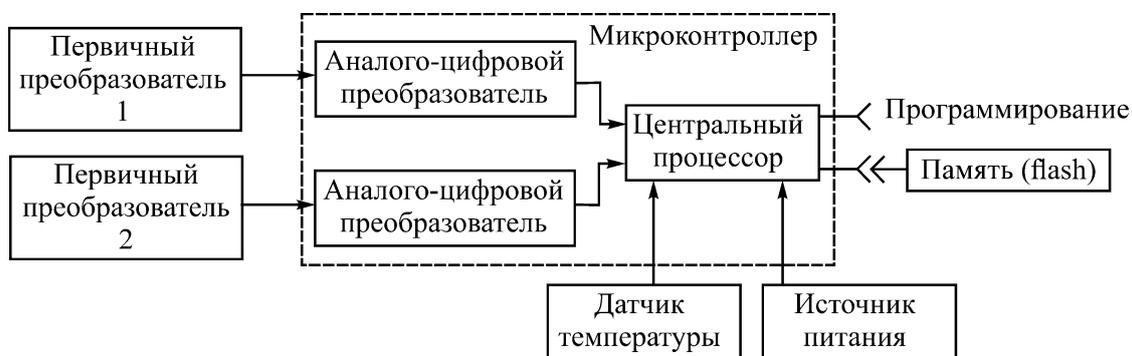


Рис. 1. Функциональная схема комплекса

ОПИСАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ И ПРИНЦИПА РАБОТЫ КОМПЛЕКСА

В качестве первичных преобразователей в комплексе применялись два тросиковых датчика типа SG1 на основе прецизионных потенциометров. Программируемый микроконтроллер STM32 компании STMicroelectronics имеет в составе аналого-цифровые преобразователи (АЦП), осуществляющие оцифровку аналоговых сигналов с датчиков. Применение 12-разрядных АЦП позволяет снизить значение погрешности ~ 0.01 мм. В центральном процессоре выполнялась температурная коррекция получаемых измерений, информацию упаковывали и записывали на карту памяти, с которой затем переписывали на ноутбук. Период измерений (10 мин) задавался программированием микроконтроллера. При развертывании комплекса устанавливался измеряемый диапазон смещения геоблоков ± 50 мм.

Принцип работы комплекса представлен на рис. 2. Смещения геоблоков перпендикулярно трещине (в направлении y), которая расширяется и сужается, приводят к равным изменениям значений датчиков 1 и 2. При параллельном (в направлении x) сдвиговом движении геоблоков относительно друг друга изменения значений датчиков неравнозначны. Сдвиг геоблока 1 относительно геоблока 2 вправо по оси x ведет к уменьшению значения датчика 1 и к увеличению значений датчика 2, и наоборот. Каждый датчик состоит из преобразователя, опорной стойки и соединяющей их струны. Конструктивно преобразователи 1 и 2 размещены в одном корпусе, установленном на одной стойке.

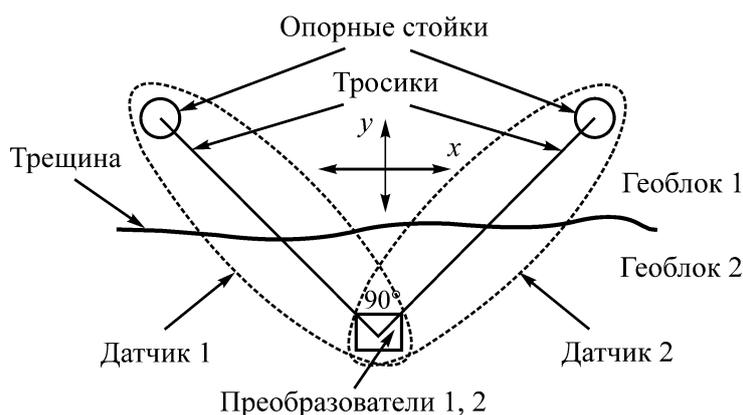


Рис. 2. Схема двухкоординатного датчика

Комплекс развернут на северном борту карьера “Зарница” на горизонте + 380 м (рис. 3). Измерительные базы датчиков составляли 2.9 м. В долговременный режим мониторинга комплекс включен 18.09.2020 г. Для анализа его работы разработан алгоритм и прикладная программа обработки получаемой информации.

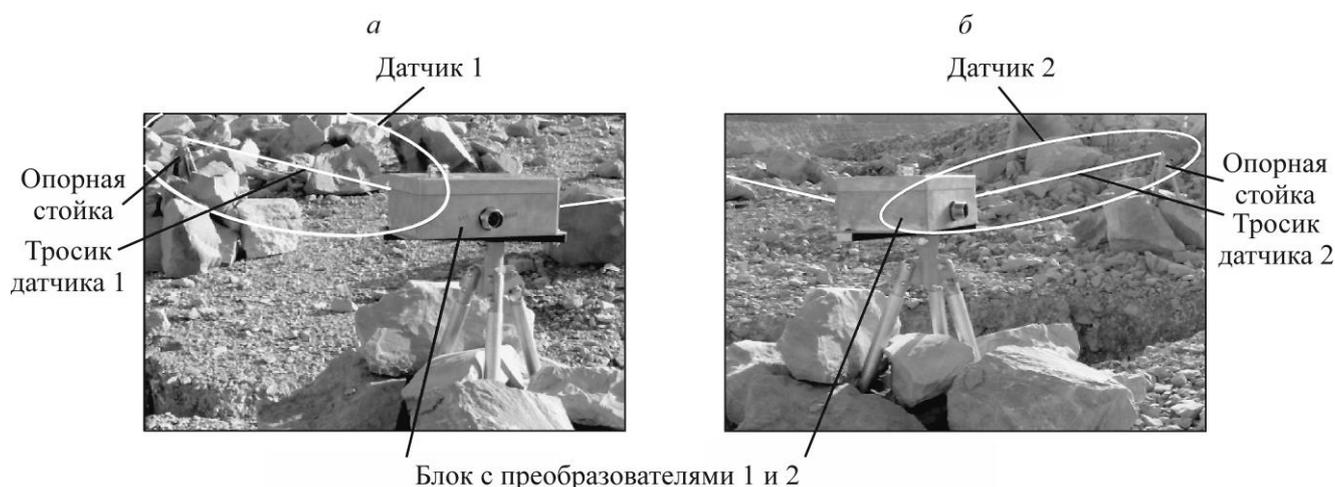


Рис. 3. Вид двухкоординатного комплекса, состоящего из датчиков 1 (а) и 2 (б)

РЕЗУЛЬТАТЫ МОНИТОРИНГА

На рис. 4а показано изменение ширины трещины по оси y в период с 18 по 24 сентября 2020 г. Кривая имеет колебательный характер с максимальным размахом 3.8 мм. На рис. 4б отражен сдвиг геоблоков относительно друг друга за тот же период. Пунктирная линия — аппроксимирующая кривая, полученная в результате обработки информации по полиномиальному распределению со степенью 6.

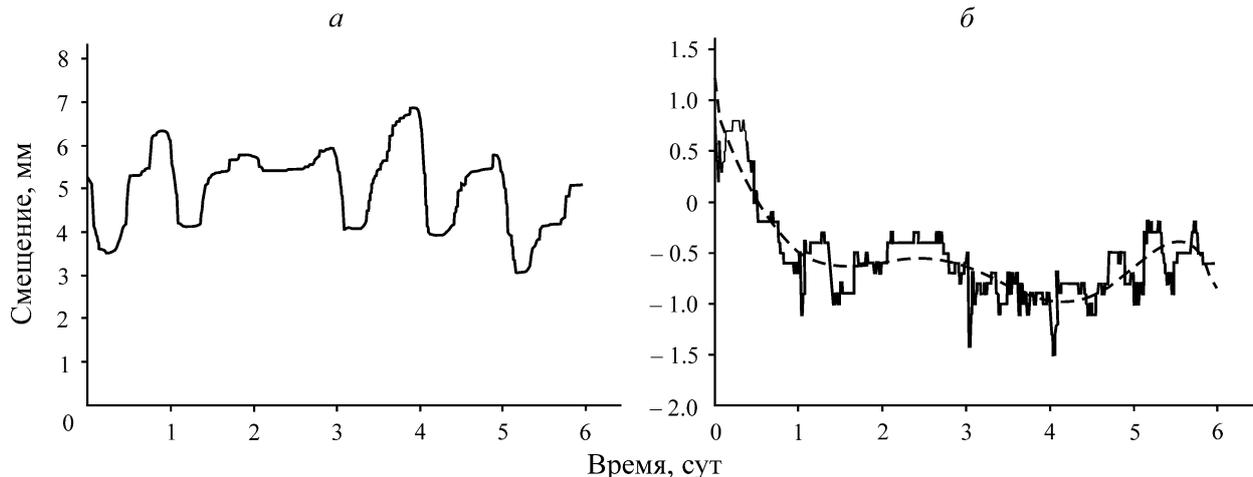


Рис. 4. Изменение ширины трещины во время мониторинга (а) и сдвиговое смещение геоблоков (б)

При анализе сдвигового смещения, как и при движении по нормали, в общем случае невозможно определить, какой блок относительно другого движется. Принимаем положение, что геоблок 2, на котором установлены преобразователи, являлся основным массивом горных пород и относительно него двигался геоблок 1. Установлено, что геоблок 1 первые 0.5 сут двигался вправо в сторону кромки бермы. Максимальное смещение составило 0.8 мм, скорость — 0.07 мм/ч. Затем направление движения геоблока 1 сменилось на противоположное — влево в сторону борта карьера. Тренд движения геоблока имел волнообразный вид. Максимальный размах смещения геоблока 1.8 мм.

ВЫВОДЫ

В 2020 г. на карьере алмазонасной трубки “Зарница” развернут и включен в режим длительного мониторинга измерительно-вычислительный комплекс, состоящий из двух датчиков, расположенных под углом 90° друг к другу и под углом 45° по отношению к трещине. Это размещение позволяет регистрировать смещения геоблоков в нормальном по отношению к трещине направлении, а также их сдвиговое движение относительно друг друга. Комплекс установлен на берме +380 м северного борта карьера.

Показано, что в нормальном направлении смещения геоблоков носят колебательный характер с максимальным размахом 3.5 мм. Их сдвиговое движение происходит с изменением направления. В первые 5 ч мониторинга наблюдается существенный сдвиг геоблока в сторону борта карьера с максимальной амплитудой 0.8 мм, затем он движется в сторону кромки бермы. Характер движения имеет волнообразный вид, максимальное смещение 1 мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борняков С. А., Салко Д. В. Инструментальная система деформационного мониторинга и ее апробация в кимберлитовом карьере // ФТПРПИ. — 2016. — № 2. — С. 172–178.
2. Потехина И. А., Маковчук И. В., Гладков А. С. Разрывная тектоника месторождения трубки “Комсомольская” // Вестн. ИГУ. — 2008. — № 4. — С. 25–31.
3. Lai X., Shan P., Cai M., Ren F., and Tan W. Comprehensive evaluation of high-steep slope stability and optimal high-steep slope design by 3D physical modeling, Int. J. Miner., Metal. and Mater., 2015, Vol. 22, No. 1. — P. 1–10.

4. **Tao Z., Li H., Zhang H., and Zhang X.** Real-time remote monitoring system based on the large deformation cable with constant resistance for landslide disaster and its application, *The Open Civil Eng. J.*, 2015, Vol. 9. — P. 504–509.
5. **Brückl E., Brunner F. K., and Kraus K.** Kinematics of a deep-seated landslide derived from photogrammetric, GPS and geophysical data, *J. Eng. Geol.*, 2006, Vol. 88, No. 3–4. — P. 49–59.
6. **Brückl E., Brunner F. K., Lang E., Mertl S., Müller M., and Stary U.** The Gradenbach Observatory deep-seated non-stationary deep-seated gravitational creep by geodetic, hydrological, and seismological methods, *Landslides*, 2013, Vol. 10, No. 6. — P. 815–829.
7. **Lienhart W.** Case studies of high-sensitivity monitoring of natural and engineered slopes, *Int. J. of Rock Mech. and Geotech. Eng.*, 2015, Vol. 7. — P. 379–384.
8. **Bao X. and Chen L.** Recent progress in distributed fiber optic sensors, *Sensors*, 2012, Vol. 12, No. 7. — P. 31–39.
9. **Towhata I., Uchimura T., Seko I., and Wang L.** Monitoring of unstable slopes by MEMS tilting sensors and its application to early warning, *Int. Symp. on Geohazards and Geomechanics (ISGG 2015)*, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Sci., 2015, 26 (1). — 012049.
10. **Shang J., Hencher S. R., West L. J., and Handley R.** Forensic excavation of rock masses: A technique to investigate discontinuity persistence, *J. Rock Mech. and Rock Eng.*, 2017, 50, — P. 2911–2928.
11. **Atzeni C., Barla M., Pieraccini M., and Antolini F.** Early warning monitoring of natural and engineered slopes with ground-based synthetic-aperture radar, *Int. J. Rock Mech. Rock Eng.*, 2014, 48 (1). — P. 235–246.
12. **Kumar A. and Rathee R.** Monitoring and evaluating of slope stability for setting out of critical limit at slope stability radar, *Int. J. Geo-Eng.*, 2017, 8 (1).
13. **Little M. J.** Slope monitoring strategy at PPRust open pit operation, *Int. Symp. on Stability of Rock Slopes in Open Pit Min. and Civil Eng.*, 2015. — P. 211–230.
14. **Заровняев Б. Н., Шубин Г. В., Васильев И. В.** Использование лазерного сканирования для исследования геомеханического состояния бортов карьеров // *Международ. науч.-исслед. журн. Техн. науки.* — 2012. — С. 76–77.
15. **Черкашин С. Г., Дроздов А. В., Мельников А. И.** Оценка состояния бортов карьера “Нюрбинский” по результатам гидрогеомеханического мониторинга // *Международ. журн. приклад. и фундам. исслед.* — 2015. — № 5. — С. 276–281.
16. **Димаки А. В., Псахье С. Г.** Распределенная измерительная система для мониторинга смещений по границам раздела блочных сред на базе комплекса “Сдвиг-4МР” // *ФТПРПИ.* — 2009. — № 2. — С. 110–117.
17. **Востриков В. И., Ружич В. В., Федеряев О. В.** Система мониторинга обвалоопасных участков бортов глубоких карьеров // *ФТПРПИ.* — 2009. — № 6. — С. 118–127.
18. **Востриков В. И., Полотнянко Н. С., Ружич В. В., Федеряев О. В.** Контроль геомеханического состояния обвалоопасных участков бортовых откосов глубоких карьеров // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук.* — 2016. — № 3. — С. 290–296.
19. **Востриков В. И., Полотнянко Н. С., Трофимов А. С., Потака А. А.** Мониторинг геомеханического состояния массивов горных пород на карьере алмазоносной трубки “Зарница” // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук.* — 2019. — Т. 6. — № 2. — С. 39–42.
20. **Востриков В. И., Полотнянко Н. С.** Многоканальная измерительная система “Карьер” для мониторинга бортов глубоких карьеров // *ФТПРПИ.* — 2014. — № 6. — С. 224–229.

Поступила в редакцию 11/ХII 2020

После доработки 13/I 2021

Принята к публикации 15/I 2021