

УДК 550.34 + 551 + 622

**ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЕФОРМАЦИОННОГО
МОНИТОРИНГА И ЕЕ АПРОБАЦИЯ В КИМБЕРЛИТОВОМ КАРЬЕРЕ**

С. А. Борняков^{1,2}, Д. В. Салко¹

¹*Институт земной коры СО РАН, E-mail: bornyak@crust.irk.ru,
ул. Лермонтова, 128, 664033, г. Иркутск, Россия,*

²*Иркутский государственный университет,
ул. Ленина, 3, 664001, г. Иркутск, Россия*

Разработана автоматизированная система деформационного мониторинга борта карьера в составе автономного прибора-регистратора, датчиков деформаций, аналого-цифровых преобразователей, серверной и клиентской программ управления. Накопление данных осуществляется на сервере в режиме on-line через модем сотовой связи. Питание автономных устройств происходит от аккумуляторов с подзарядкой от солнечных батарей, что повышает ресурс работы системы в целом. Элементы системы апробированы на карьере кимберлитовой трубки "Нюрбинская". Выполнен мониторинг деформаций в зоне разломов восточного борта карьера, проведена оценка уровня его геомеханической устойчивости.

Борт карьера, разломно-блоковая структура, деформационный мониторинг, инструментальная система, регистратор, датчик, программа управления

Для обеспечения безопасности ведения открытых горных работ в карьере необходимо осуществлять постоянный контроль геомеханического состояния его бортов и уступов в пределах зон отработки. Контроль реализуется с помощью систем инструментального деформационного мониторинга, позволяющих определять уровень накопления деформаций во вмещающем горную выработку породном массиве. Основной задачей такого контроля является превентивное обнаружение деформаций, способных повлечь обрушение бортовых участков карьера. Серийно выпускаемые для деформационного мониторинга инструментальные системы, как правило, не предназначены для решения конкретных задач контроля состояния бортов карьеров в зонах разломов, имеют ограниченный ресурс электропитания, высокую себестоимость передачи данных в режиме on-line при наличии этой функции и высокую стоимость импортного оборудования [1].

Несерийные приборы деформационного мониторинга разрабатываются и изготавливаются в виде опытно-экспериментальных образцов, главным образом в академических институтах горного профиля. За последние годы создано более десяти аппаратно-программных комплексов, используемых для решения широкого круга задач по обеспечению безопасности ведения подземных и открытых горных работ [2 – 5]. Ряд таких разработок ориентирован для деформационного мониторинга бортов карьеров. Близкий по функциональным возможностям аппарат-

но-программный комплекс и созданная на его основе распределенная система представлены в [6, 7]. Упомянутые приборы имеют повышенное электропотребление, работают с малым количеством датчиков и передают данные по радиоканалам на небольшие расстояния.

Создана расширенная по функциональным возможностям инструментальная система (ИС) [8], позволяющая осуществлять деформационный мониторинг прибортовых разломных зон глубоких карьеров.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

Месторождение алмазов кимберлитовой трубки “Нюрбинская” разрабатывается открытым способом с 2001 г. В настоящее время текущая глубина карьера достигла 300 м. Для контроля геомеханического состояния его бортов создана наблюдательная сеть радиальных профилей с серией опорных реперов на каждом из них. Существенные горизонтальные смещения ближних к бортам карьера реперов в сторону выработки, выявленные серией повторных измерений посредством GPS-геодезии, послужили основанием для организации детального наземного мониторинга деформаций. Объектом исследований выбран наиболее подвижный восточный борт карьера, насыщенный разломными зонами, в пределах которых проводились испытания компонентов создаваемой ИС.

ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЕФОРМАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ БОРТА КАРЬЕРА

Основное назначение ИС — измерять и синхронизировать по времени показания датчиков, накапливать данные во флэш-память прибора-регистратора и периодически передавать их на удаленный базовый сервер. В процессе создания системы решалась задача надежной передачи данных от разнотипных датчиков деформаций до сервера. Особенностью системы является использование шины RS485, которая позволяет одновременно подключать на один кабель длиной 400 м до 32 аналого-цифровых преобразователей (АЦП).

В первом варианте ИС создавалась для мониторинга деформаций в массиве горных пород на Южно-Байкальском геодинамическом полигоне с целью разработки способа диагностики динамического состояния литосферы и совершенствования технологий средне- и краткосрочного прогноза землетрясений [8, 9]. Изменение конструкции крепления датчиков и добавление усилителей сотовой связи сделали возможным ее использование для деформационного мониторинга в условиях кимберлитовых карьеров.

Инструментальная система состоит из четырех частей и включает: прибор-регистратор; датчики деформаций; модули аналого-цифровых преобразователей; клиентскую и серверную части программы управления.

Клиентская часть программы управления выполняет задачу отображения данных, серверная — обеспечивает прием данных от прибора-регистратора, сохраняет их в базу данных и по запросу оператора обеспечивает передачу информации в клиентскую программу.

Прибор-регистратор (ПР) является управляющим устройством системы. Он принимает данные от датчиков деформаций, накапливает их во флэш-память и по запросу передает на базовый сервер. В ПР встроена внутренняя антенна GSM. При низком уровне сигнала качество связи повышается с помощью подключения внешней антенны. Стабильная сотовая связь GSM обеспечивает поступление данных на сервер с задержкой в несколько секунд. При отсутствии GSM связи в районе проведения мониторинга данные передаются в компьютер по кабелю.

Питание прибора-регистратора осуществляется от источника тока напряжением до 15 В. В качестве источника тока может использоваться блок питания, работающий от электрической сети 220 В или аккумулятор любого типа. Для реализации на удаленном объекте измерений в непрерывном режиме аккумулятор оснащается устройством подзарядки от солнечной батареи.

Для контроля аккумуляторной батареи в прибор-регистратор встроен датчик напряжения питания. Для контроля работоспособности периферийных устройств, подключенных к ПР, в него встроены два светодиода: зеленый индицирует исправную работу устройств на шине RS485, красный — состояние канала сотовой связи. На рис. 1 показан внешний вид прибора-регистратора в исполнении с внутренней антенной.

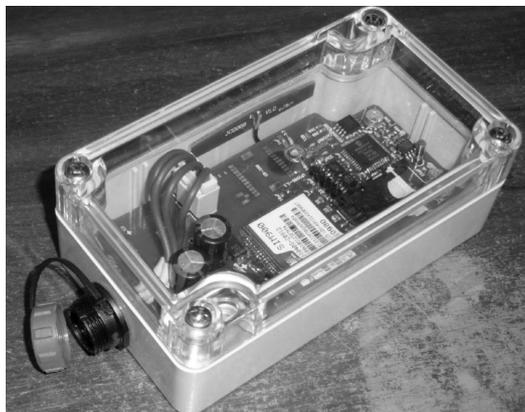


Рис. 1. Внешний вид прибора-регистратора

Данные, записанные в цифровом виде в память ПР, с выбранной оператором временной дискретностью передаются пакетами в формате UART на скорости 500 кБит/с через сотовый модем на центральный сервер сбора информации, где накапливаются в архив и доступны для использования через клиентскую программу оператора.

Аналого-цифровые преобразователи предназначены для выбора периода измерений и преобразования аналоговых сигналов с датчиков деформаций в цифровую форму. Поддерживаются преобразования сигналов для трех типов датчиков: датчики, выполненные по мостовой схеме; датчики с выходом по напряжению; датчики-потенциометры.

Разработан ряд модулей АЦП на двух различных микросхемах:

- двухканальный “точный” АЦП на микросхеме AD7731 со встроенным усилителем;
- двухканальный “грубый” АЦП на микросхеме ADS1222;
- одноканальные АЦП (“грубая” модификация);
- одноканальные АЦП (“точная” модификация);
- герметичный датчик температуры с платиновым термосопротивлением.

АЦП позволяет настраивать период измерений в пределах от 1/8 до 8191 с. Для снижения уровня шума используется настраиваемый фильтр, работающий по принципу усреднения. Например, при 30-секундном периоде передачи данных каждое показание является результатом усреднения 240 измерений АЦП.

“Точный” АЦП отличается от “грубого” наличием усилителя и в 10 раз меньшим шумом. Подробно основные характеристики прибора-регистратора и АЦП приведены в [8].

“Грубый” АЦП измеряет напряжения в диапазоне от 0 до 2.5 В и ориентирован для измерений температуры при помощи платинового термосопротивления. Разрешение такого АЦП обеспечивает измерения температуры с дискретностью 1/1000° С. При подключении потенциометрических датчиков разрешение “грубого” АЦП также обеспечивает достаточную точность.

“Точный” АЦП измеряет напряжения в диапазоне ± 15 мВ и хорошо подходит для тензодатчиков, включаемых по мостовой схеме. Подбор разных видов тензодатчиков позволяет добиться необходимой точности.

Прибор-регистратор опрашивает устройства на шине RS485, используя специально разработанный протокол, который поддерживает три важные в системе сбора данных функции: идентификацию; точную привязку каждого показания по времени; гарантированную доставку сообщений.

Аппаратно в приборе-регистраторе реализован интерфейс RS485. Однако при мониторинге используется лазерный дальномер, который имеет собственный протокол передачи данных на базе интерфейса RS232. Для его подключения к прибору-регистратору разработан прибор-преобразователь интерфейса, обеспечивающий согласование интерфейсов. Преобразователь настраивает лазерный дальномер и автоматически его опрашивает, используя интерфейс RS232 и протокол дальномера. Полученные данные передаются в регистратор по шине RS485.

АПРОБАЦИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ В КИМБЕРЛИТОВОМ КАРЬЕРЕ

С целью детального изучения динамики перемещений краевых блоков в зоне разломов восточного борта карьера “Нюрбинский” и оценки геомеханической устойчивости борта в целом выполнен мониторинг деформаций с использованием представленной ИС.

Были оборудованы 4 наблюдательных пункта (рис. 2). В каждом из них в крест простирания разломов, выявленных с помощью георадарного профилирования, выполнялись измерения деформаций потенциометрическим датчиком, закрепленным на конце штанги из алюминиевых труб (рис. 3). Штанга крепилась к обсадным трубам, установленным в скважинах, пробуренных в крыльях разломов на глубину до 5 м. Ее длина в каждом случае определялась шириной зоны разлома и составила в первом и втором пунктах 5 м, в третьем и четвертом — 15 м.

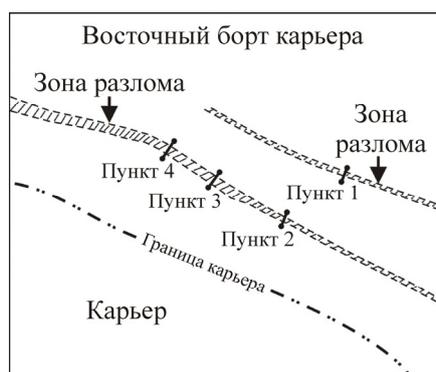


Рис. 2. Схема деформационного мониторинга в пределах восточного борта карьера



Рис. 3. Устройство пункта деформационного мониторинга

Для выравнивания штанги применялись дополнительные опоры, которые устанавливались между обсадными трубами на расстоянии 1.5 м, что позволило ограничить вертикальные и боковые смещения штанг при воздействии массовых взрывов и вибраций от работы тяжелой техники. Чтобы устранить влияние перепадов температуры, датчики и штанги в каждом пункте накрывались металлическими кожухами и засыпались песчано-гравийной смесью.

Оценка деформаций в крест простирания разломных зон. Результаты мониторинга показали, что на участках разломов в пределах пунктов 1 и 2 проявляются незначительные деформации. В пункте 1 за несколько месяцев они составили от десятых долей до 1.5 мм, а в пункте 2 — десятые доли миллиметра. Аналогичные деформации зафиксированы в пункте 3 (таблица).

Деформационная “активность” сегмента разлома в пункте 4 оказалась существенно выше. Здесь наибольшие деформации зарегистрированы в летние и осенние месяцы, когда происходит максимальное протаивание грунта по глубине и идут дожди, приводящие к обводнению разломов и способствующие активизации в них деформационных процессов.

Средние скорости приращения деформаций растяжения (+) и сжатия (–) в пунктах мониторинга по месяцам в 2014 г.

Номер пункта	Среднее значение скорости, мм/мес						
	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
1	+0.5	–0.35	—	+1.1	+0.21	+0.24	0
2	–0.3	+0.4	—	+0.3	+0.1	–0.1	+0.12
3	—	—	—	+2.24	+2	+2.1	+2.4
4	—	—	—	–1.22	+3.33	+3.05	+3.05

На рис. 4 показан обобщенный график деформаций за период с конца июля по начало ноября 2014 г. Рост деформаций соответствует растяжению, а их уменьшение — сжатию в зоне разлома. Видно, что на долговременном интервале изменение деформаций подчиняется однонаправленному тренду растяжения, однако на коротких временных интервалах в зоне разлома наблюдаются знакопеременные деформации сжатия-растяжения. Накопленное приращение ширины зоны разлома за время наблюдений с июля по ноябрь 2014 г. составило 13 мм. Дискретность опроса датчиков при измерениях 30 с.



Рис. 4. Обобщенный график деформаций с конца июля по ноябрь 2014 г.

Оценка динамического состояния восточного борта карьера по данным деформационно-го мониторинга. Структура горного массива борта карьера представлена системой разномасштабных блоков и разделяющих их разломов. Под влиянием геодинамических факторов блоки испытывают колебания. В динамически устойчивом состоянии колебания блоков не согласованы и хаотичны. В динамически неустойчивом состоянии характер колебания блоков принципиально меняется: происходит синхронизация колебаний на всех масштабных уровнях и колебательный процесс переходит в состояние самоорганизации с автоволновым режимом функционирования. В литературе это состояние именуется “состоянием самоорганизованной критичности (СОК)”

[10], “метанестабильным состоянием” [11] и др. Из представленных работ следует, что самоорганизация элементов нагруженной системы предваряет развитие в ней динамической неустойчивости с последующим разрушением и может выступать для них прогнозным критерием.

Переход деформационного процесса в состояние самоорганизации может быть диагностирован специальными методами. Авторами использованы метод анализа кривизны структурных функций (МАКСФ), а также методы энтропийного и фрактального анализа.

МАКСФ является универсальным методом и позволяет рассчитывать для любых временных рядов данных параметр “время корреляции (ВК)”, резкий рост которого трактуется как показатель развития процессов самоорганизации в анализируемой системе. Впервые этот метод использован для оценки динамического состояния литосферы по данным деформационного мониторинга на Южно-Байкальском геодинамическом полигоне перед Култукским землетрясением. Было установлено, что рост параметра ВК начался за десять часов до его реализации и достиг 15 000 ед. [9]. Это значение можно считать пороговым, отражающим критическое предсейсмогенное динамическое состояние больших участков литосферы в преддверии сильных землетрясений. Для условий карьера, где тестируемый объем по размеру на два порядка меньше, пороговое значение параметра ВК при динамически опасном неустойчивом состоянии борта должно находиться в пределах 100 ед., а время его превентивной диагностики составлять от нескольких часов до суток.

Анализ данных деформационного мониторинга методом МАКСФ показал, что расчетные значения параметра ВК за время наблюдений в пределах восточного борта карьера не превышали единицы. Это указывает на динамически устойчивое состояние борта и отсутствие в нем локализованных объемов с высоким уровнем тектонических напряжений. По мере развития горнодобычных работ и углубления карьера ситуация может кардинально измениться. Изменения могут произойти за короткий интервал времени, что свойственно для открытых систем, к которым относится геологическая среда.

Методы энтропийного и фрактального анализа, реализованные в виде программного комплекса “Seimo-test” (ИЗК СО РАН), позволяют судить о динамическом состоянии анализируемой системы по направленности изменения информационной энтропии и фрактальной размерности. В отличие от параметра ВК, информационная энтропия и фрактальная размерность являются относительными показателями ее динамической устойчивости и связаны с ней обратной зависимостью, т. е. с ростом значений этих параметров уменьшается степень ее динамической устойчивости. Рассматривая с этих позиций вариации фрактальной размерности и информационной энтропии (рис. 5), отметим, что относительное постоянство динамического состояния восточного борта карьера в августе претерпело изменения в два последующих месяца. С начала сентября началась “разбалансировка” деформационного процесса. Степень динамической устойчивости разломно-блоковой структуры борта карьера была ниже 3, 4, 13 и 20 сентября, когда расчетные параметры синхронно достигали максимумов, и существенно повысилась к концу месяца. В октябре к условно неблагоприятным по динамическому состоянию системы следует отнести дни 2-й, 3-й, 7–10-й, а также несколько дней конца октября – начала ноября, где наблюдается рост обоих параметров.

Из направленности изменения энтропии с апреля по ноябрь 2014 г. следует, что динамическая устойчивость разломно-блоковой структуры борта карьера с начала года до августа снижалась, затем с вариациями повышалась до середины августа, после чего снова начала снижаться: апрель — 4.8; август — 9.3; сентябрь — 6.85; октябрь — 5.2.

В первой половине августа в пределах борта велись работы тяжелой техникой по засыпке дренажной канавы. В данных мониторинга они отразились резким увеличением деформаций (см. рис. 4). Не исключено, что уменьшение обводненности зон разломов борта за счет ликвидации проходящей через него дренажной канавы способствовало сентябрь-октябрьскому повышению динамической устойчивости его разломно-блоковой структуры.

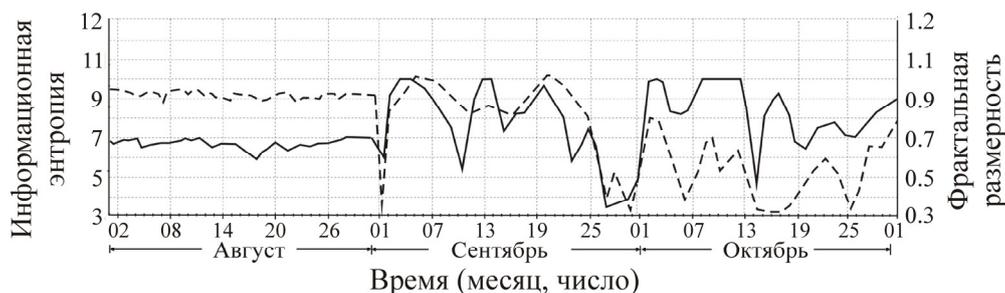


Рис. 5. Вариации фрактальной размерности (сплошная линия) и информационной энтропии (штриховая) временного ряда деформаций с августа по ноябрь 2014 г.

ВЫВОДЫ

Создана инструментальная система для мониторинга геомеханических параметров бортов карьеров, снабженная функцией передачи данных в режиме online на удаленный базовый сервер через модем сотовой связи, работающая в автономном режиме неограниченное время с питанием от аккумулятора и подзарядкой от солнечной батареи. Система апробирована на карьере кимберлитовой трубки “Нюрбинская”, где с апреля по ноябрь 2014 г. проводился мониторинг деформаций в зонах разломов восточного борта с целью количественной оценки степени его динамической устойчивости. В основу оценки положен синергетический концептуальный подход, базирующийся на модели самоорганизованной критичности, определивший выбор методов обработки полученных временных рядов данных. Результаты обработки позволили установить реальные размеры деформаций в зонах разломов восточного борта карьера и сделать заключение о его динамически устойчивом состоянии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <http://www.reutechmining.com/ru/products/products-overview>.
2. **Востриков В. И., Акинин А. А.** Система дистанционного геомониторинга деформационно-волновых процессов в горном массиве // ФТПРПИ. — 2004. — № 6. — С. 104–108.
3. **Востриков В. И., Акинин А. А., Кривецкий А. В., Куратов К. А.** Автономный продольный деформометр // ФТПРПИ. — 2005. — № 6. — С. 106–109.
4. **Востриков В. И., Ружич В. В., Федеряев О. В.** Система мониторинга обвалоопасных участков бортов глубоких карьеров // ФТПРПИ. — 2009. — № 6. — С. 117–126.
5. **Востриков В. И., Полотнянко Н. С.** Многоканальная измерительная система “Карьер” для мониторинга бортов глубоких карьеров // ФТПРПИ. — 2014. — № 6. — С. 224–229.
6. **Димаки А. В., Астафуров С. В., Шилько Е. В., Ружич В. В., Псахье С. Г.** Аппаратно-программный комплекс регистрации смещений в зонах разломов “Сдвиг-3М” // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: тр. Междунар. конф. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2006. — С. 193–199.
7. **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.
8. **Салко Д. В., Борняков С. А.** Автоматизированная система для мониторинга геофизических параметров на геодинамических полигонах // Приборы. — 2014. — № 6. — С. 24–28.
9. **Борняков С. А., Встовский Г. В.** Первый опыт сейсмодиформационного мониторинга Байкальской рифтовой зоны (на примере Южно-Байкальского землетрясения 27 августа 2008 г.) // ДАН. — 2010. — Т. 431. — № 4. — С. 537–541.
10. **Bak P., Tang C., Wiesenfeld K.** Selforganized criticality: an explanation of 1/f noise, Phys. Rev. Lett., 1987, No. 59(4). — P. 381–384.
11. **Ma Jin, Guo Yanshuang, Sherman S. I.** Accelerated synergism along a fault: a possible indicator for an impending major earthquake, Geodynamics & Tectonophysics, 2014, No. 5 (2). — P. 387–399.

Поступила в редакцию 2/IX 2015