

УДК 622.015

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА РЕФЛЕКТОМЕТРИИ ВО ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ ДЛЯ
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАЗРУШЕНИЯ БОРТОВ КАРЬЕРОВ**

**Девендра Кумар Ядав¹, Гунха Карфик², Сингам Джаянфу¹,
Сантос Кумар Дас¹, Санджай Кумар Шарма³**

¹Национальный технологический институт,

E-mail: devenya2091@gmail.com, sjayanthu@gmail.com, г. Роуркеле, Одиша, 769008, Индия

²Женский колледж инженерного дела и технологий стэнли,

E-mail: gunthakarhik@rocketmail.com, г. Хайдарабад, Индия

³Индийский институт технологий,

E-mail: sksharma.min@iitbhu.ac.in, г. Варанаси, Индия

Рассмотрена система рефлектометрии во временной области (система TDR), применяемая для наблюдения за деформацией коаксиального кабеля, вызванной смещениями борта карьера. Проведены лабораторные испытания по измерению деформации сдвига коаксиальными кабелями RG-6 и RG-213. Использованы два способа определения величины деформации: сдвиг-тест и модель карьера. Для сдвиг-теста применены два метода статистической регрессии: линейная и квадратичная. Результаты квадратичной регрессии показали большую положительную корреляцию с деформацией сдвига по сравнению с результатами линейной регрессии. Для кабелей RG-6 и RG-213 наибольшая деформация сдвига составила 11 и 14 мм, что соответствует коэффициентам отражения 0.49 и 0.050. При превышении указанных значений кабеля разрываются. Показано, что метод TDR наиболее предпочтителен для контроля бортов карьеров.

Коаксиальный кабель, метод рефлектометрии во временной области (TDR), модель карьера, коэффициент отражения, смещение борта, сдвиг-тест

DOI: 10.15372/FTPRPI20200511

При разработке карьеров происходит деформация бортов и дна, что требует мониторинга их устойчивости. Поведение бортов карьеров чрезвычайно важно для прогнозирования разрушения. Определяются участки, предрасположенные к смещению, в результате которого происходит разрушение борта. Для обнаружения таких участков используется коаксиальный кабель, проложенный в массиве горных пород борта, и система TDR. При обрыве, смятии или изгибе кабеля система TDR выявляет место, где отмечается смещение массива горных пород борта. Кроме того, система TDR выполняет функцию инклинометра, т. е. обнаруживает смещения в массиве борта карьера на большей глубине. На основе деформационных скачков, фиксируемых в кабеле, прогнозируется степень смещения массива борта: интервал серий деформационных скачков на участке смещения соответствует интервалу движения борта.

Цель настоящей работы — выявить зависимость между формой сигнала системы TDR и степенью деформации сдвига, происходящей в борте карьера. TDR-метод контроля смещения бортов разработан на основе измерений сдвига и деформации борта, проведенных в лаборатор-

ных и полевых условиях. Во время полевых испытаний коаксиальный кабель прокладывали в массиве горных пород бортов, предрасположенных к разрушению. Исследования системы TDR для обнаружения смещения бортов карьера начались в 2008 г.

Лабораторные испытания моделируют развитие ситуации в реальном времени с учетом работы системы TDR, а деформация проложенного коаксиального кабеля определяется благодаря отраженным TDR-волнам. В результате испытаний получено соотношение между степенью деформации кабеля и коэффициентом отражения TDR. В 1999 г. О'Коннор и Доудинг [1] установили, что линейная корреляция между отражением TDR-сигналов и деформацией сдвига является наилучшим выбором благодаря своей простоте. Они использовали два вида регрессии для определения степени локальной деформации кабеля в рамках лабораторного сдвиг-теста, который используется для прогнозирования интенсивности смещения борта при TDR-мониторинге. Если наблюдаемая деформация кабеля превысит 6 мм, данный борт считается неустойчивым и на карьере включается система оповещения согласно требованиям стандартов безопасности Индии в горнодобывающей отрасли (DGMS). Оба результата рассматриваемых регрессий сравнили на предмет сдвига массива борта. Данное исследование применялось на реальном карьере для контроля и прогнозирования разрушения бортов.

ПРИНЦИП TDR-КОНТРОЛЯ НА УЧАСТКАХ БОРТА, ПРЕДРАСПОЛОЖЕННЫХ К РАЗРУШЕНИЮ

На карьере коаксиальный кабель, по которому тестер TDR посылает сигнал (волну напряжения), забетонирован в скважину, пробуренную в бортовом откосе. На участке кабеля, в котором его сопротивление (изменение поперечного сечения) отличается от исходного, TDR-сигнал частично отражается. Деформация кабеля в этом месте указывает на вероятное разрушение борта.

Пусть x — расстояние между генератором TDR-сигнала и местом деформации коаксиального кабеля. Выразим это расстояние через T_R (время прохождения сигнала по контуру) и V_p (скорость распространения сигнала в кабеле) следующим образом:

$$x = V_p \frac{T_R}{2}. \quad (1)$$

Степень изменения деформации кабеля ρ_{peak} пропорциональна δ — сдвигу массива горных пород борта. Величины δ и ρ_{peak} линейно соотносятся между собой:

$$\delta = \delta_0 + \frac{1}{S} \rho_{peak}, \quad (2)$$

где δ_0 — пороговое значение сдвига, при превышении которого возникает деформация кабеля, вызывающая отражение сигнала; S — чувствительность отражения к смещению массива. В 1989 г. Доудинг и др. [2] отметили, что факторы δ_0 и S зависят от типа коаксиального кабеля.

ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

Вынужденные остановки горного производства представляют собой распространенную ситуацию как для открытых, так и подземных месторождений. Любой вид смещения борта карьера или породы в шахте приводит к серьезным последствиям. В последнее время глубина открытых работ увеличивается, поэтому система раннего оповещения становится необходимой для предупреждения разрушения бортов карьеров. Предложено и внедрено множество решений оценки и прогнозирования разрушения бортов. К таким решениям относят: рефлектометрию во временной области (TDR), радиолокацию устойчивости борта (SSR), применение ис-

кусственной нейронной сети (ИНС), машинное и контролируемое обучение, беспроводную сеть датчиков (WSN), систему глобального позиционирования (GPS) и др. Цель этих решений — построение системы раннего оповещения для мониторинга неустойчивости бортов.

Возможность применения системы TDR [3] для мониторинга оползней бортов описана в [4]. Система TDR обеспечивает точное измерение смещения массива горных пород борта и может быть использована для мониторинга их устойчивости. TDR-инклинометр способен отслеживать смещения породы в глубине массива борта [5]. Построенный на платформе Arduino модуль ZigBee создает беспроводную сеть датчиков (WSN), которая внедряется в систему TDR для мониторинга устойчивости борта в режиме реального времени [6]. В [7] предложена многоточечная система TDR, которая отслеживает деформацию массив борта одиночным коаксиальным кабелем, проложенным через наблюдаемый участок. Коаксиальные кабели играют роль датчиков и способны обнаруживать дефекты в массиве породы, борта или грунта [8, 9]. Система TDR применяется также для измерения диэлектрических постоянных на поверхностях грунта высокой электропроводимости для определения количества содержащейся в ней воды (влаги) [10] или для измерения температуры грунта [11]. Деформация кабеля, которая измеряется системой TDR, показывает степень сдвига (смещения) грунта или борта на поверхности или в глубине. В основе данного метода лежит распространение электромагнитных волн по коаксиальному кабелю, который проложен внутри грунта или массива борта и деформируется при их смещении [12, 13]. С точки зрения финансовой и временной эффективности система TDR — наилучший экспериментально доказанный метод мониторинга устойчивости бортов [14, 15]. Используя систему GPS, можно определить местонахождение деформации кабеля и проанализировать тенденцию развития смещений массива борта в определенный временной интервал [16]. По сравнению с инклинометром, система TDR дешевле и более чувствительна к локальным сдвигам, в то время как инклинометр рассматривает постепенные изменения угла наклона борта [17].

Другой известной технологией удаленного мониторинга устойчивости бортов и раннего оповещения является горная радиолокация (SSR) [18]. В рамках метода SSR задается пороговое значение, при превышении которого происходит разрушение борта [19]. Наземные радиолокаторы также измеряют деформацию бортов и породы, предрасположенных к разрушению [20]. Проведено множество исследований применения горной радиолокации для мониторинга и прогнозирования оползней. Для их мониторинга предложен метод радиолокации искусственных скважин с последующим графическим анализом (SAR) [21]. В Бразилии для мониторинга оползней и раннего оповещения применена наземная интерферометрия по методу SAR [22]. Этот метод сочетается с другой технологией удаленного мониторинга — лазерным сканированием для измерения глубины снежного покрова в заснеженных горных областях и мониторинга возникновения снежных лавин [23]. Трехмерное сканирование лазером и интерферометрия по методу SAR применяются также в исследовательских целях в Италии для мониторинга и прогнозирования оползней [24].

Используя потенциал искусственного интеллекта, ИНС показала свою эффективность в организации системы раннего оповещения при разрушении борта [25]. Изучение возможностей данной системы проводилось в Иране с помощью нелинейной ИНС-модели для прогнозирования устойчивости различных склонов. Достоверность работы данной системы подтвердилась при сравнении с результатами, полученными традиционными методами мониторинга устойчивости бортов [26]. ИНС использовалась совместно с моделированием логистической регрессии для мониторинга устойчивости отвалов [27].

Методы машинного и контролируемого обучения также внесли вклад в мониторинг устойчивости бортов карьеров и системы раннего оповещения их разрушения [28]. В машинном обучении применяются различные методы регрессии для расчета оптимальных решений для обеспечения устойчивости различных бортов [29]. Наземные радиолокационные системы (SAR) используются для сбора данных в случаях неустойчивости бортов карьеров, а механизм обучения позволяет прогнозировать их разрушение [30]. В [31] машинное обучение применяется совместно с беспроводной сетью датчиков (WSN) для создания системы прогнозирования разрушения борта в режиме реального времени. Метод опорных векторов, который представляет собой еще один механизм обучения для прогнозирования землетрясений, вызывающих оползни, использует генетический алгоритм [32].

Различные методики мониторинга устойчивости бортов базируются на измерении углов наклона, системе TDR, применении инклинометров и тензометров [33]. Необходимо контролировать и дневную поверхность бортов карьера, поскольку она может также разрушаться. Контроль осуществляется с помощью видеокамер [34]. Так как WSN поддерживает интеграцию неоднородных систем, то возможно использование датчиков, работающих по протоколу SMARTCONE и ZigBee [35, 36], которые позволяют контролировать устойчивость борта в режиме реального времени. Обвалы породы контролируются маломощными WSN-датчиками, а также системой GPS [37 – 39]. Использование минимальной выборки данных при отборочном алгоритме, в котором анализируется информация с учетом механизма считывания, повышает достоверность оценки [40].

Для мониторинга состояния горной породы или грунта используются оптоволоконные датчики, изменяющие свои свойства в местах больших смещений. Собранные данные сохраняются в облачном сервере для работы системы раннего оповещения [41]. Методики удаленного отслеживания применяются для разработки систем прогнозирования разрушения бортов и снижения риска [42]. Такие системы включают в себя мониторинг со спутника в режиме реального времени путем фиксации изображений обвала породы или смещения борта из космоса [43] и прогнозирование с помощью численного моделирования [44]. Инклинометры для измерения смещений эффективны на скалистых бортах для мониторинга разрушения массива горной породы [45]. Большие смещения и обрушения породы происходят из-за взрывных работ, проводимых в карьере. Это необходимо учитывать, поскольку такие участки становятся предрасположенными к разрушению бортов. Методика их мониторинга заключается в постоянной регистрации деформации анкерных болтов [46].

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Лабораторные испытания системы TDR проводились для проверки ее реакции на приложенную деформацию. Рассмотрено два случая деформаций коаксиального кабеля: в первом применялась модель карьера, во втором — установка для проведения сдвиг-теста.

Использование модели карьера. Модель представляет собой уменьшенную копию карьера с тремя уступами и оборудована шкалой для измерения созданных смещений. Характеристики лабораторной модели карьера: ширина уступа 30 см, высота уступа 15 см, угол откоса уступа 66° , общая ширина 70.4 см, общая высота 45 см (рис. 1).

Оценивалась зависимость реакции системы TDR от деформации, приложенной к коаксиальным кабелям RG-6 и RG-213. Кабель RG-6 помещался в специальные скважины модели карьера, предназначенные для наблюдения, и соединялся с системой TDR через коннектор BNC. Модель карьера выполнена таким образом, чтобы средний уступ мог совершать горизон-

тальное движение, которое моделирует смещение борта. Для измерения деформации модель оснащена измерительной шкалой. Для изучения сдвига, возникающего в кабеле, вручную проведена деформация модели на отметке длины кабеля 3.9 м. На данной отметке возникли скачки коэффициента отражения, на других участках кабеля изменений не было. Коэффициент отражения представляет собой параметр, который иллюстрирует количество отраженных электромагнитных волн из-за неоднородности сопротивления в проводящей среде (в проводнике). Он равен отношению амплитуды отраженной волны к амплитуде начальной волны. В месте деформации сопротивление коаксиальных кабелей изменяется и фиксируется более высокий коэффициент отражения по сравнению с другими участками кабеля. Такие же испытания осуществлены с кабелем RG-213.

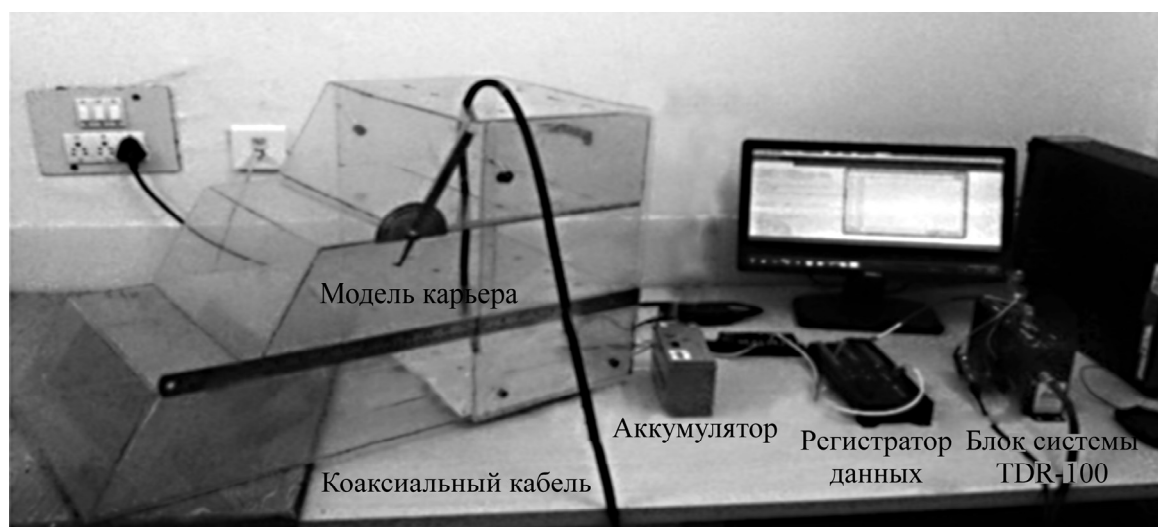


Рис. 1. Лабораторная установка для определения чувствительности системы TDR на модели карьера

Использование установки для сдвиг-теста. В короб установки помещают два блока из мягкой стали размером $6 \times 6 \times 2$ см с отверстиями для кабелей RG-6 и RG-213. Для точного измерения коаксиальный кабель сначала помещался в специальную форму, а затем в установку. Верхняя часть короба выполнена таким образом, чтобы имелась возможность взаимодействия с нажимным измерительным кольцом. Нагружающий хомут расположен на внешней стороне стального блока. Один индикатор часового типа прикреплен к коробу установки для измерения горизонтального смещения, другой — для измерения вертикального смещения. Для удержания короба на месте приложено нормальное давление 50 кН/м^2 . В результате применения сдвиг-теста определялась зависимость между коэффициентом отражения и деформацией. Для обеих кабелей проведены одинаковые испытания.

Колебания значений коэффициента отражения происходили из-за изменения электрического и емкостного сопротивления в месте деформации кабеля. Исходя из данных наблюдений, сделан вывод, что значения коэффициента отражения и деформации линейно связаны между собой.

ПОЛЕВЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Внедрение системы TDR для наблюдения за изменением коэффициента отражения проведено в 2017 г. на марганцеворудном карьере (компания “MOIL”), рудники Dongri Buzurg, штат Махараштра, Индия. Точки наблюдения установили в пределах карьера на расстоянии 25 м

друг от друга на участках подошвы, предрасположенных к сдвигу. В выбранных точках пробурили три скважины диаметром 110 мм и глубиной 11 м, после чего в скважины погрузили кабели (рис. 2). Скважины заполнили бетоном до уровня поверхности. Во время установки коаксиального кабеля предприняли следующие меры предосторожности: контактный вывод кабеля водоизолировали специальной лентой; согнутый кабель обработали лакокрасочным покрытием для защиты от внешнего воздействия; для выявления точного местоположения локальных смещений массива борта кабели обжали.

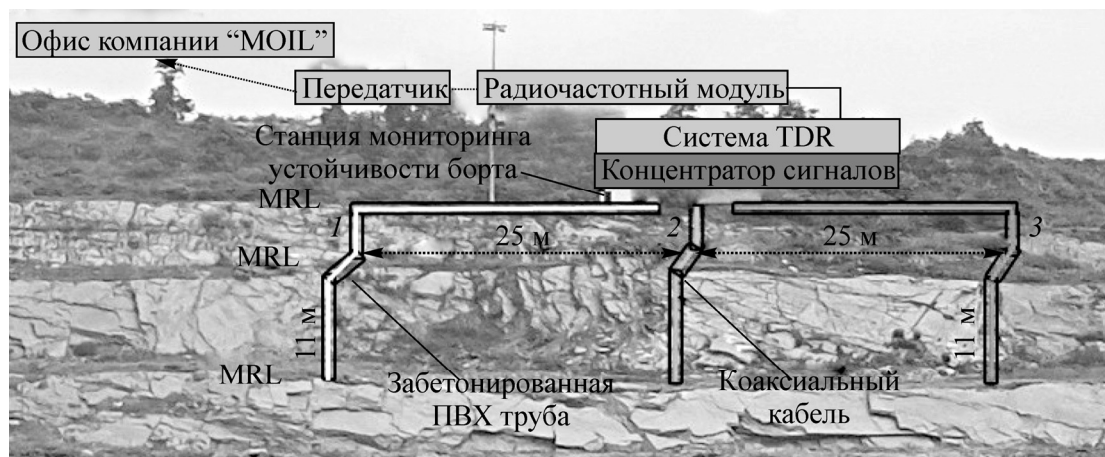


Рис. 2. Расположение и место установки кабелей на карьере

Коаксиальный кабель RG-6 погружали на глубину 11 м на трех участках в одном уступе. Кабели подключали к системе TDR для непрерывного мониторинга состояния борта; значения коэффициента отражения записывали для дальнейшего изучения. Запись с каждого кабеля вели с задержкой 2 с и с задержкой 20 с между сериями измерений. Данные участки контролировались традиционной системой общего контроля. Результаты применения двух систем сравнивали между собой. Характеристики коаксиального кабеля и бетона, которым заполнили скважины, представлены ниже:

Коаксиальный кабель		
	RG-6	RG-213
Диаметр, мм	8.45	10.3
Сопротивление, Ом	75	50
Скорость распространения, %	66	100
Рабочая температура, °С	-40 – 75	-40 – 80
Бетон, залитый в скважины		
Тип цемента	Портландцемент	
Заполнитель	Песок, щебень (фракция 20 и 10 мм)	
Соотношение цементной смеси	1 : 1.36 : 2.19 : 0.4	
Прочность на сжатие, кгс/см ²	390.041	

Полевые испытания непрерывно выполнялись в течение 5 мес с августа по декабрь 2017 г. На первом участке минимальное и максимальное значения коэффициента отражения составили 0.257 и 0.259 соответственно. Вариация коэффициента отражения 0.002 объясняется движением техники на участке. На втором участке минимальное и максимальное значения коэффициента

ента отражения равнялись 0.265 и 0.269 соответственно с вариацией 0.004. На третьем участке минимальное и максимальное значения коэффициента отражения составили 0.275 и 0.280 соответственно с вариацией 0.005.

Лабораторные испытания показали, что изменение коэффициента отражения на 0.09 соответствует 1 мм деформации борта карьера. Так как на трех участках вариация коэффициента отражения не превышала 0.09, значительных смещений борта не происходило.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ И ПОЛЕВЫХ ИСПЫТАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты применения модели карьера. Установлено, что увеличение деформации борта, регистрируемое системой TDR, характеризуется увеличением коэффициента отражения. В модели карьера использовались два типа коаксиальных кабелей: RG-6 и RG-213. На рис. 3 представлена зависимость значения коэффициента отражения от деформации модели карьера. Средняя максимальная деформация кабеля RG-6 составила 6 мм, кабеля RG-213 — 9 мм, что соответствует коэффициенту отражения 0.332 и 0.142.

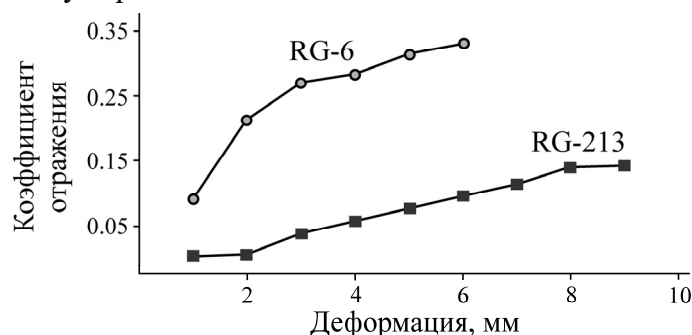


Рис. 3. Зависимость коэффициента отражения от деформации для двух типов кабелей при использовании модели карьера

Результаты сдвиг-теста. Наблюдалось равенство значений коэффициента отражения на различных отметках длины кабеля при задании в установке сдвиг-теста разных деформаций сдвига (рис. 4). Результаты линейной регрессии R^2 при этом составили: для RG-213 ~ 0.92 (рис. 5а), квадратичной регрессии $R^2 \sim 0.98$ (рис. 5б); для RG-6 соответственно ~ 0.96 (рис. 5в) и ~ 0.99 (рис. 5г). Расчеты показали [1], что деформация сдвига и коэффициент отражения системы TDR связаны друг с другом, поэтому данная связь может быть использована для определения деформации сдвига.

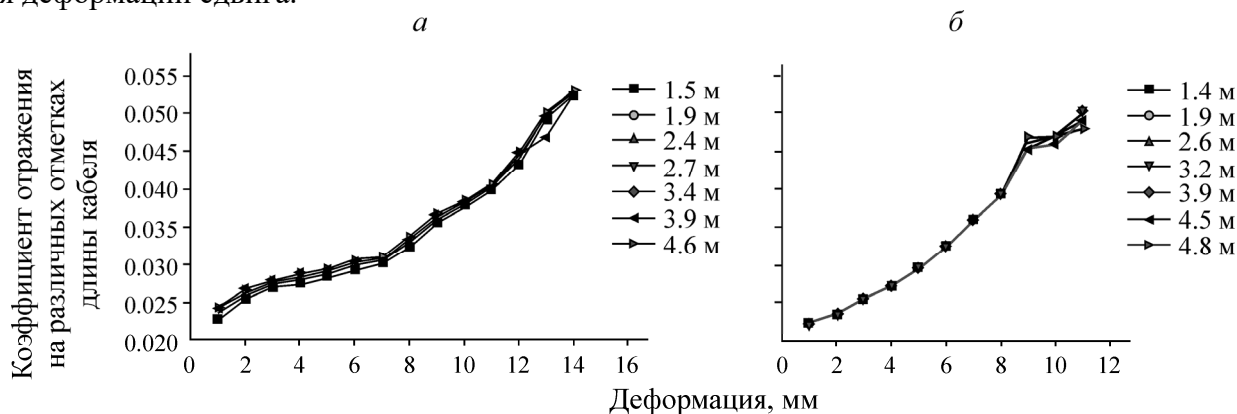


Рис. 4. Зависимость значений коэффициента отражения кабеля RG-213 (а) и кабеля RG-6 (б), снятых индикаторами часового типа, от деформации сдвига

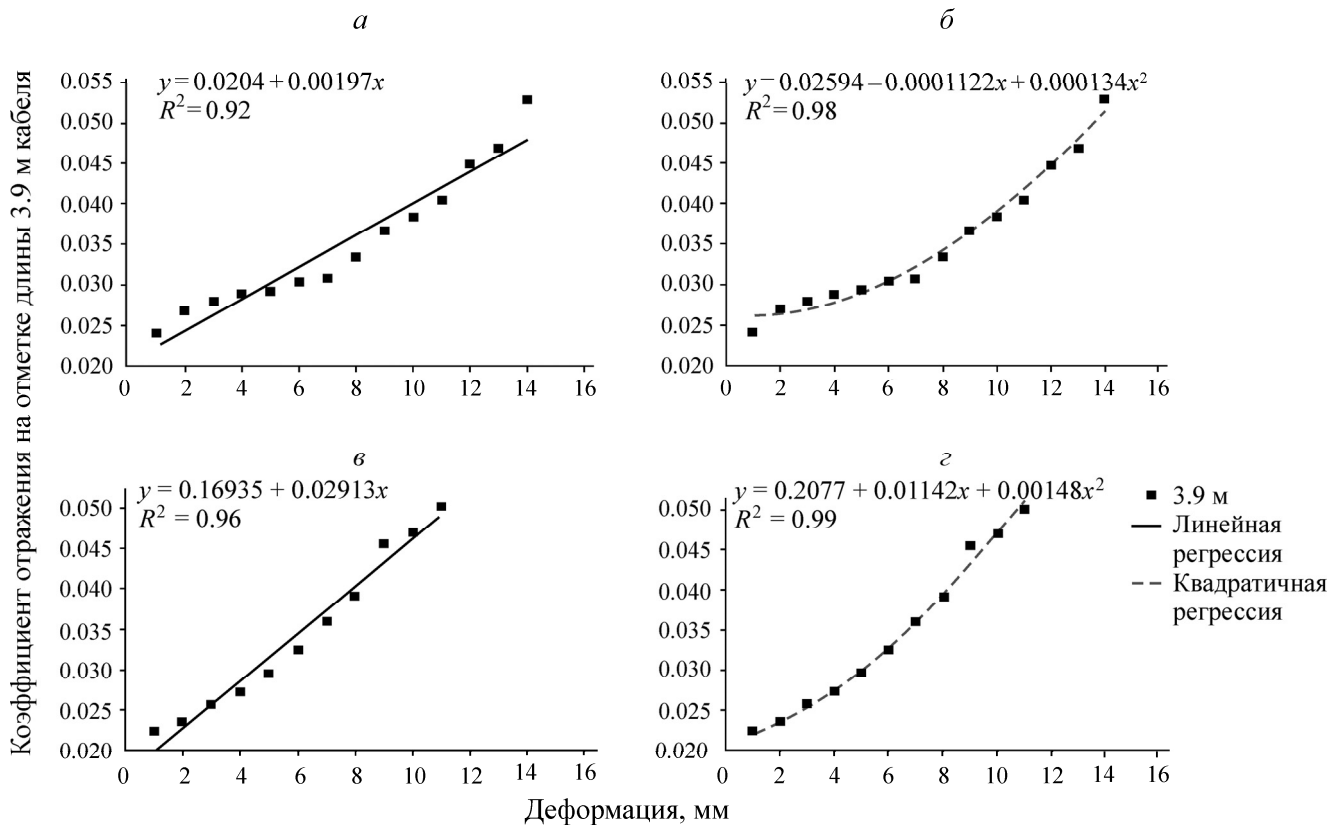


Рис. 5. Линейная и квадратичная зависимости коэффициента отражения на отметке длины 3.9 м кабеля RG-213 (а, б) и RG-6 (в, г) от деформации сдвига

ВЫВОДЫ

Проведены два эксперимента по прогнозированию разрушения борта карьера: в лабораторных условиях и в полевых. В лабораторных условиях смоделирован карьер для анализа интенсивности смещения борта. Система TDR обнаруживает смещение массива борта по деформации коаксиального кабеля, проложенного в массиве борта. Используются два типа кабелей: RG-6 и RG-213. Средняя максимальная деформация сдвига коаксиального кабеля RG-6 составила 11 мм, что соответствует коэффициенту отражения 0.49. Средняя максимальная деформация сдвига коаксиального кабеля RG-213 составила 14 мм с коэффициентом отражения 0.50. При превышении данных значений кабели разрываются. Между значениями коэффициента отражения и деформации кабеля наблюдается значительная положительная зависимость в рамках квадратичной регрессии. Кабель RG-6 более чувствителен к уровню деформаций, использование его экономически эффективнее, что делает его предпочтительным к установке на реальном карьере для мониторинга устойчивости бортов.

В ходе полевых испытаний с использованием системы TDR, коаксиального кабеля и беспроводной сети датчиков исследованы три участка карьера, предрасположенные к разрушению бортов. Участки непрерывно контролировали в течение 5 мес с помощью традиционной системы общего контроля. Наблюдения не показали значительных смещений борта. Не выявлено также различий с исходными значениями коэффициента отражения. Система TDR эффективна для продолжительного мониторинга устойчивости бортов карьеров в режиме реального времени с возможностью оценки интенсивности и местоположения деформации.

Авторы выражают благодарность руководству Национального технологического института (г. Роуркела) за оказанную поддержку, а также администрации карьера “Dongri Buzurg” компании “MOIL” (Индия) за помощь в проведении исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **O'Connor K. M. and Dowding C. H.** Geomeasurements by pulsing TDR cables and probes, CRC Press, 1999.
2. **Dowding C., Su M. B., and O'Connor K.** Measurement of rock mass deformation with grouted coaxial antenna cables, *Rock Mech. Rock Eng.*, 1989, Vol. 22, No. 1. — P. 1–23.
3. **Wahab N. S. M. A. et al.** Potential of time domain reflectometry as early warning system in slope stability monitoring project: A review, *AIP Conf. Proc.*, Penang, Malaysia, 2016, Vol. 1774, No. 1. — P. 030016.
4. **Kane W. F., Beck T. J., and Hughes J. J.** Applications of time domain reflectometry to landslide and slope monitoring, in *Second Int. Symp. and Workshop on Time Domain Reflectometry for Innovative Geotechnical Applications*, Evanston, US, 2001. — P. 305–314.
5. **Drusa M. and Bulko R.** Rock slide monitoring by using tdr inclinometers, *Civ. Environ. Eng.*, 2016, Vol. 12, No. 2. — P. 137–144.
6. **Yadav D. K., Guntha K., Singam J., and Das S. K.** Design of real-time slope monitoring system using time-domain reflectometry with wireless sensor network, *IEEE Sensors Lett.*, 2019, Vol. PP, No. 3. — P. 1–1.
7. **Su M. B. and Chen Y. J.** TDR monitoring for integrity of structural systems, *J. Infrastruct. Syst.*, 2000, Vol. 6, No. 2. — P. 67–72.
8. **Dowding C. H., Dussud M. L., Kane W. F., and O Connor K. M.** Monitoring deformation in rock and soil with TDR sensor cables, *Geotech. News*, 2003, Vol. 21, No. 2. — P. 51–59.
9. **Dowding C. H. and Huang F.** Early detection of rock movement with time domain reflectometry, *J. Geotech. Eng.*, 1994, Vol. 120, No. 8. — P. 1413–1427.
10. **Chen R., Drnevich V. P., Yu X., Nowack R. L., and Chen Y.** Time domain reflectometry surface reflections for dielectric constant in highly conductive soils, *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, 2007, Vol. 133, No. 12. — P. 1597–1608.
11. **Skierucha W., Wilczek A., Szyplowska A., Sławiński C., and Lamorski K.** A TDR-based soil moisture monitoring system with simultaneous measurement of soil temperature and electrical conductivity, *Sensors (Switzerland)*, 2012, Vol. 12, No. 10. — P. 13545–13566.
12. **Lin C.-P., Tang S.-H., Lin W.-C., and Chung C.-C.** Quantification of cable deformation with time domain reflectometry implications to landslide monitoring, *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, 2009, Vol. 135, No. 1. — P. 143–152.
13. **Singer J., Festl J., and Thuro K.** Application of time domain reflectometry (TDR) as a monitoring system for subsurface deformations, *Geol. Act.*, 2010. — P. 2459–2465.
14. **Bin Lu W., Fu H. L., and Tan H. H.** Study on application of time domain reflectometry to highway slope monitoring, in *Advanced Materials Research*, 2011, Vol. 230. — P. 1375–1378.
15. **Kane W. F.** Monitoring slope movement with time domain reflectometry, *Geotech. F. Instrum. Appl. Eng. Geol.*, 2000.
16. **Bin Su M., Chen I. H., and Liao C. H.** Using TDR cables and GPS for landslide monitoring in high mountain area, *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, 2009, Vol. 135, No. 8. — P. 1113–1121.
17. **Dowding C. H. and O'Connor.** Comparison of TDR and inclinometers for slope monitoring, *Proc. Sess. Geo-Denver 2000 — Geotech. Meas. Lab. Field, GSP 106,2000*, Vol. 294. — P. 80–90.

18. **Kumar A. and Villuri V. G. K.** Role of mining radar in mine slope stability monitoring at open cast mines, *Proc. Earth Planet. Sci.*, 2015, Vol. 11. — P. 76–83.
19. **Kumar A. and Rathee R.** Monitoring and evaluating of slope stability for setting out of critical limit at slope stability radar, *Int. J. Geo-Engineering*, 2017, Vol. 8, No. 1. — P. 18.
20. **Carlà T., Farina P., Intrieri E., Botsialas K., and Casagli N.** On the monitoring and early-warning of brittle slope failures in hard rock masses: Examples from an open-pit mine, *Eng. Geol.*, 2017, Vol. 228, No. April. — P. 71–81.
21. **Rauste Y., Lateh H. B., Mohd M. W. I. W., Lonnqvist A., Hame T., et al.** TerraSAR-X data in cut slope soil stability monitoring in Malaysia, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2012, Vol. 50, No. 9. — P. 3354–3363.
22. **de Macedo K. A. C., Ramos F. L. G., Gaboardi C., Moreira J. R., Vissirini F., and da Costa M. S.** A compact ground-based interferometric radar for landslide monitoring: The xerém experiment, *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, 2017, Vol. 10, No. 3. — P. 975–986.
23. **Luzi G. et al.** Using a ground-based SAR interferometer and a terrestrial laser scanner to monitor a snow-covered slope: Results from an experimental data collection in Tyrol (Austria), *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2009, Vol. 47, No. 2. — P. 382–393.
24. **Pieraccini M. et al.** Integration of radar interferometry and laser scanning for remote monitoring of an urban site built on a sliding slope, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2006, Vol. 44, No. 9. — P. 2335–2342.
25. **Ming Z.** A neural network application in predicting slope stability, in 2011 *Int. Conf. on Electric Information and Control Engineering*, Wuhan, China, 2011. — P. 5635–5638.
26. **Choobbasti A. J., Farrokhzad F., and Barari A.** Prediction of slope stability using artificial neural network (Case study: Noabad, mazandaran, iran), *Arab. J. Geosci.*, 2009, Vol. 2, No. 4. — P. 311–319.
27. **Elkadiri R. et al.** A remote sensing-based approach for debris-flow susceptibility assessment using artificial neural networks and logistic regression modeling, *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, 2014, Vol. 7, No. 12. — P. 4818–4835.
28. **Lin Y., Zhou K., and Li J.** Prediction of slope stability using four supervised learning methods, *IEEE Access*, 2018, Vol. 6. — P. 31169–31179.
29. **Bui D. T., Moayedi H., Gör M., Jaafari A., and Foong L. K.** Predicting slope stability failure through machine learning paradigms, *ISPRS Int. J. Geo-Information*, 2019, Vol. 8, No. 9. — P. 395.
30. **Du S., Feng G., Wang J., Feng S., Malekian R., and Li Z.** A new machine-learning prediction model for slope deformation of an open-pit mine: An evaluation of field data, *Energies*, 2019, Vol. 12, No. 7. — P. 1288.
31. **Hemalatha T., Ramesh M. V., and Rangan V. P.** Effective and accelerated forewarning of landslides using wireless sensor networks and machine learning, *IEEE Sens. J.*, 2019, Vol. 19, No. 21. — P. 9964–9975.
32. **Niu R., Wu X., Yao D., Peng L., Ai L., and Peng J.** Susceptibility assessment of landslides triggered by the lushan earthquake, April 20, 2013, China, *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, 2014, Vol. 7, No. 9. — P. 3979–3992.
33. **Kane W. F. and Beck T. J.** Instrumentation practice for slope monitoring, *Eng. Geol. Pract. North. Calif.*, 2000. — P. 1–20.
34. **Satyanarayana I., Budi G., Sen P., and Sinha A. K.** Stability evaluation of highwall slope in an opencast coal mine—a case study, *Adv. Model. Anal. A*, 2017, Vol. 78, No. 3. — P. 253–273.
35. **Nishikawa Y. et al.** Design of stable wireless sensor network for slope monitoring, *WiSNet 2018 — Proc. 2018 IEEE Top. Conf. Wirel. Sensors Sens. Networks*, 2018, Anaheim, CA, USA. — P. 8–11.
36. **Lee H. C., Ke K. H., Fang Y. M., Lee B. J., and Chan T. C.** Open-source wireless sensor system for long-term monitoring of slope movement, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 2017, Vol. 66, No. 4. — P. 767–776.

37. **Ahmed M. M., Pothalaiah S., and Sreenivasa Rao D.** Real-time monitoring of partially stable slopes for landslide prediction by using wireless sensor networks, Proc. 2016 Online Int. Conf. Green Eng. Technol. IC-GET 2016, 2016, Coimbatore, India. — P. 1–5.
38. **Wang Y., Liu Z., Wang D., Li Y., and Yan J.** Anomaly detection and visual perception for landslide monitoring based on a heterogeneous sensor network, IEEE Sens. J., 2017, Vol. 17, No. 13. — P. 4248–4257.
39. **Rawat M. S., Joshi V., Rawat B. S., and Kumar K.** Landslide movement monitoring using GPS technology: A case study of Bakthang landslide, Gangtok, East Sikkim, India, J. Dev. Agric. Econ., 2011, Vol. 3, No. 5. — P. 194–200.
40. **Prabha R., Ramesh M. V., Rangan V. P., Ushakumari P. V., and Hemalatha T.** Energy efficient data acquisition techniques using context aware sensing for landslide monitoring systems, IEEE Sens. J., 2017, Vol. 17, No. 18. — P. 6006–6018.
41. **Xu D.-S., Dong L.-J., Borana L., and Liu H.-B.** Early-warning system with quasi-distributed fiber optic sensor networks and cloud computing for soil slopes, IEEE Access, 2017, Vol. 5. — P. 25437–25444.
42. **Vanneschi C., Eyre M., Francioni M., and Coggan J.** The use of remote sensing techniques for monitoring and characterization of slope instability, Proc. Eng., 2017, Vol. 191. — P. 150–157.
43. **Hong Y., Adler R. F., and Huffman G.** An experimental global prediction system for rainfall-triggered landslides using satellite remote sensing and geospatial datasets, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 2007, Vol. 45, No. 6. — P. 1671–1680.
44. **Miller P. E. et al.** A remote sensing approach for landslide hazard assessment on engineered slopes, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 2012, Vol. 50, No. 4. — P. 1048–1056.
45. **Wang Y. Q., Zhang S. B., Chen L. L., Xie Y. L., and Wang Z. F.** Field monitoring on deformation of high rock slope during highway construction: A case study in Wenzhou, China, Int. J. Distrib. Sens. Networks, 2019, Vol. 15, No. 12. — P. 1550147719895953.
46. **Tao Z., Zhu C., Zheng X., and He M.** Slope stability evaluation and monitoring of Tonglushan ancient copper mine relics, Adv. Mech. Eng., 2018, Vol. 10, No. 8. — P. 1687814018791707.

Поступила в редакцию 23/IV 2020

После доработки 02/VIII 2020

Принята к публикации 11/IX 2020