

ЛАБОРАТОРНАЯ МЕТОДИКА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЛИНИИ ДЛЯ ПРОГНОЗА УДАРООПАСНОСТИ

А.И. Конурин¹, Д.В. Орлов¹

¹ Институт горного дела имени Н.А. Чинакала Сибирского отделения РАН,
Новосибирск, Россия, e-mail: konurin@misd.ru

Аннотация: Удароопасность при ведении подземных работ на больших глубинах остается одной из наиболее сложных проблем для оперативного прогноза динамических явлений: микросейсмический мониторинг фиксирует преимущественно динамическую стадию разрушения, тогда как подготовка опасного состояния может сопровождаться длительным накоплением квазистатических деформаций. Предложена и лабораторно апробирована методика волоконно-оптического контроля состояния измерительной линии как элемента деформационного мониторинга, как комплементарного источника к микросейсмике. Измерительная линия (одномодовое волокно стандарта G.652, 60 м) содержит локальный чувствительный участок, сформированный за счет контролируемого макроизгиба, на котором фиксируется воспроизводимое рефлектометрическое событие (локальное увеличение потерь). Контроль выполнялся методом оптической рефлектометрии во временной области на длинах волн 1310 и 1550 нм. Для задания и контроля входного динамического воздействия применен трехосевой датчик, по данным которого нормировались уровни и воспроизводимость ударных серий. По результатам построена калибровочная шкала состояний чувствительного участка, оценена повторяемость показателей дополнительных потерь при повторной укладке, а также показано, что влияние ударных серий на состояние линии проявляется в режиме усиленного изгиба и практически отсутствует при умеренном изгибе. Научная новизна работы заключается в предложении воспроизводимой лабораторной методики контроля состояния измерительной линии и набора диагностических признаков (координата события, дополнительные потери на двух длинах волн, их разность и изменения до/после воздействий), пригодных для последующего переноса в подземные условия и интеграции с микросейсмическими данными.

Ключевые слова: удароопасность, горные удары, деформационный мониторинг, волоконно-оптическая измерительная линия, оптическая рефлектометрия во временной области, макроизгиб, калибровочная шкала, повторяемость измерений, контроль качества измерительной линии, диагностические признаки.

Благодарность: Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 25-27-00034.

Для цитирования: Конурин А. И., Орлов Д. В. Лабораторная методика волоконно-оптического контроля измерительной линии для прогноза удароопасности // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 10. – С. 141–155. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_10_0_141.

Laboratory procedure of fiber optic measurement line control for rockburst hazard prediction

A.I. Konurin¹, D.V. Orlov¹

¹ N.A. Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia, e-mail: konurin@misd.ru

Abstract: Rockburst hazard in deep-level mining is yet one of the most difficult problems in real-time prediction of seismic events: microseismic monitoring chiefly captures the dynamic stage of failure while nucleation of an unsafe condition may be accompanied by long-term accumulation of quasi-static strains. This article proposes an approved laboratory procedure of fiber optic measurement line control as a complimentary tool for microseismic deformation monitoring. The measurement line (single mode fiber G.652, 60 m) contains a local sensitive stretch in the form of a controllable macrobend where a reproducible reflectometry event (local increased losses) is captured. The control method was the optical time-domain reflectometry at the wavelengths of 1310 and 1550 nm. The input dynamic effect was set and controlled by a triaxial sensor, and the sensor data were used to normalize the levels and reproducibility of the impact series. Based on the results, the calibration scale is constructed for the sensitive stretch conditions, the repeatability of additional losses in re-installation of the line is estimated, and also it is shown that the influence of the impact series on the measurement line condition shows up in the sharp bend and is absent in the moderate bend. The scientific novelty of the research lies in the reproducible lab-scale procedure for measurement line condition control and in the set of diagnostic properties (coordinate of an event, additional losses at two wavelengths, difference of the losses and their pre-impact/post-impact change) suitable for the transfer to underground conditions and for the integration with the microseismic data.

Key words: rockburst hazard, rock bursts, deformation monitoring, fiber optic measurement line, optical time-domain reflectometry, macrobend, calibration scale, measurement repeatability, measurement line quality control, diagnostic properties.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation, Grant No. 25-27-00034.

For citation: Konurin A. I., Orlov D. V. Laboratory procedure of fiber optic measurement line control for rockburst hazard prediction. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(10):141-155. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_10_0_141.

Введение

Горные удары и предшествующие им формы техногенной сейсмичности остаются одной из наиболее трудно прогнозируемых геодинамических опасностей при ведении подземных горных работ на больших глубинах. Современные обзоры показывают, что развитие опасного состояния определяется сочетанием высокого уровня напряжений, хрупкого разрушения, структурной неоднородности массива и горнотехнических

воздействий; вследствие этого универсальные пороговые критерии предупреждения не совпадают не только на различных месторождениях, но даже на разных участках одного рудника [1, 2]. Российские исследования на удароопасных объектах дополнительно подчеркивают роль геодинамически активной тектонической обстановки, техногенной нарушенности и глубины горных работ в усложнении напряженно-деформированного состояния (НДС) и росте частоты/

энергии динамических проявлений горного давления [3, 4].

Практически во всех промышленных системах контроля удароопасности ключевым инструментальным компонентом остается микросейсмический/сейсмический и сейсмоакустический мониторинг, позволяющий отслеживать очаги разрушения, пространственно-временную структуру активности и параметры сейсмозерноты выделения [5, 6]. В международной практике в последние годы заметно усилилась роль автоматизированных подходов раннего предупреждения на основе обработки микросейсмических каталогов и методов машинного обучения, что особенно востребовано при высокой интенсивности событий и необходимости оперативного управления риском [7, 8].

Вместе с тем микросейсмические данные преимущественно описывают динамическую составляющую разрушения, тогда как подготовка удароопасного состояния может включать длительную квазистатическую фазу накопления деформаций и перераспределения напряжений, не всегда сопровождаемую однозначным ростом числа событий. Поэтому в современных работах обоснован переход к многоуровневым и многопараметрическим схемам прогноза, где геофизические индикаторы активности увязываются с геомеханическими наблюдениями и процедурами регионального, локального и текущего прогноза [9, 10].

В этой логике деформационный мониторинг выступает не альтернативой, а дополнением к микросейсмике: он регистрирует непосредственно деформационный отклик массива и приконтурной зоны выработки (конвергенция, распределение деформаций по длине и контуру, скорость и ускорение деформирования), позволяя фиксировать накопление опасного состояния до начала

его проявления. Российский опыт организации геодеформационных полигонов и геомеханических наблюдений на удароопасных объектах показывает, что инструментальная фиксация геодинамики необходима для уточнения границ опасных зон, верификации профилактических мероприятий и интерпретации геофизических данных [11]. Дополнительную информацию дают исследования по локализации скрытых интервалов разуплотнения/трещиноватости и иных геомеханически значимых изменений, которые могут предшествовать визуально наблюдаемым деформациям [12]. Результаты локального прогноза по параметрам акустической эмиссии подтверждают, что предвестники опасных состояний проявляются в разных физических полях, поэтому надежность прогноза растет, когда результаты независимых измерений согласуются между собой [13].

Перспективным технологическим направлением деформационного контроля является распределенное волоконно-оптическое зондирование (DFOS), которое позволяет вести измерения вдоль протяженного участка и получать непрерывную по длине информацию о деформациях и температуре. Описан опыт реализации DFOS на горнодобывающих предприятиях [14, 15]. Этот метод позволяет фиксировать предвестники формирования потенциально опасных сценариев на больших глубинах [16]. Лабораторные эксперименты подтверждают, что по данным DFOS можно локализовать область деформаций и зафиксировать этапность разрушения [17]. Российские разработки волоконно-оптических деформометров также подчеркивают важность калибровки и учета температурного влияния [18]. Эксплуатация оптоволоконной измерительной линии требует регулярного контроля ее целостности и стабильности, в том числе с

применением OTDR-протокола (OTDR — оптическая рефлектометрия во временной области) [19].

Цель исследования — разработать и лабораторно апробировать методику волоконно-оптического контроля состояния измерительной линии с чувствительным участком, предназначенную для последующего применения в задачах деформационного мониторинга и прогноза удароопасности.

Задачи работы:

- обосновать роль деформационного мониторинга в структуре прогноза удароопасности и его комплементарность по отношению к микросейсмике с учетом современных подходов к мониторингу и раннему предупреждению;
- сформировать требования к метрологическому сопровождению волоконно-оптической измерительной линии (контроль целостности, стабильности и качества данных) и регламент OTDR-контроля, применимый при длительной эксплуатации;
- разработать лабораторную процедуру калибровки чувствительного участка по уровню контролируемого макроизгиба и оценить повторяемость измерений;
- сформулировать набор диагностических признаков для лабораторной верификации и последующего переноса методики на натурный объект с сопряжением с микросейсмическими индикаторами.

Материалы и методы

Лабораторный эксперимент направлен на отработку методики волоконно-оптического контроля состояния измерительной линии в условиях, моделирующих типовые эксплуатационные факторы подземных работ: локальные изменения геометрии и условий закрепления кабеля (модельный эквивалент квазистатических деформационных воз-

действий); импульсные вибрационные воздействия (модельный эквивалент динамических воздействий — вибрации, ударные нагрузки, последствия взрывания). Основным методом измерений выступает OTDR, позволяющая локализовать неоднородности и количественно оценивать изменения потерь вдоль волокна по сигналам обратного рассеяния и отражения [20, 21].

В эксперименте уровень импульсного воздействия контролируется трехосевым датчиком, а изменение состояния линии на чувствительном участке оценивается по OTDR-трассам до и после серий воздействий. OTDR не применяется для регистрации удара в моменте; фиксируются последствия воздействия — появление/усиление локальных потерь, смещение/возникновение событий и иные признаки изменения геометрии линии или деградации закрепления.

При постановке лабораторного эксперимента применялось следующее оборудование. Волоконно-оптический канал: оптический рефлектометр РЕЙС-750 (1310/1550 нм) и испытательная линия (оптический кабель) длиной 60 м. Для работы на коротких линиях использовались режимы, обеспечивающие корректную локализацию событий вне мертвых зон; паспортные характеристики прибора (динамический диапазон, мертвые зоны по событиям и по затуханию) учитывались при выборе режима измерений. Вибрационный канал: трехосевой сейсмодатчик BLAST-UM, жестко закрепленный на основании стенда. Датчик применяется для измерения и контроля повторяемости импульсного воздействия (амплитуда/энергия удара). Механическая часть стенда: жесткое основание (гипсовая плита), сменные оправки/шаблоны радиуса R_1 и R_2 для создания на оптоволокне чувствительного участка за счет формирования макроизгиба. Состав оборудования и роль

компонентов в экспериментальной постановке приведены в табл. 1.

Оптическая линия закреплялась внутри гипсовой плиты, исключаяющей смещение трассы между сериями. На линии выделялся свободный чувствительный участок длиной 1,0 м, расположенный на удалении от входного разъема таким образом, чтобы созданная локальная неоднородность корректно наблюдалась на OTDR-трассе вне мертвых зон.

Чувствительный участок переводился в заданные состояния посредством укладки кабеля на оправки заданного радиуса. Для диагностики изгибных потерь выполнялось сравнение OTDR-трасс на 1310 и 1550 нм; разность откликов на двух длинах волн используется для выявления макроизгибов и повышения достоверности интерпретации [22].

Трехосевой датчик устанавливался на основании в неизменном положении; на основании фиксировалась точка приложения ударного воздействия (одна и та же для всех серий).

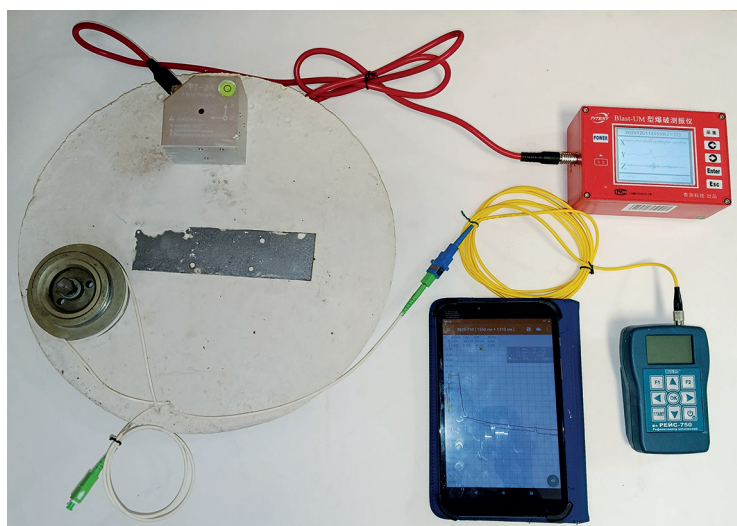
Для калибровки состояния чувствительного участка по OTDR формировались три дискретных состояния чувствительного участка: S_0 — без дополнительного изгиба (база); S_1 — макроизгиб на оправке радиуса $R_1 = 30$ мм; S_2 — макроизгиб на оправке радиуса $R_2 = 18$ мм. Для каждого состояния регистрировались OTDR-трассы на 1310 и 1550 нм с последующим определением координаты события и величины локальной дополнительной потери $\Delta\text{Loss}(\lambda)$ (dB). Дополнительно рассчитывалась диагностическая разность $\Delta\text{Loss}(1550) - \Delta\text{Loss}(1310)$. Для оценки воспроизводимости выполнялась повторная укладка кабеля на уровнях S_1 и S_2 с повторной регистрацией трасс и оценкой разброса ΔLoss .

Для оценки влияния импульсных вибрационных воздействий на состояние измерительной линии испытания вы-

полнялись в двух режимах: при рабочем состоянии чувствительного участка S_1 и при стресс-режиме S_2 . Для каждого режима последовательно выполнялись две серии ударных воздействий различной интенсивности: L_1 (умеренная) и L_2 (усиленная). Каждая серия включала $N = 50$ повторов с нанесением ударов в фиксированную точку основания. Во время каждой серии регистрировались трехосевые временные ряды; уровень воздействия контролировался по пиковой амплитуде на оси Z (нормальная к плоскости основания). Одинаковые целевые уровни L_1 и L_2 поддерживались при испытаниях в режимах S_1 и S_2 .

OTDR-контроль выполнялся для каждого режима (S_1 и S_2) трижды: до начала ударных серий, после серии L_1 и после серии L_2 . На каждом этапе снимались трассы на 1310 и 1550 нм. Сравнивались изменение ΔLoss на чувствительном участке ($\Delta\Delta\text{Loss}$), возможное смещение координаты события и появление новых локальных событий/аномалий на трассе. Под событием на OTDR-трассе далее понимается локализованное по расстоянию изменение уровня/наклона трассы (локальное увеличение затухания), соответствующее макроизгибу на чувствительном участке. Из OTDR-данных извлекались: координата чувствительного участка, $\Delta\text{Loss}(1310)$, $\Delta\text{Loss}(1550)$, разность $\Delta\text{Loss}(1550) - \Delta\text{Loss}(1310)$, а также $\Delta\Delta\text{Loss}$ после серий L_1 и L_2 . Из записей сейсмодатчика вычислялись показатели, описывающие ударное воздействие (Peak — пиковая амплитуда, RMS — среднеквадратичное значение).

Критерием устойчивости измерительной линии при импульсных воздействиях служит отсутствие существенных изменений OTDR-показателей после серий L_1/L_2 : малое $|\Delta\Delta\text{Loss}|$ на чувствительном участке и отсутствие новых событий/смещения координаты. Рост $\Delta\Delta\text{Loss}$ и/или появление новых собы-



- 1 – рефлектометр РЕЙС-750; 2 – измерительная линия (60 м, G.652); 3 – чувствительный участок (S_0-S_2);
 4 – оправки радиуса R_1 / R_2 ; 5 – точка нанесения ударных воздействий;
 6 – трехосевой датчик BLAST-UM; 7 – направления осей X, Y, Z

Рис. 1. Лабораторная экспериментальная постановка волоконно-оптического контроля
 Fig. 1. Laboratory setup of fiber-optic line state control

тий трактуются как индикатор влияния вибрации на состояние линии (ослабление крепления, формирование микроперегибов и др.).

Ограничение лабораторной постановки состоит в том, что OTDR-канал интерпретируется как индикатор состояния измерительной линии и локальных потерь, формируемых контролируемым

макроизгибом, а не как прямое измерение распределенных деформаций массива.

Полученные протоколы калибровки, контроля качества линии и набор признаков рассматриваются как этап отработки методики перед переносом в натурные условия на специализированные DFOS-решения.

Таблица 1

Состав оборудования и роль компонентов в эксперименте
Equipment and roles in the experiment

Компонент	Модель/параметры	Назначение
OTDR (измерительный модуль)	РЕЙС-750; 1310/1550 нм	Снятие OTDR-трасс; локализация событий и оценка потерь $\Delta Loss(\lambda)$
Оптическая измерительная линия	Оптический кабель G.652, 60 м	Контролируемый измерительный канал; база для OTDR-контроля
Чувствительный участок	1,0 м; оправки радиуса R_1 / R_2	Формирование воспроизводимого события макроизгиба (S_0-S_2)
Датчик контроля воздействия	Трехосевой сейсмоматчик BLAST-UM	Контроль уровня и повторяемости ударных серий L_1 / L_2 (PeakZ, RMSZ)
Основание и крепление	Гипсовая плита	Стабилизация геометрии укладки и повторяемость эксперимента

Таблица 2

**Диагностические признаки по OTDR и по контролю воздействия
в лабораторной постановке**
Diagnostic features from OTDR and input control in the laboratory setup

Признак	Определение	Интерпретация и назначение
$\Delta\text{Loss}(1310)$, $\Delta\text{Loss}(1550)$	Дополнительная потеря на событии в зоне x_{sens} по OTDR-трассе, dB	Калибровочный индикатор состояния чувствительного участка (S_0 – S_2)
$\Delta\text{Loss}(1550)$ – $\Delta\text{Loss}(1310)$	Разность потерь на двух длинах волн, dB	Признак изгибных потерь и фильтр ложных интерпретаций (диагностика макроизгиба)
x_{sens} , Δx	Координата события по трассе и ее смещение между сериями, м	Контроль геометрической стабильности/смещения чувствительного участка
$\Delta\Delta\text{Loss}$ после L_1 / L_2	$\Delta\Delta\text{Loss} = \Delta\text{Loss}$ после – ΔLoss до для серий L_1 / L_2 , dB	Критерий устойчивости линии и крепления к импульсным воздействиям; порог задается по повторяемости
Новые события на трассе	Появление дополнительных локальных неоднородностей/рост отражений	Маркер деградации линии (микрорегиб, ослабление крепежа, нестабильность соединителей)
PeakZ, RMSZ (L_1 / L_2)	Пиковая/энергетическая метрика вибраций по оси Z, статистика по серии	Нормирование входного воздействия и контроль воспроизводимости ударных серий

Лабораторная экспериментальная постановка приведена на рис. 1, состав оборудования — см. табл. 1, перечень используемых диагностических признаков — в табл. 2.

Результаты

На первом этапе сформирована базовая OTDR-картина измерительной линии при состоянии S_0 (без дополнительного макроизгиба). Базовые трассы на 1310 и 1550 нм характеризуются стабильным уровнем обратного рассеяния вдоль линии и отсутствием выраженных локальных аномалий в области чувствительного участка. Координата чувствительного участка по трассе составила $x_{\text{sens}} = 28$ м и использовалась далее для сопоставления всех серий измерений. Пример базовой OTDR-трассы приведен на рис. 2. Наблюдаемые локальные пики на трассе соответствуют началу и слепой зоне (1), концу трассы (3) и чувствительному участку (2).

Перевод линии в состояния S_1 и S_2 (укладка чувствительного участка на оправки радиуса R_1 и R_2 соответственно) приводил к формированию устойчивого локального события на OTDR-трассе в районе x_{sens} . Количественно эффект описан величиной дополнительной потери на событии $\Delta\text{Loss}(\lambda)$. Для обоих каналов (1310/1550 нм) наблюдался рост ΔLoss при переходе $S_0 \rightarrow S_1 \rightarrow S_2$, причем на длине волны 1550 нм эффект выражен сильнее. Это проявлялось в увеличении разности $\Delta\text{Loss}(1550) - \Delta\text{Loss}(1310)$, что соответствует диагностике изгибных потерь по двуволновому сравнению [22]. Показатели приведены в табл. 3, зависимость — на рис. 3.

Для оценки воспроизводимости методики выполнена повторная укладка кабеля на уровнях S_1 и S_2 с повторным снятием OTDR-трасс. Для S_1 разброс дополнительной потери составил $\sigma_{1310} = 0,005$ dB и $\sigma_{1550} = 0,013$ dB (коэффициент вариации $CV \approx 11,9\%$ и $10,7\%$

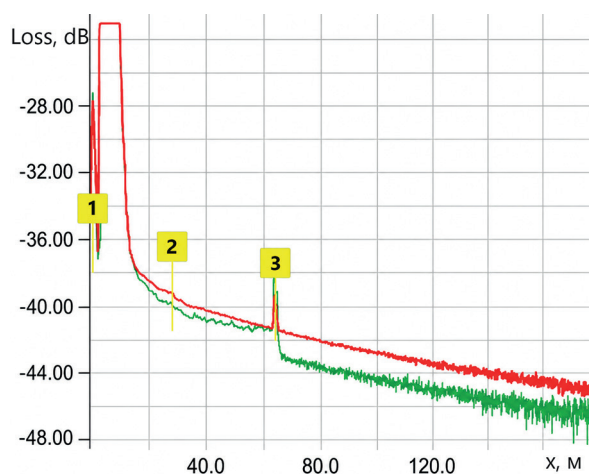


Рис. 2. OTDR-трассы измерительной линии в базовом состоянии S_0 на длинах волн 1310 и 1550 нм (верхняя и нижняя кривые, соответственно) и положение чувствительного участка x_{sens}

Fig. 2. OTDR traces of the measurement line in the baseline state S_0 at 1310 and 1550 nm (curves 1 and 2, respectively); position of the sensitive segment x_{sens}

Таблица 3

Показатели OTDR на чувствительном участке для состояний S_0-S_2

OTDR indicators in the sensitive area for states S_0-S_2

Состояние	$\Delta\text{Loss}(1310)$, dB	$\Delta\text{Loss}(1550)$, dB	$\Delta\text{Loss}(1550) - \Delta\text{Loss}(1310)$, dB
S_0 (без изгиба)	0,01	0,01	0,00
S_1 (умеренный изгиб)	0,042	0,122	0,080
S_2 (выраженный изгиб)	0,098	0,340	0,242

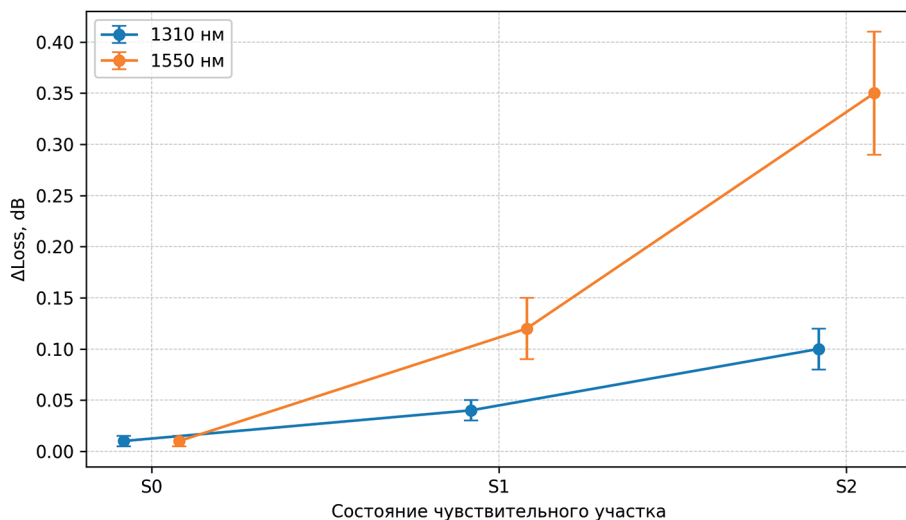


Рис. 3. Зависимость показателей $\Delta\text{Loss}(\lambda)$ от состояния чувствительного участка (S_0-S_2) на 1310 и 1550 нм

Fig. 3. Calibration dependence of $\Delta\text{Loss}(\lambda)$ on the sensitive segment state (S_0-S_2) at 1310 and 1550 nm

Таблица 4

Оценка повторяемости OTDR-показателей ΔLoss **при повторной укладке чувствительного участка****Repeatability of ΔLoss under repeated laying of the sensitive segment**

Состояние	№ повтора	$\Delta\text{Loss}(1310)$, dB	$\Delta\text{Loss}(1550)$, dB	$\Delta\text{Loss}(1550) - \Delta\text{Loss}(1310)$, dB
S_1	1	0,040	0,120	0,080
S_1	2	0,047	0,135	0,088
S_1	3	0,038	0,110	0,072
S_1 (ср.)	—	0,042	0,122	0,080
S_1 (σ)	—	0,005	0,013	0,008
S_1 (CV, %)	—	11,9%	10,7%	10,0%
S_2	1	0,095	0,330	0,235
S_2	2	0,110	0,380	0,270
S_2	3	0,090	0,310	0,220
S_2 (ср.)	—	0,098	0,340	0,242
S_2 (σ)	—	0,011	0,036	0,025
S_2 (CV, %)	—	11,1%	10,6%	10,3%

соответственно); для S_2 — $\sigma_{1310} = 0,011$ dB и $\sigma_{1550} = 0,036$ dB (CV $\approx 11,1\%$ и $10,6\%$). Полученная оценка повторяемости использовалась как ориентир при интерпретации значимости изменений ΔLoss после серий импульс-

ных воздействий. Данные повторяемости приведены в табл. 4.

Серии ударных воздействий L_1 и L_2 выполнялись в фиксированной точке. Уровень и воспроизводимость импульсного воздействия контролировались трех-

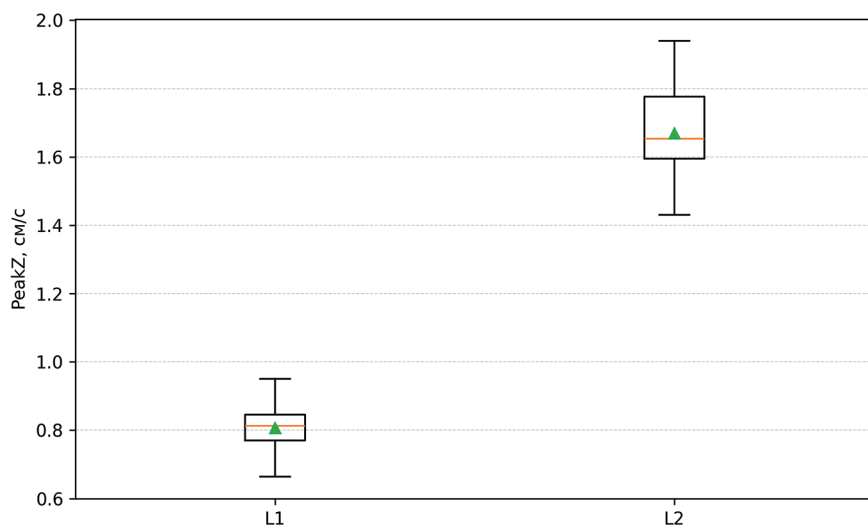
Рис. 4. Распределение PeakZ по сериям ударных воздействий L_1 и L_2 , мм/с ($N=50$)Fig. 4. PeakZ distribution for impact series L_1 and L_2 , mm/s ($N=50$)

Таблица 5

Контроль уровня и воспроизводимости ударных серий по данным трехосевого датчика

Control of the level and repeatability of impact series based on the three-axis sensor

Серия	PeakZ, ср., мм/с	PeakZ, σ	CV (PeakZ), %	RMSZ, ср., мм/с	RMSZ, σ	CV (RMSZ), %	Отношение уровней (к L_1)
L_1 (умеренная)	8	0,7	8,8	1,8	0,2	11,1	1,00
L_2 (усиленная)	17	1,6	9,4	3,8	0,4	10,5	2,13

осевым датчиком по метрикам PeakZ (пиковая амплитуда виброскорости по оси Z) и RMSZ (среднеквадратичное значение виброскорости по оси Z), мм/с, на заданном временном окне. Средний уровень серии L_2 превышал L_1 в $k = 2,13$ раза по PeakZ (рис. 4), при этом внутрисерийная вариативность не превышала около 10% ($CV(\text{PeakZ}) = 8,8\%$ для L_1 и $9,4\%$ для L_2), что обеспечило корректное сопоставление OTDR-показателей «до/после» воздействий (табл. 5).

OTDR-измерения выполнялись до начала ударных серий, после серии L_1 и после серии L_2 без изменения геометрии укладки чувствительного участка. При состоянии S_1 изменения потерь на событии после L_1 составили $\Delta\Delta\text{Loss}_{L_1}(1310) = +0,003$ dB и $\Delta\Delta\text{Loss}_{L_1}(1550) = +0,006$ dB, а после L_2 –

$\Delta\Delta\text{Loss}_{L_2}(1310) = +0,006$ dB и $\Delta\Delta\text{Loss}_{L_2}(1550) = +0,012$ dB; новых событий на трассе не выявлено. При состоянии S_2 после L_1 наблюдались изменения $\Delta\Delta\text{Loss}_{L_1}(1310) = +0,014$ dB и $\Delta\Delta\text{Loss}_{L_1}(1550) = +0,055$ dB, а после L_2 – $\Delta\Delta\text{Loss}_{L_2}(1310) = +0,062$ dB и $\Delta\Delta\text{Loss}_{L_2}(1550) = +0,200$ dB; в отдельных сериях фиксировалось локальное новое событие/усиление существующего события. Смещение координаты события не превышало 0,1 м. Обобщенные значения приведены в табл. 6.

По результатам эксперимента сформирован минимальный набор признаков для контроля состояния измерительной линии с чувствительным участком: OTDR-признаки состояния: x_{sens} , $\Delta\text{Loss}(1310)$, $\Delta\text{Loss}(1550)$, $\Delta\text{Loss}(1550) - \Delta\text{Loss}(1310)$; признаки устойчивости к

Таблица 6

Изменение OTDR-показателей на чувствительном участке

до и после серий ударных воздействий L_1/L_2

Changes in OTDR values in the sensitive area before and after the L_1/L_2 series of impacts

Состояние	Этап измерения	$\Delta\text{Loss}(1310)$, dB	$\Delta\text{Loss}(1550)$, dB	$\Delta\text{Loss}(1550) - \Delta\text{Loss}(1310)$, dB	$\Delta\Delta\text{Loss}(1310)$, dB	$\Delta\Delta\text{Loss}(1550)$, dB	Новые события на трассе	Смещение координаты события
S_1	до серий	0,042	0,122	0,080	—	—	нет	нет
S_1	после L_1	0,045	0,128	0,083	+0,003	+0,006	нет	нет
S_1	после L_2	0,048	0,134	0,086	+0,006	+0,012	нет	нет
S_2	до серий	0,098	0,340	0,242	—	—	нет	нет
S_2	после L_1	0,112	0,395	0,283	+0,014	+0,055	нет	нет
S_2	после L_2	0,160	0,540	0,380	+0,062	+0,200	да* (локальное)	нет ($\leq 0,1$ м)

* Примечание: появление нового события фиксировалось не во всех сериях; в ряде случаев эффект проявлялся как усиление существующего события на чувствительном участке.

динамическим воздействиям: $\Delta\Delta\text{Loss}$ после L_1/L_2 , появление новых событий и/или смещение координаты события.

Обсуждение результатов

Полученные результаты демонстрируют работоспособность лабораторной методики волоконно-оптического контроля состояния измерительной линии. Переход от состояния S_0 к состояниям S_1 и S_2 сопровождался формированием локального события на OTDR-трассе в области координаты $x_{\text{sens}} = 28$ м и ростом дополнительной потери $\Delta\text{Loss}(\lambda)$. Сопоставление трасс на 1310 и 1550 нм выявило повышенную чувствительность 1550 нм к изгибным потерям: для S_1 разность $\Delta\text{Loss}(1550) - \Delta\text{Loss}(1310)$ составила 0,080 dB, для $S_2 - 0,242$ dB, что подтверждает целесообразность двухволновых измерений для диагностики изгибных эффектов.

Оценка повторяемости формирования состояния при повторной укладке задает границу различимости эффектов. Для S_1 разброс ΔLoss составил $\sigma_{1310} = 0,005$ dB и $\sigma_{1550} = 0,013$ dB; для $S_2 - \sigma_{1310} = 0,011$ dB и $\sigma_{1550} = 0,036$ dB (см. табл. 4). С практической точки зрения эти значения определяют уровень изменений ΔLoss , сопоставимый с вариативностью укладки/контактов. Дополнительно стабильность координаты события (смещение не более 0,1 м) служит признаком того, что эффект связан с заданным чувствительным участком.

Серии импульсных воздействий L_1 и L_2 позволили интерпретировать состояние измерительной линии в условиях динамического воздействия на стэнд. Вибрационный канал задавал измеримый уровень внешнего воздействия: средние значения PeakZ составили 8,0 мм/с для L_1 и 17,0 мм/с для L_2 , при внутрисерийной вариативности порядка 10% (см. табл. 5). При состоянии S_1 изменения OTDR-показателей после L_1/L_2

были малы ($\Delta\Delta\text{Loss}_{1550} \leq 0,012$ dB) и не сопровождалась появлением новых событий, что соответствует устойчивости линии при выбранной фиксации. В стресс-режиме S_2 после L_2 фиксировалось существенное увеличение потерь ($\Delta\Delta\text{Loss}_{1550} = +0,200$ dB) и в отдельных сериях — локальное новое событие/усиление существующего события на чувствительном участке (см. табл. 6).

Для описания состояния измерительной линии с чувствительным участком информативны: координата события x_{sens} , величины $\Delta\text{Loss}(1310)$ и $\Delta\text{Loss}(1550)$, а также их разность $\Delta\text{Loss}(1550) - \Delta\text{Loss}(1310)$. Для оценки устойчивости состояния при динамических воздействиях — изменения $\Delta\Delta\text{Loss}$ после серий L_1/L_2 , появление новых событий и возможное смещение координаты события.

Интерпретация OTDR-показателей в данной постановке относится к состоянию измерительной линии и локальным изменениям потерь на чувствительном участке, сформированным контролируемым макроизгибом и воздействиями на стэнд. При переносе методики на натурные объекты и/или на специализированные распределенные решения в качестве ключевого сохраняется принцип: деформационно-связанные изменения состояния измерительной линии должны выделяться на фоне монтажных, температурных и аппаратных факторов посредством калибровки, контроля качества и устойчивых диагностических признаков. В частности, должны учитываться влияние соединителей и качество стыков, выбор параметров режима OTDR (длина импульса, усреднение, учет мертвых зон), а также температурные влияния при переходе к длительным наблюдениям. Лабораторные результаты задают основу для формализации протокола измерений, критериев повторяемости и признаков, которые могут быть использованы на последу-

ющих этапах — при расширении геометрии измерительных линий, усложнении схемы крепления и накоплении данных в условиях реальных горнотехнических воздействий, с последующим сопряжением с микросейсмическими индикаторами в многопараметрических схемах прогноза удароопасности.

Заключение

Разработана и лабораторно апробирована методика волоконно-оптического контроля состояния измерительной линии на основе OTDR с выделением локального чувствительного участка и регламентом калибровки, контроля качества и выделения диагностических признаков, предназначенная для последующего переноса в подземные условия.

Показана воспроизводимая связь между уровнем контролируемого макроизгиба (состояния S_0-S_2) и OTDR-метриками $\Delta\text{Loss}(1310)$ и $\Delta\text{Loss}(1550)$. Использование двух длин волн обеспечивает диагностическую устойчивость к изгибным потерям и повышает интерпретируемость результатов через показатель $\Delta\text{Loss}(1550) - \Delta\text{Loss}(1310)$. В лабораторной постановке уровень импульсного воздействия нормировался по данным трехосевого датчика, а со-

стояние измерительной линии оценивалось по OTDR-трассам до и после серий воздействий. Это обеспечило сопоставимость серий и корректную интерпретацию изменений ΔLoss как отклика линии на заданное динамическое воздействие.

Сформирован минимальный набор диагностических признаков для контроля состояния линии и чувствительного участка: x_{sens} , $\Delta\text{Loss}(\lambda)$, $\Delta\text{Loss}(1550) - \Delta\text{Loss}(1310)$, а также $\Delta\Delta\text{Loss}$ после L_1/L_2 , появление новых событий и смещение координаты события. Указанные признаки позволяют формализовать критерии устойчивости/деградации измерительной линии и задать основу для дальнейшего расширения методики.

Ограничения лабораторной постановки состоят в том, что OTDR-показатели интерпретируются как индикаторы состояния измерительной линии и локальных потерь, а не как прямые измерения распределенных деформаций массива. Перенос методики в подземные выработки требует натурной верификации, адаптации схемы крепления, учета температурных факторов и согласования деформационно-связанных признаков с микросейсмическими индикаторами в составе многопараметрического прогноза удароопасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. He X.-Q., Zhou C., Song D.-Z., Li Z.-L., Cao A.-Y., He S.-Q., Khan M. Mechanism and monitoring and early warning technology for rockburst in coal mines // International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. 2021, vol. 28, pp. 1097 – 1111. DOI: 10.1007/s12613-021-2267-5.
2. Du K., Bi R., Khandelwal M., Li G., Zhou J. Occurrence mechanism and prevention technology of rockburst, coal bump and mine earthquake in deep mining // Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources. 2024, vol. 10, article 98. DOI: 10.1007/s40948-024-00768-8.
3. Сидоров Д. В., Потапчук М. И., Сидляр А. В., Курсакин Г. А. Оценка удароопасности при освоении глубоких горизонтов Николаевского месторождения // Записки Горного института. — 2019. — Т. 238. — С. 392 – 398. DOI: 10.31897/PMI.2019.4.392.
4. Ломов М. А., Сидляр А. В. Оценка факторов удароопасности Николаевского месторождения с помощью системы 3D-моделирования результатов сейсмоакустического мониторинга // Проблемы недропользования. — 2021. — № 1 (28). — С. 64 – 72. DOI: 10.25635/2313-1586.2021.01.064.

5. Еременко А. А., Мулев С. Н., Штирц В. А. Мониторинг геодинамических явлений микро-сейсмическим методом при освоении удароопасных месторождений // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2022. — № 1. — С. 12–22. DOI: 10.15372/FTPRP120220102.

6. Журавлева О. Г., Жукова С. А. Исследование пространственно-временных закономерностей развития сейсмической активности в подработанном массиве горных пород на Расвумчоррском руднике // Горная промышленность. — 2024. — № 3. — С. 105–111. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-3-105-111.

7. Mu H., Song D., He X., Li Z., Su D., Xue Y. Regional local integrated rockburst monitoring and early warning for multi-seam mining // Journal of Geophysics and Engineering. 2021, vol. 18, no. 5, pp. 725–739. DOI: 10.1093/jge/gxab048.

8. Tang S., Wang J., Tang L., Ding S. Automatic early warning of rockbursts from microseismic events by learning the feature-augmented point cloud representation // Tunnelling and Underground Space Technology. 2024, vol. 147, article 105692. DOI: 10.1016/j.tust.2024.105692.

9. Разумов Е. Е., Простов С. М., Шабанов Е. А. Региональный, локальный и текущий прогноз удароопасности участков угольного пласта по данным сейсмического мониторинга // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2024. — Т. 335. — № 8. — С. 174–186. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4420.

10. Разумов Е. Е., Рукавишников Г. Д., Мулев С. Н., Простов С. М. Основные принципы построения систем сейсмического мониторинга при отработке удароопасных угольных пластов // Горный журнал. — 2021. — № 1. — С. 8–12. DOI: 10.17580/gzh.2021.01.02.

11. Долгих А. С., Сенюк В. В., Коновалов О. Л. Создание системы геомеханического обеспечения подземных горных работ при разработке Старобинского месторождения // Горный журнал. — 2018. — № 8. — С. 42–47. DOI: 10.17580/gzh.2018.08.01.

12. Данилев С. М., Секерина Д. Д., Данилева Н. А. Локализация участков развития геомеханических процессов в подземных выработках на основе трансформационно-классификационного анализа данных сейсморазведки // Записки Горного института. — 2024. — Т. 266. — С. 260–271.

13. Nosov V. V., Borovkov A. I., Artyushchenko A. P. Predicting rock bursts in rock mass blocks using acoustic emission // Resources. 2022, vol. 11, no. 10, article 87. DOI: 10.3390/resources11100087.

14. Zhang X., Zhu H., Jiang X., Broere W. Distributed fiber optic sensors for tunnel monitoring: a state-of-the-art review // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2024, vol. 16, no. 9, pp. 3841–3863. DOI: 10.1016/j.jrmge.2024.01.008.

15. Monsberger C. M., Bauer P., Buchmayer F., Lienhart W. Large-scale distributed fiber optic sensing network for short and long-term integrity monitoring of tunnel linings // Journal of Civil Structural Health Monitoring. 2022, vol. 12, pp. 1317–1327. DOI: 10.1007/s13349-022-00560-w.

16. Xie J., Qu Q., Zhu W., Wang X., Xu J., Ning S., Hou T., Luo X. Distributed strain monitoring of overburden delamination propagation at a deep longwall mine // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2023, vol. 171, article 105589. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2023.105589.

17. Salazar Vásquez A., Rabaiotti C., Germanovich L. N., Puzrin A. M. Distributed fiber optics measurements of rock deformation and failure in triaxial tests // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2022, vol. 127, e2022JB023997. DOI: 10.1029/2022JB023997.

18. Мехтиев А. Д., Юрченко А. В., Калытка В. А., Нешина Е. Г., Алкина А. Д., Мадн П. Ш. Волоконно-оптический длиннобазный деформометр для мониторинга деформаций бортов карьеров // Письма в журнал технической физики. — 2022. — Т. 48. — № 15. DOI: 10.21883/PJTF.2022.15.53129.19200.

19. Liu H., Zhao T., Zhang M. OTDR development based on single-mode fiber fault detection // Sensors. 2025, vol. 25, article 4284. DOI: 10.3390/s25144284.

20. Di Y., Wang E., Li Z., Liu X., Huang T., Yao J. Comprehensive early warning method of microseismic, acoustic emission, and electromagnetic radiation signals of rock burst based on deep learning // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2023, vol. 170, article 105519. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2023.105519.

21. Huang S., Meng X., Zhao G., Cheng X., Wang X., Xia K. Distributed fiber optic sensing for monitoring mining-induced overburden deformation // Coatings. 2025, vol. 15, article 1317. DOI: 10.3390/coatings15111317.

REFERENCES

1. He X.-Q., Zhou C., Song D.-Z., Li Z.-L., Cao A.-Y., He S.-Q., Khan M. Mechanism and monitoring and early warning technology for rockburst in coal mines. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2021, vol. 28, pp. 1097–1111. DOI: 10.1007/s12613-021-2267-5.
2. Du K., Bi R., Khandelwal M., Li G., Zhou J. Occurrence mechanism and prevention technology of rockburst, coal bump and mine earthquake in deep mining. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*. 2024, vol. 10, article 98. DOI: 10.1007/s40948-024-00768-8.
3. Sidorov D. V., Potapchuk M. I., Sidlyar A. V., Kursakin G. A. Assessment of rockburst hazard in deep layer mining at the Nikolayevskoye deposit. *Journal of Mining Institute*. 2019, vol. 238, pp. 392–398. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2019.4.392.
4. Lomov M. A., Sidlyar A. V. Assessment of rockburst hazard factors at the Nikolayevskoye deposit using 3D modelling of seismoacoustic monitoring results. *Problems of Subsoil Use*. 2021, no. 1 (28), pp. 64–72. [In Russ]. DOI: 10.25635/2313-1586.2021.01.064.
5. Eremenko A. A., Mulev S. N., Shtirts V. A. Monitoring of geodynamic phenomena by the microseismic method during development of rockburst-hazardous deposits. *Journal of Mining Sciences*. 2022, no. 1, pp. 12–22. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPRPI20220102.
6. Zhuravleva O. G., Zhukova S. A. Studies of the spatial and temporal patterns of seismic activity development in the undermined rock mass at the Rasvumchorr mine. *Russian Mining Industry Journal*. 2024, no. 3, pp. 105–111. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-3-105-111.
7. Mu H., Song D., He X., Li Z., Su D., Xue Y. Regional local integrated rockburst monitoring and early warning for multi-seam mining. *Journal of Geophysics and Engineering*. 2021, vol. 18, no. 5, pp. 725–739. DOI: 10.1093/jge/gxab048.
8. Tang S., Wang J., Tang L., Ding S. Automatic early warning of rockbursts from microseismic events by learning the feature-augmented point cloud representation. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2024, vol. 147, article 105692. DOI: 10.1016/j.tust.2024.105692.
9. Razumov E. E., Prostov S. M., Shabanov E. A. Regional, local and current rockburst hazard forecast of coal seam sections based on seismic monitoring. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2024, vol. 335, no. 8, pp. 174–186. [In Russ]. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4420.
10. Razumov E. E., Rukavishnikov G. D., Mulev S. N., Prostov S. M. Basic principles for building seismic monitoring systems in rockburst-hazardous coal seam mining. *Gornyi Zhurnal*. 2021, no. 1, pp. 8–12. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2021.01.02.
11. Dolgikh A. S., Senyuk V. V., Kononov O. L. Creation of a geomechanical support system for underground mining during development of the Starobin deposit. *Gornyi Zhurnal*. 2018, no. 8, pp. 42–47. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2018.08.01.
12. Danilev S. M., Sekerina D. D., Danileva N. A. Localization of geomechanical process development areas in underground workings based on transformational-classification analysis of seismic survey data. *Journal of Mining Institute*. 2024, vol. 266, pp. 260–271. [In Russ].
13. Nosov V. V., Borovkov A. I., Artyushchenko A. P. Predicting rock bursts in rock mass blocks using acoustic emission. *Resources*. 2022, vol. 11, no. 10, article 87. DOI: 10.3390/resources11100087.
14. Zhang X., Zhu H., Jiang X., Broere W. Distributed fiber optic sensors for tunnel monitoring: a state-of-the-art review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2024, vol. 16, no. 9, pp. 3841–3863. DOI: 10.1016/j.jrmge.2024.01.008.
15. Monsberger C. M., Bauer P., Buchmayer F., Lienhart W. Large-scale distributed fiber optic sensing network for short and long-term integrity monitoring of tunnel linings. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*. 2022, vol. 12, pp. 1317–1327. DOI: 10.1007/s13349-022-00560-w.
16. Xie J., Qu Q., Zhu W., Wang X., Xu J., Ning S., Hou T., Luo X. Distributed strain monitoring of overburden delamination propagation at a deep longwall mine. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2023, vol. 171, article 105589. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2023.105589.
17. Salazar Vásquez A., Rabaiotti C., Germanovich L. N., Puzrin A. M. Distributed fiber optics measurements of rock deformation and failure in triaxial tests. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2022, vol. 127, e2022JB023997. DOI: 10.1029/2022JB023997.

18. Mekhtiev A. D., Yurchenko A. V., Kalytka V. A., Neshina E. G., Alkina A. D., Madi P. Sh. Fiber-optic long-base deformometer for monitoring deformations of open-pit slopes. *Technical Physics Letters*. 2022, vol. 48, no. 15. [In Russ]. DOI: 10.21883/PJTF.2022.15.53129.19200.

19. Liu H., Zhao T., Zhang M. OTDR development based on single-mode fiber fault detection. *Sensors*. 2025, vol. 25, article 4284. DOI: 10.3390/s25144284.

20. Di Y., Wang E., Li Z., Liu X., Huang T., Yao J. Comprehensive early warning method of microseismic, acoustic emission, and electromagnetic radiation signals of rock burst based on deep learning. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2023, vol. 170, article 105519. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2023.105519.

21. Huang S., Meng X., Zhao G., Cheng X., Wang X., Xia K. Distributed fiber optic sensing for monitoring mining-induced overburden deformation. *Coatings*. 2025, vol. 15, article 1317. DOI: 10.3390/coatings15111317.

22. Mohd Arif N. A. A., Ehsan A. A. Sensitivity optimization of U-shaped fiber optics based on the Taguchi method. *OSA Continuum*. 2021, vol. 4, no. 7, pp. 2024 – 2035. DOI: 10.1364/OSAC.430129.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Конурин Антон Игоревич¹ — канд. техн. наук,
старший научный сотрудник, e-mail: konurin@misd.ru,
ORCID ID: 0000-0003-3373-2382,

Орлов Дмитрий Витальевич¹ — аспирант,
инженер, e-mail: dmiorl@gmail.com,

¹ Институт горного дела имени Н.А. Чинакала Сибирского отделения РАН.

Для контактов: Конурин А.И., e-mail: konurin@misd.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.I. Konurin¹, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher,
e-mail: konurin@misd.ru, ORCID ID: 0000-0003-3373-2382,

D.V. Orlov¹, Graduate Student, Engineer, e-mail: dmiorl@gmail.com,

¹ N.A. Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, 630091, Novosibirsk, Russia.

Corresponding author: A.I. Konurin, e-mail: konurin@misd.ru.

Получена редакцией 17.03.2026; получена после рецензии 07.05.2026; принята к печати 10.09.2026.

Received by the editors 17.03.2026; received after the review 07.05.2026; accepted for printing 10.09.2026.



ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ
(специальный выпуск), смотри на www.gornaya-kniga.ru

ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ УГОЛЬНЫХ КАРЬЕРОВ
(2026, № 3, CB 10, 40 с.)

Чадин В. Н. Анализ пространственных данных при формировании имитационных моделей транспортных потоков угольных карьеров.

Ческидов В. В., Красноцветов М. А., Айбек уулу М. Геоинформационный метод моделирования внешних отвалов угольных карьеров.

GEOINFORMATION MODELING OF MINING SYSTEMS OF COAL PITS

Chadin V. N. Analyzing spatial data to build traffic flow simulation models for open-pit coal mine.

Cheskidov V. V., Krasnocvetov M. A., Medetkhan Aibek uulu Geoinformation-based method for modeling external waste dumps of coal open-pit mines.