

Интеграция методов сейсморефракции и электромагнитного излучения, вызванного разломами, для оценки устойчивости кровли в горных выработках

С.М. ДАНИЛЬЕВ¹, Н.А. ДАНИЛЬЕВА¹, С.Н. МУЛЕВ², В. ФРИД³ ✉

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

² Научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела – межотраслевой научный центр «ВНИМИ», Санкт-Петербург, Россия

³ Инженерный академический колледж имени Сами Шимона, Ашдод, Израиль

✉ vladimirf@ac.sce.ac.il

Ссылка для цитирования оригинальной статьи: Daniliev, S.; Danilieva, N.; Mulev, S.; Frid, V. Integration of Seismic Refraction and Fracture-Induced Electromagnetic Radiation Methods to Assess the Stability of the Roof in Mine-Workings. *Minerals* 2022, 12, 609. <https://doi.org/10.3390/min12050609>

Аннотация: В данной статье рассматривается совместное использование двух популярных геофизических методов (электромагнитного излучения, индуцированного разломами, и сейсмической рефракционной томографии) для оценки напряженного состояния подземных горных выработок. Такое сочетание двух косвенных методов позволяет выявить зоны повышенных напряжений в породе вдоль оси горных выработок и зоны интенсивного ослабления или разрушения в массиве пород над кровлей горных выработок. По результатам измерений скоростей продольных и сжимающих волн были рассчитаны двумерные разрезы модуля Юнга и коэффициента Пуассона для оценки механических свойств горных пород в окрестности выработок. Показано, что аномалии обоих упругих параметров соответствуют аномалиям электромагнитного излучения, индуцированного трещинами.

Ключевые слова: подземные горные выработки; сейсмическая рефракция; оценка напряженного состояния горных пород; электромагнитное излучение, вызванное трещинами.

Electromagnetic Radiation Methods to Assess the Stability of the Roof in Mine-Workings

Sergei M. DANILIEV¹, Natali A. DANILIEVA¹, Sergei N. MULEV² and Vladimir FRID³ ✉

¹ Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

² JSC VNIMI, Saint Petersburg, Russia

³ Sami Shamoon College of Engineering, Ashdod, Israel

✉ vladimirf@ac.sce.ac.il

Abstract: This paper considers the joint use of two popular geophysical methods (fracture-induced electromagnetic radiation and seismic refraction tomography) to assess the stress-state in underground mine-workings. Such a combination of two indirect methods allows the identification of zones of increased stress in the rock along the axis of the mine-workings, and zones of intense weakening or disintegration in the rock massif above the roof of the mine-workings. The measurements of longitudinal and compressive wave speeds were used to calculate 2D sections of Young's modulus and Poisson's ratio to assess the rock mechanical properties in the vicinity of the mine-workings. It is shown that the anomalies of both elastic parameters correspond to those of fracture-induced electromagnetic radiation.

Keywords: underground mining; rock stress assessment; fracture induced electromagnetic radiation; seismic refraction.

* Перевод подготовлен для повышения интереса русскоязычной аудитории к данной статье.

© 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

© Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II (перевод), 2025.

1. Введение

1.1. Геологические предпосылки

Норильская горно-металлургическая компания – крупнейшее горнодобывающее предприятие, занимающееся добычей, обогащением и переработкой медно-никелевых руд. Она эксплуатирует три основных месторождения богатых, медистых и вкрапленных медно-никелевых руд, происхождение, строение и свойства которых детально изучены [1-7]. Величина предела прочности при одноосном сжатии пород составляет порядка 80-160 МПа, предел прочности при растяжении и сдвиге – 10-16 МПа и 4-5 МПа соответственно, а значения модуля Юнга, коэффициента Пуассона, плотности и угла внутреннего трения – 80-85 ГПа, 0,19-0,25, 3000 кг/м³ и 33-38° соответственно [8].

Месторождения разрабатывались десятилетиями в нескольких подземных рудниках на глубинах ~500-2000 м ниже поверхности Земли, а также вблизи поверхности вечной мерзлоты [9-11].

Добыча руды на глубоких горизонтах неизбежно сопровождается повышением горного давления, что часто приводит к разрушению горных пород в динамической форме (например, в виде горного взрыва). Подземные горные работы в Норильском регионе проводятся в условиях вечной мерзлоты [7], что приводит к деградации мерзлотных зон и, как следствие, к потере несущей способности пород, образованию каналов притока воды из верхних водоносных горизонтов, проседанию пород/грунтов, образованию карстовых воронок и т.д. [12, 13].

Возможность возникновения опасных горных явлений, устойчивость подземных выработок и сооружений на земной поверхности оценивается по изменению напряженно-деформированного состояния горных пород [14-17]. Повышение уровня напряжений при ведении горных работ приводит к развитию трещиноватости горных пород и, как следствие, появлению зон значительного ослабления пород с последующим их разрушением. Области трещиноватости пород являются источниками повышенного водопритока в подземные выработки.

На рудниках Норильска комплекс работ по геотехническому мониторингу традиционно состоит из маркшейдерских наблюдений по ориентирам, мониторинга сейсмических событий в сейсмопавильонах рудников и гидрогеологического мониторинга (например, [9-11, 18-21]).

Известно, что образование микротрещин предшествует появлению видимых макротрещин и, следовательно, предвещает потенциально значимые изменения в напряженном состоянии [22-24]. Подземные геофизические методы уже более полувека успешно используются [22-29] для оценки микротрещиноватости и напряженного состояния горных пород вблизи горных выработок.

1.2. Геофизические методы в горном деле

Существенных различий между применением обычных геофизических методов и их использованием в подземных условиях нет (например, [25, 26, 30-35]). Однако цели их применения, а также методики обработки и интерпретации данных имеют свои особенности. Основной целью применения подземных геофизических методов является оценка напряженного состояния горных пород. Опыт показывает, что наиболее часто используются сейсмические методы преломления (СМпр) и отражения (СМот), скважинные ультразвуковые и сейсмические методы, электромагнитные методы постоянного тока и переходных процессов, акустическая эмиссия и электромагнитное излучение, вызванное разрушениями (ЭИВР) [35-59]. Эти методы могут быть использованы для упрощения и интенсификации оценки устойчивости кровли и стен подземных выработок, а также для уменьшения дезинтеграции горных пород в процессе исследования.

Метод сейсмического отражения высокого разрешения использовался для оценки просадки горных пород, связанной с подземной добычей [36, 37], и для оценки устойчивости кровли [38]. Было показано, что метод полезен для анализа расслоения и разрушения горных пород на расстоянии десятков метров от сейсмических источников. Отметим, что сейсмологические

и сейсмоакустические измерения часто используются в подземной добыче полезных ископаемых для оценки опасности горных ударов [22, 39-45].

Микросейсмический мониторинг (акустическая эмиссия) является полезным и часто обязательным инструментом для оценки напряженного состояния, особенно в шахтах, подверженных горным ударам и горным или газовым выбросам [20, 21, 46]. Однако, поскольку частота упругих сигналов относительно низка, сейсмоакустическая активность связана с довольно крупными трещинами [24,47], и поэтому она используется для оценки напряженного состояния на всем шахтном поле или на его больших участках.

Томография электрического сопротивления оказалась особенно полезной для обнаружения зон интенсивного гидроразрыва (которые могут быть источниками выхода газа и/или притока воды в выработки) [48], а также для оконтуривания и картирования воды и полостей [49].

Метод СМпр использовался для обнаружения зон повышенных вертикальных напряжений в кровле подземных выработок [50] и для оценки их устойчивости [51]. Этот подход основан на связи между уровнем напряжений и Р- и S-уровнями в горных породах и позволяет различать уровни высоких, средних и низких напряжений.

Будучи косвенными инструментами, все вышеперечисленные методы могут вызывать неоднозначность в интерпретации и, следовательно, в принятии решений. Чтобы избежать подобной проблемы, предпочтительнее использовать интеграцию пары или более геофизических методов. Однако, несмотря на реальные преимущества, такой подход требует много времени и зачастую стоит дорого, поэтому подобные исследования проводятся редко.

Интеграция двух геофизических методов (ЭИВР и СМпр), применяемых для оценки напряженного состояния горных выработок, является предметом исследования, представленного в данной статье.

2. Методы и приборы

Для изучения устойчивости кровли подземных горных выработок использовалась интеграция методов ЭИВР и СМпр.

2.1. Методы и приборы ЭИВР

Измерения МКЭ в горных выработках проводились с помощью прибора АНГЕЛ-М производства ОАО "ВНИМИ" (Санкт-Петербург, Россия). Он был разработан специально для проведения измерений МКЭ в горных выработках и подземных тоннелях, а также на земной поверхности для определения направлений напряжений вблизи тектонических разломов и оползней (см. ряд работ (например, [58-65])). Прибор состоит из блока регистрации/управления и приемной электромагнитной антенны (могут использоваться петлевые или отклоняющие антенны). Прибор автоматически принимает импульсы ЭИВР, индуцированные микротрещинами горных пород. На рис. 1 показано использование прибора «Ангел-М» для измерения МКЭР на подземном рудничном месторождении в Норильске с целью оценки напряженного состояния породы вокруг подземной выработки. Фиксированное направление приема излучения задавалось ориентацией антенны. Для проведения полевых наблюдений с помощью прибора достаточно одного оператора (рис. 1). Результаты измерений отображались на панели прибора, где указывались номер попадания/импульса и значения двух параметров (А- и В-факторов), где А-фактор – средняя амплитуда импульсов, зарегистрированных в каждом временном интервале (10, 20, 40 или 80 с), В-фактор (наклон зависимости между количеством импульсов ФЭМР и их амплитудой) показывал (в соответствии с соотношением Гутенберга-Рихтера) распределение амплитуд импульсов по 10 уровням. Измеренные параметры записывались в память прибора для последующей загрузки в компьютер для дальнейшей фильтрации и обработки [64,65]. На рис. 2 представлены два примера представления данных, зарегистрированных с помощью прибора «Ангел-М».



Рис. 1. Использование прибора «Ангел-М» для измерения ЭИВР в Норильском подземном руднике

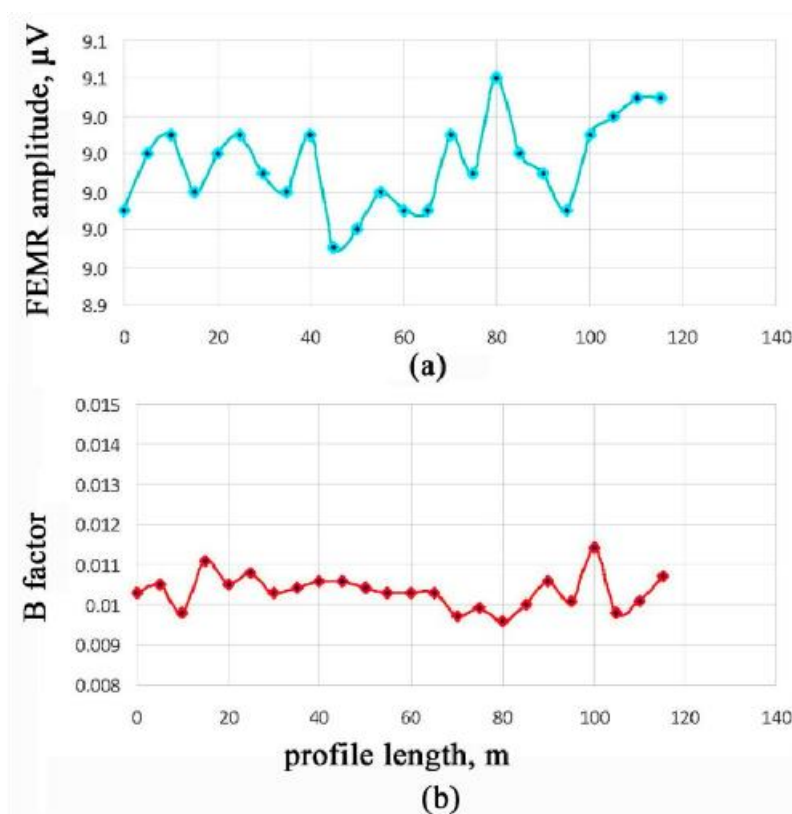


Рисунок 2. Типовое представление данных МКЭР, измеренных в подземном тоннеле с помощью прибора «Ангел-М» (а) амплитуда МКЭР, б) значения В-фактора)

Полученные значения А- и В-факторов собирались в ЭИВР-каталог (фрагмент которого представлен в табл. 1), на основании которого оценивалось напряженное состояние.

Таблица 1

Фрагмент каталога ЭИВР, использованный для оценки стрессового состояния

Длина профиля, м	Профиль 2		Длина профиля, м	Профиль 3		Длина профиля, м	Профиль 4		Длина профиля, м	Профиль 5	
	А	В		А	В		А	В		А	В
10	6,25	0,0344	0	7,08	0,0335	20	9,01	0,0091	15	9,01	0,0104
15	6,30	0,0318	5	6,99	0,0316	25	9,03	0,0103	20	9,12	0,0092
20	6,47	0,0325	10	6,55	0,0372	30	9,04	0,0099	25	9,02	0,0097
25	6,33	0,0345	15	6,53	0,0343	35	8,99	0,0100	30	9,01	0,0104
30	6,33	0,0322	20	6,54	0,0318	40	9,11	0,0099	35	9,02	0,0105
35	6,49	0,0343	25	6,13	0,0335	45	8,97	0,0103	40	9,06	0,0100
40	6,26	0,0332	30	6,16	0,0352	50	9,06	0,0102	45	9,05	0,0108
45	6,18	0,0345	35	6,26	0,0332	55	8,96	0,0098	50	9,00	0,0099
50	6,24	0,0316	40	6,32	0,0332	60	9,03	0,0100	55	9,05	0,0109
55	6,23	0,0350	45	6,09	0,0334	65	8,99	0,0107	60	9,05	0,0096
60	6,17	0,0317	50	6,15	0,0356	70	9,05	0,0104	65	9,00	0,0104
65	6,24	0,0347	55	6,20	0,0349	75	9,02	0,0096	70	8,99	0,0100
70	6,26	0,0375	60	6,12	0,0319	80	9,00	0,0112	75	9,04	0,0098
75	6,28	0,0381	65	6,11	0,0337	85	8,98	0,0101	80	9,03	0,0103
80	6,45	0,0324	70	6,16	0,0321	90	9,05	0,0110	85	8,97	0,0105
85	6,43	0,0315	75	6,16	0,0336	95	9,05	0,0086	90	9,02	0,0100
90	6,16	0,0345	80	6,17	0,0330	100	9,01	0,0104	95	9,04	0,0108
95	6,21	0,0337	85	6,26	0,0324	105	9,02	0,0106	100	9,04	0,0101
100	6,27	0,0341	90	6,11	0,0333	110	9,01	0,0097	105	9,02	0,0105
105	6,26	0,0333	95	6,22	0,0334	115	9,01	0,0101	110	9,06	0,0105

Несмотря на преимущества метода ЭИВР для изучения напряженного состояния горных выработок, его относительная простота и эффективность позволяет оценить глубину зоны повышенных напряжений (от поверхности тоннеля в сторону породного массива) и ее объем [55, 56], но не позволяет корректно их измерить.

Чтобы избежать этого ограничения, метод СМпр после обработки топографических данных был интегрирован с методом ЭИВР для изучения зон с аномальными измерениями ЭИВР.

2.2. Метод СМпр и используемый прибор

Исследования СМпр в зоне аномального возбуждения ЭИВР проводились для оценки значений модуля Юнга и коэффициента Пуассона. Измерения проводились на глубине 50 м от поверхности горной выработки. Геофоны (сейсмические датчики) были установлены в кровле тоннеля (вдоль его оси), а регистрация производилась в вышележащем массиве горных пород (рис. 3).

Исследование проводилось с помощью современной телеметрической сейсмической станции TELSS-3 (ООО «Геосигнал», Москва, Россия), измерялись первые вступления продольных и поперечных упругих волн следующим образом: интервал между точками регистрации и возбуждения – 2 м; количество точек регистрации – 76; упругие колебания возбуждались кувалдой весом 6 кг. Отметим, что расположение профилей СМпр определялось расположением профилей ЭИВР, на которых регистрировалось аномальное возбуждение ударов ЭИВР, технической возможностью проведения наблюдений (например, низкий уровень акустического шума), а также результатами визуального картирования трещин. Учитывая пространственное положение подземных горных выработок, профильные линии измерений СМпр проводились на прямых участках с обязательной привязкой пространственных координат маркшейдерской службой шахты. В рамках исследовательской кампании было получено более 800 сейсмических записей на Р- и S-волнах. На рисунке 4а показан пример зарегистрированной сейсмограммы (профиль 2 в таблице 1). Все измеренные данные были затем отфильтрованы и обработаны. На рисунке 4б показан пример диаграммы пикирования первых вступлений.



Рис. 3. Пример расположения геофона в кровле горной выработки (Норильский подземный рудник – профиль 2 в таблице 1)

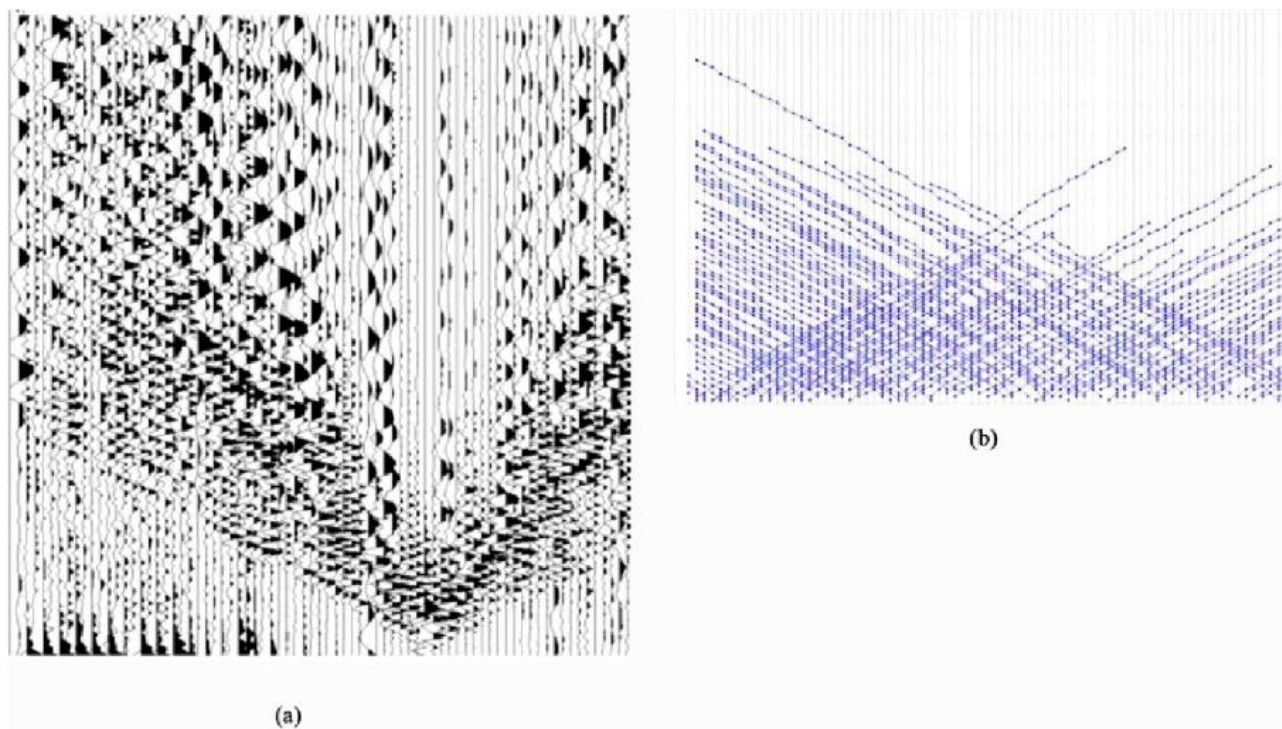


Рис. 4. Пример зарегистрированной сейсмограммы (профиль 2 в табл. 1). (а) и пикировка первых вступлений (b)

3. Результаты и обсуждение

На рисунке 5 вместе с профилем 2 показаны результаты измерений ЭИВР в подземной выработке Норильского подземного рудника. Аномальные значения амплитуды ЭИВР были измерены на расстоянии 20-40, 80 и 120 м от начала профиля (показаны черными стрелками на рис. 5), что свидетельствует о повышенном уровне напряжений в этой части горной выработки. Результаты измерений ЭИВР (профиль 2) были объединены с результатами измерений СМпр. На рисунке 6 представлены результаты томографической обработки скоростей продольных (V_p) и поперечных (V_s) волн, зарегистрированных на том же участке выработок. Сравнительный анализ рисунков 5 и 6 показывает качественное соответствие между увеличением амплитуды ЭИВР и зонами аномально низких значений скоростей Р и S волн на расстояниях 20-40, 80 и 120 м от начала профиля 2. По результатам обработки упругих волн (V_p и V_s) были рассчитаны значения модуля Юнга и коэффициента Пуассона по известным выражениям:

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}} \text{ and } V_p = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \sqrt{\frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}},$$

где ν – значение коэффициента Пуассона, E – значение модуля Юнга, ρ – значение плотности породы.

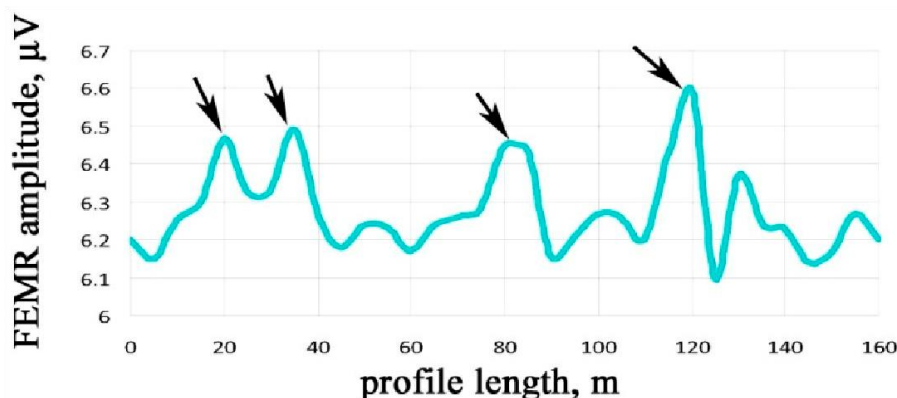


Рис. 5. Результаты измерений ЭИВР в подземных горных выработках (профиль 2). Стрелками показаны аномальные амплитуды ЭИВР

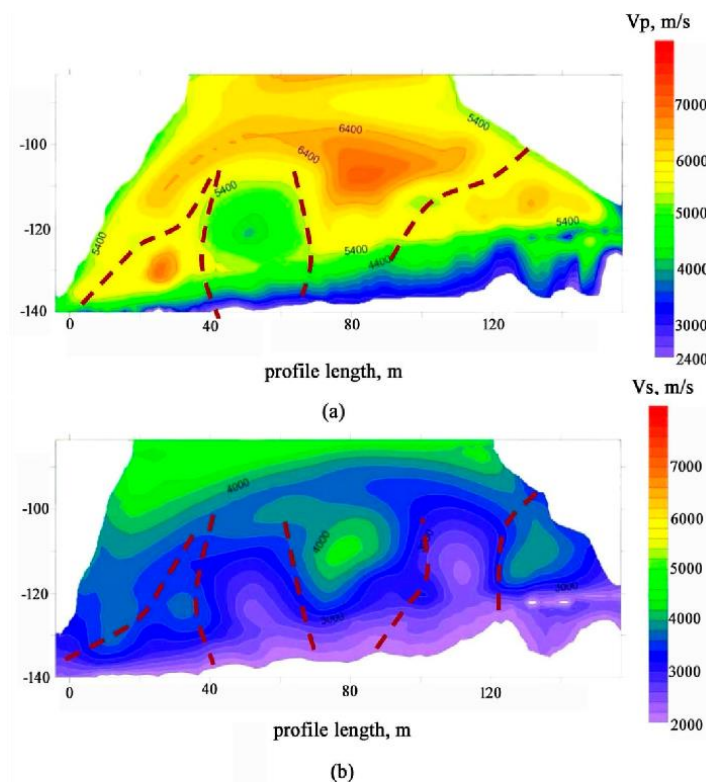


Рис. 6. 2D разрезы, полученные по результатам измерений СМпр: скорость волн сжатия (а) и скорость волн сдвига (б). Пунктирными линиями показаны границы аномальных зон. Ось Y – глубина измерений, ось X – длина профиля (профиль 2)

На рисунке 7 представлен двумерный разрез этих двух упругих параметров. Уменьшение значений модуля Юнга и увеличение значения коэффициента Пуассона можно интерпретировать как появление сильно трещиноватых/ослабленных зон и, следовательно, подтверждает согласованность интерпретации увеличения амплитуды ЭИВР.

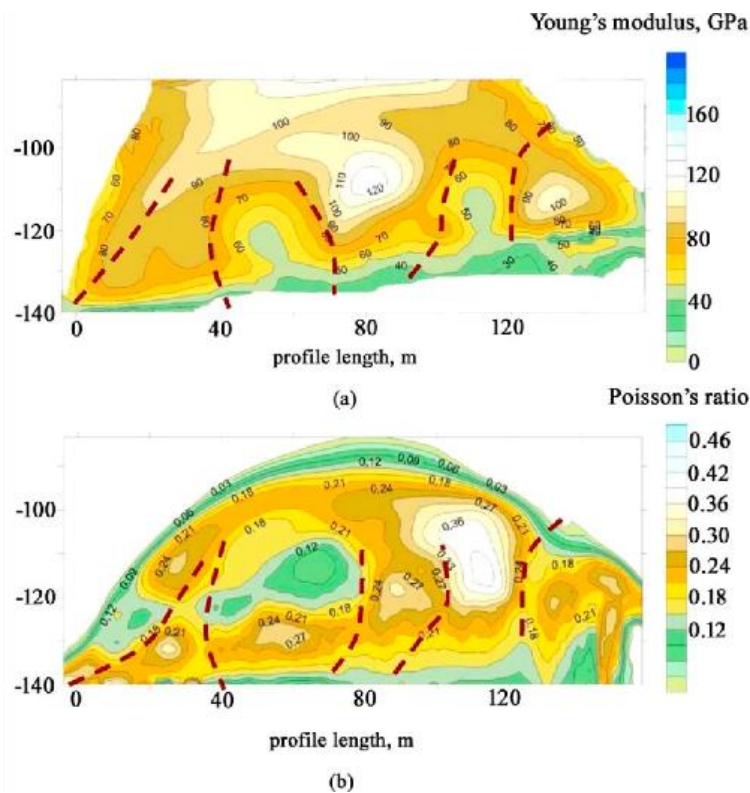


Рис. 7. Двумерные сечения модуля Юнга (а) и коэффициента Пуассона (б) Пунктирными линиями показаны границы аномальных зон. Ось Y – глубина измерений, ось X – длина профиля (профиль 2)

На рис. 8 представлен еще один пример совместного применения методов ЭИВР и СМпр в зоне неустойчивого массива горных пород (профиль 4 в табл. 1), где на рис. 8а показано распределение модуля Юнга, а на рис. 8б – результат регистрации ЭИВР (профиль 4). Зона низких значений модуля Юнга (отмечена пунктиром) наблюдается на расстоянии 20-50 м от начала профиля. Эта же зона видна на рис. 8б как аномальное значение амплитуды ФЭМР. Появление обеих аномалий свидетельствует о формировании сильно трещиноватой породы в кровле выработки и, следовательно, о ее потенциальном разрушении.

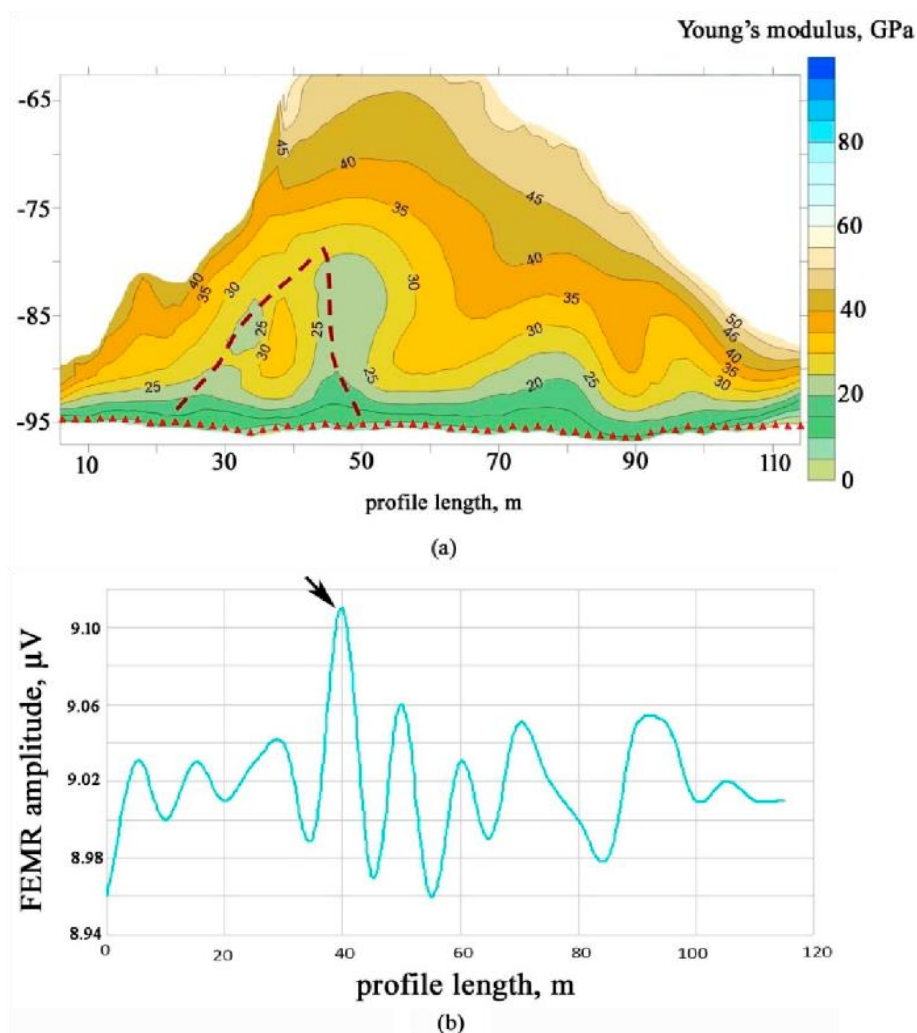


Рис. 8. Двумерные сечения модуля Юнга (а) и амплитуды ЭИВР (б), измеренные в профиле 4. Стрелка на рис. 8б показывает аномальную амплитуду ЭИВР

4. Выводы

Результаты применения ЭИВР в условиях Норильских подземных рудников показывают, что этот метод может быть успешно использован для определения местоположения пород, находящихся в состоянии высокого напряжения или интенсивно трещиноватых. Однако метод ЭИВР позволяет оценить только расстояние между зонами повышенных напряжений и поверхностью стены или кровли выработки, а также объем этих зон. Этот недостаток может быть преодолен путем интеграции измерений методом ЭИВР с применением метода СМпр. Наши исследования показали, что зоны, где упругие волны демонстрируют пониженные значения скорости, соответствуют зонам повышенной амплитуды ЭИВР.

Последнее наблюдение можно объяснить следующим образом: уменьшение скорости упругих волн, как известно, связано с уменьшением значения модуля Юнга и увеличением значения коэффициента Пуассона, что означает увеличение трещиноватости (пластичности) горных пород. Как известно, трещиноватость пород является причиной аномалий ЭИВР в горных выработках

[54-59, 63-65], в лаборатории при разрушении образцов горных пород (например, [66-68]) и при зарождении землетрясений (например, [25, 69]). Таким образом, совпадение аномалий СМпр и ЭИВР подтверждает согласованность результатов данного исследования.

Комплексное применение методов ЭИВР и СМпр является превентивной процедурой в рамках деятельности по оценке опасности. Появление визуальных трещин на поверхности кровли или стен котлована свидетельствует об отложении дезинтеграционных процессов [24]. Следовательно, проведение "профилактических мероприятий" становится запоздалым и даже опасным для устойчивости котлована и деятельности персонала. Наличие вышележащего водоносного горизонта (как это имеет место в неглубоких горизонтах норильских рудников) усугубляет напряженное состояние, и в результате активизации существующих напряжений, снижения трения между поверхностями трещин и т.д. разрушение кровли может вызвать поступление воды в выработанное пространство и привести к его обрушению.

Следует отметить, что применение метода СМпр требует больших затрат времени и сил. Поэтому наиболее эффективным является объединение этих методов. Это должно происходить в два этапа: на первом этапе можно применить метод ЭИВР, позволяющий краткосрочно оценить напряженное состояние и, следовательно, локализовать зоны, где предполагается наличие высоких напряжений; на втором этапе можно использовать метод СМпр для более детального изучения состояния пород и только на тех участках горных выработок, где зафиксированы повышенные значения ЭИВР.

Наконец, повышенные амплитуды ЭИВР, наряду с низким модулем Юнга и высоким коэффициентом Пуассона, свидетельствуют о неустойчивом состоянии кровли подземной выработки. Следует отметить, что критерии неустойчивости разработаны на основе данных, накопленных в упомянутых выше каталогах ЭИВР и СМпр, и являются индивидуальными для типа породы, размеров выработки, притока воды и т.д. Процедура разработки критериев – задача для дальнейших исследований.

Вклад авторов: концептуализация, С.Д. и Н.Д.; методология, С.Д. и Н.Д.; программное обеспечение, С.Д. и С.М.; валидация, С.Д., Н.Д. и В.Ф.; формальный анализ, С.Д.; исследование, С.Д. и Н.Д.; ресурсы, С.М.; курация данных, В.Ф.; написание – подготовка оригинального проекта, С.Д., Н.Д., В.Ф.; написание – первоначальная подготовка проекта, С.Д., Н.Д., В.Ф.; рецензирование и редактирование, В.Ф.; визуализация, В.Ф.; руководство, В.Ф.; администрирование проекта, С.М. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

Финансирование: данное исследование не получало внешнего финансирования.

Заявление о доступности данных: все данные, полученные и проанализированные в ходе исследования, включены в статью.

Конфликты интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yakubchuk, A.; Nikishin, A. Norilsk-Talnakh Cu-Ni-PGE deposits: A revised tectonic model. *Miner. Depos.* 2004, 39, 125–142. <http://doi.org/10.1007/s00126-003-0373-0>
2. Khramov, I.V. Maslovsky Ore Deposit of Norilsk Region: Morphology and Internal Structure of a Layered Intrusion. *Mosc. Univ. Geol. Bull.* 2010, 65, 134–137. <http://doi.org/10.3103/S0145875210020109>
3. Starostin, V.I.; Sorokhtin, O.G. A new interpretation for the origin of the Norilsk type PG-Cu-Ni sulfide deposits. *Geosci. Front.* 2011, 2, 583–591. <http://doi.org/10.1016/j.gsf.2011.09.005>
4. Krivolutskaya, N.A.; Tolstykh, N.; Kedrovskaya, T.B.; Naumov, K.; Kubrakova, I.; Tyutyunnik, O.A.; Gongalsky, B.; Kovalchuk, E.N.; Magazina, L.; Bychkova, Y.V.; et al. World-Class PGE-Cu-Ni Talnakh Deposit: New Data on the Structure and Unique Mineralization of the South-Western Branch. *Minerals* 2018, 8, 124. <http://doi.org/10.3390/min8040124>
5. Krivolutskaya, N.A.; Gongalsky, B.I.; Kedrovskaya, T.B.; Kubrakova, I.V.; Tyutyunnik, O.A.; Chikatueva, V.Y.; Bychkova, Y.V.; Magazina, L.; Kovalchuk, E.N.; Yakushev, A.I.; et al. Geology of the western flanks of the Oktyabr'skoe deposit, Norilsk district, Russia: Evidence of a closed magmatic system. *Miner. Depos.* 2019, 54, 611–630. <http://doi.org/10.1007/s00126-018-0827-z>
6. Sereda, E.; Belyatsky, B.; Krivolutskaya, N. Geochemistry and Geochronology of Southern Norilsk Intrusions, SW Siberian Traps. *Minerals* 2020, 10, 165. <http://doi.org/10.3390/min10020165>
7. Barnes, S.J.; Malitch, K.N.; Yudovskaya, M.A. Introduction to a Special Issue on the Norilsk-Talnakh Ni-Cu-Platinum Group Element Deposits. *Econ. Geol.* 2020, 115, 1157–1172. <http://doi.org/10.5382/econgeo.4750>
8. Freidin, A.M.; Tapsiev, A.P.; Uskov, V.A.; Nazarova, L.A.; Zaporozhtsev, A.A.; Sergunin, M.P. Re-equipment and development of mining method at Zapolyarny mine. *J. Min. Sci.* 2007, 43, 290–299. <http://doi.org/10.1007/s10913-007-0030-6>
9. Lamzin, A.N.; Arshavskii, V.V.; Tapsiev, A.P.; Samorodov, B.N.; Zhilkina, A.F. Features of extensive deposit mining in the Oktyabrsky mine. *J. Min. Sci.* 2002, 38, 134–139. <http://doi.org/10.1023/A:1021107320370>

10. Uskov, V.A.; Eremenko, A.A.; Darbinyan, T.P.; Marysyuk, V.P. Geodynamic Hazard Assessment for Tectonic Structures in Underground Mining of North Ore Bodies in the Oktyabrsky Deposit. *J. Min. Sci.* 2019, *55*, 77–87. <http://doi.org/10.1134/S1062739119015312>
11. Oparin, V.N.; Tapsiev, A.P.; Vostrikov, V.I.; Usol'tseva, O.M.; Arshavskii, V.V.; Zhilkina, A.F.; Babkin, E.A.; Samorodov, B.N.; Nagovitsyn, Y.N.; Smolov, K.V. On possible causes of the increase in seismic activity of minefields in the Oktyabrsky and Taimyrsky mines of the Norilsk deposit in 2003. Part IV: Influence of undermining of overlying rock masses. *J. Min. Sci.* 2005, *41*, 1–5. <http://doi.org/10.1007/s10913-005-0057-5>
12. Gauthier, P.T.; Blewett, T.A.; Garman, E.R.; Schlekot, C.E.; Middleton, E.T.; Suominen, E.; Crémazy, A. Environmental risk of nickel in aquatic Arctic ecosystems. *Sci. Total Environ.* 2021, *797*, 148921. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148921>, <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/34346380>
13. Sokolov, K.; Fedorova, L.; Fedorov, M. Prospecting and Evaluation of Underground Massive Ice by Ground-Penetrating Radar. *Geosciences* 2020, *10*, 274. <http://doi.org/10.3390/geosciences10070274>
14. Kutepova, N.A. Engineering-Geological Substantiation of the Forecast of Hydro-Geomechanical Processes While Mining Operations. Ph.D. Thesis, Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia, 2010.
15. Brady, B.; Brown, E. *Rock Mechanics for Underground Mining*; Kluwer Academic Publishers: New York, NY, USA, 2004.
16. Bacha, S.; Mu, Z.; Javed, A.; Al Faisal, S. A Review of Rock Burst's Experimental Progress, Warning, Prediction, Control, and Damage Potential Measures. *J. Min. Environ.* 2020, *11*, 31–48. <http://doi.org/10.22044/jme.2019.9092.1797>
17. Bazaluk, O.; Petlovanyi, M.; Lozynskiy, V.; Zubko, S.; Sai, K.; Saik, P. Sustainable Underground Iron Ore Mining in Ukraine with Backfilling Worked-Out Area. *Sustainability* 2021, *3*, 834. <http://doi.org/10.3390/su13020834>
18. Oparin, V.N.; Vostrikov, V.I.; Usol'tseva, O.M.; Mulev, S.N.; Rodionova, E. Assessment of Rockburst Hazard Based on the Data of Mine Seismology. *Procedia Eng.* 2017, *191*, 795–801. <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.246>
19. Hudyma, M.; Potvin, Y.H. An Engineering Approach to Seismic Risk Management in Hardrock Mines. *Rock Mech. Rock Eng.* 2010, *43*, 891–906. <http://doi.org/10.1007/s00603-009-0070-0>
20. Muraviev, E.I.; Karelin, V.N.; Shabarov, A.N. Problems and ways of developing the mineral resource base of the Polar Branch of OJSC MMC Norilsk Nickel. *Notes Min. Inst.* 2012, *198*, 126–130.
21. Shabarov, A.N.; Kutepova, N.A.; Kutepov, Y.I. Engineering-geological security of mining operations in water-saturated massifs. *Notes Min. Inst.* 2012, *197*, 197–202.
22. He, J.; Dou, L.; Gong, S.; Li, J.; Ma, Z. Rock burst assessment and prediction by dynamic and static stress analysis based on micro-seismic monitoring. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 2017, *93*, 46–53. <http://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2017.01.005>
23. Cai, M.; Kaiser, P.K.; Martin, C.D. Quantification of rock mass damage in underground excavations from microseismic event monitoring. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 2001, *38*, 1135–1145. [http://doi.org/10.1016/S1365-1609\(01\)00068-5](http://doi.org/10.1016/S1365-1609(01)00068-5)
24. Lockner, D.A.; Byerlee, J.D.; Kuksenko, V.S.; Ponomarev, A.V.; Sidorin, A. Quasi-static fault growth and shear fracture energy in granite. *Nature* 1991, *350*, 39. <http://doi.org/10.1038/350039a0>
25. Frid, V.; Rabinovitch, A.; Bahat, D. Earthquake forecast based on its nucleation stages and the ensuing electromagnetic radiations. *Phys. Lett. A* 2020, *384*, 126102. <http://doi.org/10.1016/j.physleta.2019.126102>
26. Ding, H.-H.; Jiang, W.-W. Application of Geophysical Methods in Tunnel Exploration. In Proceedings of the 5th International Conference on Civil, Architectural and Hydraulic Engineering, Zhuhai, China, 30–31 July 2016; Atlantis Press: Zhuhai, China, 2016; pp. 188–192.
27. Li, S.; Li, S.; Zhang, Q.; Xue, Y.; Liu, B.; Su, M.; Wang, Z.; Wang, S. Predicting geological hazards during tunnel construction. *J. Rock Mech. Geotech. Eng.* 2010, *2*, 232–242. <http://doi.org/10.3724/SP.J.1235.2010.00232>
28. Hatherly, P. Overview on the application of geophysics in coal mining. *Int. J. Coal Geol.* 2013, *114*, 74–84. <http://doi.org/10.1016/j.coal.2013.02.006>
29. Fallon, G.N.; Fullagar, P.K.; Sheard, S.N. Application of geophysics in metalliferous mines. *Aust. J. Earth Sci.* 1997, *44*, 391–409. <http://doi.org/10.1080/08120099708728321>
30. Logacheva, V.M. Development of an Underground-Field Electrometric method for predicting the State of Flooded Coal-Rock Massifs of the Moscow Basin. Ph.D. Thesis, Tula State University, Tula, Russia, 2010.
31. Prostov, S.M. Substantiation and Development of Methods for Geoelectric Control of the Parameters of Fracturing and Cementation of Rocks around Workings. Ph.D. Thesis, Kemerovo State University, Kemerovo, Russia, 1996.
32. Lei, Y. Application of Geophysical Technique in the Coal Mining. *iJOE* 2015, *11*, 11–13. <http://doi.org/10.3991/ijoe.v11i7.4759>
33. Takahashi, T. ISRM Suggested Methods for land geophysics in rock engineering. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 2004, *41*, 885–914. <http://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2004.02.009>
34. Takahashi, T.; Takeuchi, T.; Sassa, K. ISRM Suggested Methods for borehole geophysics in rock engineering. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 2006, *43*, 337–368. <http://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2005.09.003>
35. Lehmann, B.; Orłowski, D.; Misiek, R. Exploration of Tunnel Alignment using Geophysical Methods to Increase Safety for Planning and Minimizing Risk. *Rock Mech. Rock Eng.* 2010, *43*, 105–116. <http://doi.org/10.1007/s00603-009-0028-2>
36. Guy, E.D.; Nolen-Hoeksema, R.C.; Daniels, J.J.; Lefchik, T. High-resolution SH-wave seismic reflection investigations near a coal mine-related roadway collapse feature. *J. Appl. Geophys.* 2003, *54*, 51–70. [http://doi.org/10.1016/S0926-9851\(03\)00055-7](http://doi.org/10.1016/S0926-9851(03)00055-7)
37. Isiaka, A.I.; Durrheim, R.J.; Manzi, M.S.D. High-Resolution Seismic Reflection Investigation of Subsidence and Sinkholes at an Abandoned Coal Mine Site in South Africa. *Pure Appl. Geophys.* 2019, *176*, 1531–1548. <http://doi.org/10.1007/s00024-018-2026-3>
38. Genzwill, D.J.; Brehm, R. High-resolution seismic reflections in potash mines. *Geophysics* 1993, *58*, 741–748. <http://doi.org/10.1190/1.1443459>
39. Luxbacher, K.; Westman, E.; Swanson, P.; Karfakis, M. Three-dimensional time-lapse velocity tomography of an underground longwall panel. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 2008, *45*, 478–485. <http://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2007.07.015>
40. Dou, L.; Chen, T.; Gong, S.; He, H.; Zhang, S. Rockburst hazard determination by using computed tomography technology in deep workface. *Saf. Sci.* 2012, *50*, 736–740. <http://doi.org/10.1016/j.ssci.2011.08.043>
41. Cai, W.; Dou, L.; Cao, A.; Gong, S.; Li, Z. Application of seismic velocity tomography in underground coal mines: A case study of Yima mining area Henan, China. *J. Appl. Geophys.* 2014, *109*, 140–149. <http://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.07.021>

42. Cao, A.; Dou, L.; Cai, W.; Gong, S.; Liu, S.; Zhao, Y. Tomographic imaging of high seismic activities in underground island longwall face. *Arab. J. Geosci.* 2016, *9*, 1–10. <http://doi.org/10.1007/s12517-015-2087-x>
43. Czarny, R.; Pilecki, Z.; Nakata, N.; Pilecka, E.; Krawiec, K.; Harba, P.; Barnaś, M. 3D S-wave velocity imaging of a subsurface disturbed by mining using ambient seismic noise. *Eng. Geol.* 2019, *251*, 115–127. <http://doi.org/10.1016/j.engeo.2019.01.017>
44. Li, X.; Gong, S.; Dou, L.; Chai, Y. Detection of stress redistribution in a complex isolated coal pillar with active SVT technology. *Arab. J. Geosci.* 2020, *13*, 1–12. <http://doi.org/10.1007/s12517-020-05975-7>
45. Chlebowski, D.; Burtan, Z. Geophysical and analytical determination of overstressed zones in exploited coal seam: A case study. *Acta Geophys.* 2021, *69*, 701–771. <http://doi.org/10.1007/s11600-021-00547-z>
46. Chlebowski, D.; Burtan, Z. Mining-Induced Seismicity during Development Works in Coalbeds in the Context of Forecasts of Geomechanical Conditions. *Energies* 2021, *14*, 6675. <http://doi.org/10.3390/en14206675>
47. Goodfellow, S.D.; Young, R.P.A. Laboratory acoustic emission experiment under in situ conditions. *Geophys. Res. Lett.* 2014, *41*, 3422–3430. <http://doi.org/10.1002/2014GL059965>
48. Golebiowski, T.; Zogala, B.; Mendecki, M.J.; Malysa, T. The utility of rock-bolts as long electrodes for underground ERT surveys in mine-settings. *J. Appl. Geophys.* 2018, *155*, 122–130. <http://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2018.05.010>
49. Bharti, A.K.; Prakash, A.; Verma, A.; Singh, K.K.K. Assessment of hydrological condition in strata associated with old mine working during and post-monsoon using electrical resistivity tomography: A case study. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 2021, *80*, 5159–5166. <http://doi.org/10.1007/s10064-021-02208-3>
50. Chen, T.; Wang, X.; Mukerji, T. In situ identification of high vertical stress areas in an underground coal mine panel using seismic refraction tomography. *Int. J. Coal Geol.* 2015, *149*, 55–66. <http://doi.org/10.1016/j.coal.2015.07.007>
51. Paul, A.; Mallika, V.; Murthy, S.R.; Prakash, A.; Singh, A.K. Estimation of rock load in development workings of underground coal mines a modified RMR approach. *Curr. Sci.* 2018, *114*, 2167–2174. <http://doi.org/10.18520/cs/v114/i10/2167-2174>
52. Lin, P.; Wei, P.; Wang, C.; Kang, S.; Wang, X. Effect of rock mechanical properties on electromagnetic radiation mechanism of rock fracturing. *J. Rock Mech. Geotech. Eng.* 2021, *13*, 798–810. <http://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.01.001>
53. Wang, E.; He, X.; Liu, X.; Li, Z.; Wang, C.; Xiao, D. A non-contact mine pressure evaluation method by electromagnetic radiation. *J. Appl. Geophys.* 2011, *75*, 338–344. <http://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2011.06.028>
54. Frid, V.; Vozoff, K. Electromagnetic radiation induced by mining rock failure. *Intern. J. Coal Geol.* 2005, *64*, 57–65. <http://doi.org/10.1016/j.coal.2005.03.005>
55. Frid, V. Electromagnetic radiation method for rock and gas outburst forecast. *J. Appl. Geoph.* 1998, *38*, 97–104. [http://doi.org/10.1016/S0926-9851\(97\)00017-7](http://doi.org/10.1016/S0926-9851(97)00017-7)
56. Frid, V. Rock-burst hazard forecast by electromagnetic radiation excited by rock fracture. *J. Rock Mech. Rock Eng.* 1997, *30*, 229–236. <http://doi.org/10.1007/BF01045719>
57. Frid, V.; Shabarov, A.; Proskurjakov, V. Formation of electromagnetic radiation in coal stratum. *J. Min. Sci.* 1992, *28*, 139–145. <http://doi.org/10.1007/BF00710732>
58. Frid, V.; Wang, E.Y.; Mulev, S.N.; Li, D.X. The Fracture Induced Electromagnetic Radiation—Approach and Protocol for the Stress State Assessment for Mining. *Geotech. Geol. Eng.* 2021, *4*, 3285–3291. <http://doi.org/10.1007/s10706-021-01682-6>
59. Frid, V.; Shabarov, A. Modern principles of nondestructive stress monitoring in mine workings—Overview. In *Eurock 2018. Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses*; Taylor & Francis Group: London, UK, 2018; pp. 513–518. ISBN 978-1-138-61645-5.
60. Das, S.; Mallik, J.; Bandyopadhyay, K.; Das, A. Evaluation of maximum horizontal near-surface stress (SHmax) azimuth and its distribution along Narmada-Son Lineament, India by geogenic Electromagnetic Radiation (EMR) technique. *J. Geodyn.* 2020, *133*, 101672. <http://doi.org/10.1016/j.jog.2019.101672>
61. Das, S.; Mallik, J.; Dhankhar, S.; Suthar, N.; Singh, A.K.; Dutta, V.; Gupta, U. Application of Fracture Induced Electromagnetic Radiation (FEMR) technique to detect landslide-prone slip planes. *Nat. Hazards* 2020, *101*, 505–535. <http://doi.org/10.1007/s11069-020-03883-3>
62. Frid, V.; Mulev, S. Rock stress assessment based on the fracture induced electromagnetic radiation. In *Eurock 2018. Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses*; Taylor & Francis Group: London, UK, 2018; pp. 505–512. ISBN 978-1-138-61645-5.
63. Yakovitskaya, G.E. Development of a Method and Measuring Instruments for Diagnosing Critical States of Rocks Based on Electromagnetic Emission. Ph.D. Thesis, Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia, 2007.
64. Mulev, S.N.; Starnikov, V.N.; Romanevich, O.A. The current stage in the development of the geophysical method for recording natural electromagnetic radiation (EEMI). *Coal* 2019, *10*, 1123.
65. Romanevich, K.V. Development of Criteria and Methods for Finding Geodynamic Processes by Electromagnetic Radiation Near Shallow Workings. Ph.D. Thesis, IPCON RAN, Moscow, Russia, 2015.
66. Rabinovitch, A.; Bahat, D.; Frid, V. Similarity and dissimilarity of electromagnetic radiation from carbonate rocks under compression, drilling and blasting. *Intern. J. Rock Mech. Min. Sci.* 2002, *39*, 125–129. [http://doi.org/10.1016/S1365-1609\(02\)00012-6](http://doi.org/10.1016/S1365-1609(02)00012-6)
67. Bahat, D.; Rabinovitch, A.; Frid, V. Fracture characterization of chalk in uniaxial and triaxial tests by rock mechanics, fractographic and electromagnetic methods. *J. Struct. Geol.* 2001, *23*, 1531–1547. [http://doi.org/10.1016/S0191-8141\(01\)00018-9](http://doi.org/10.1016/S0191-8141(01)00018-9)
68. Qiu, L.; Zhu, Y.; Song, D.; He, X.; Wang, W.; Liu, Y.; Xiao, Y.; Wei, M.; Shan Yin, S.; Liu, Q. Study on the Nonlinear Characteristics of EMR and AE during Coal Splitting Tests. *Minerals* 2022, *12*, 108. <http://doi.org/10.3390/min12020108>
69. Contoyiannis, Y.; Potirakis, S.M.; Eftaxias, K.; Contoyianni, L. Tricritical crossover in earthquake preparation by analyzing preseismic electromagnetic emissions. *J. Geodyn.* 2015, *84*, 40–54. <http://doi.org/10.1016/j.jog.2014.09.015>