

Мониторинг и доизучение полей рудника Октябрьский методами сейсмо- и электроразведки

■ Юров А.А.¹, Чиркин И.А.¹, Ризанов Е.Г.¹, Киброев И.С.², Бердюгин И.Н.³

1 – ООО «Фирма «Геосейс»

2 – Заполярный филиал ПАО «ГМК «Норильский никель»

3 – ООО «НН Технические Сервисы»

Аннотация: В статье представлены результаты работ комплексного мониторинга рудника Октябрьский, включающего результаты сейсмо- и электроразведочных работ. Основной целью работ являлось обеспечение безопасности и эффективности горных работ. Основные задачи: определение наличия, развития и возникновения водопроводящих трещин в вышележащий водоносный горизонт, определение очагов повышенного напряжения и ослабленных участков горного массива, определение водопотоков. Показана эффективность применяемых методов для решения поставленных задач, получен успешный опыт выполнения мониторинговых работ в условиях наличия сильных техногенных помех.

Ключевые слова: Мониторинг, микросейсмический, электроразведка, трещиноватость, рудник, горные выработки, водопроводимость

Введение

При разработке рудных месторождений первостепенное значение имеет безопасность проведения подземных работ, основной угрозой которых являются обрушение и затопление горных выработок. Для предотвращения данных событий необходимо выявлять признаки их будущего проявления и контролировать развитие ситуации по этим признакам.

Возникновение подобных чрезвычайных событий на рудниках связано, в основном, с перераспределением открытой трещиноватости в геосреде на площади разрабатываемого месторождения. Здесь в результате естественных и, прежде всего, техногенных воздействий (проходка, взрывы, сбросы и др.) появляются очаги аномального напряжённо-деформированного состояния (НДС) среды, которые характеризуются более интенсивной открытой трещиноватостью и микросейсмической активностью. Разрядка подобных очагов происходит за счёт формирования мегатрещин, вдоль которых происходят под-

вижки горных пород. Если это происходит вблизи выработки, то возможно её обрушение. Кроме того, подобные трещины могут «пройти насквозь» пласты-экраны и дойти до водонасыщенных пластов, что обеспечит проникновение воды в выработки и приведёт к её заводнению.

Таким образом основным признаком возможного развития негативной ситуации при проведении подземных работ на рудных месторождениях является усиление интенсивности трещиноватости вблизи горных выработок. Прогноз подобных ситуаций, оценка вероятности их возникновения и проведение необходимых профилактических мероприятий возможно только при наличии информации о распределении открытой трещиноватости и в геосреде, которую можно получить по сейсмическим волнам двух типов: рассеянным и микросейсмической эмиссии. Для этого выполняется комплекс сейсмический исследований в активном и пассивном режимах наблюдений соответственно. На данном объекте были использованы технологии

«Сейсмический локатор бокового обзора» – СЛБО и «Сейсмолокация очагов эмиссии» – СЛОЭ. Водозаполнение зон трещиноватости определяют по данным электромагнитного мониторинга (ЭММ), оценивая изменения электропроводности геосреды и определяя интенсивность и направления движения водных потоков.

Методы

В ходе мониторинга применялись такие геофизические методы как сейсмо- и электроразведка в активном и пассивном режимах.

Мониторинг сейсмическими методами целевого участка рудника «Октябрьский» подразумевал:

1. Проведение полевых сейсморазведочных работ в активном режиме (с использованием наземных источников) до и после техногенного воздействия и далее с необходимой цикличностью по технологии СЛБО, основанной на выделении волн рассеянного отражения (РО), определяющих индекс открытой трещиноватости геосреды.

2. Проведение полевых сейсморазведочных работ в непрерывном пассивном режиме (без использования наземных источников) в течение всего периода мониторинга по технологии микросейсмического мониторинга, основанной на выделении волн микросейсмической эмиссии (МСЭ), определяющих зоны активного трещинообразования.

Электроразведка основана на измерении удельного электрического сопротивления (УЭС) горных пород. Водоносные горизонты характеризуются пониженным УЭС по сравнению с вмещающими породами, что помогает выявлять их положение и границы. Электроразведка также применялась в активной и пассивной модификации: электрическое возде-

йствие на горный массив с целью регистрации перераспределения откликов электромагнитного поля, характеризующих изменения латеральных и субвертикальных каналов гидротоков. Пассивный режим – регистрация изменения естественного электрического поля связанных с проведением горных работ.

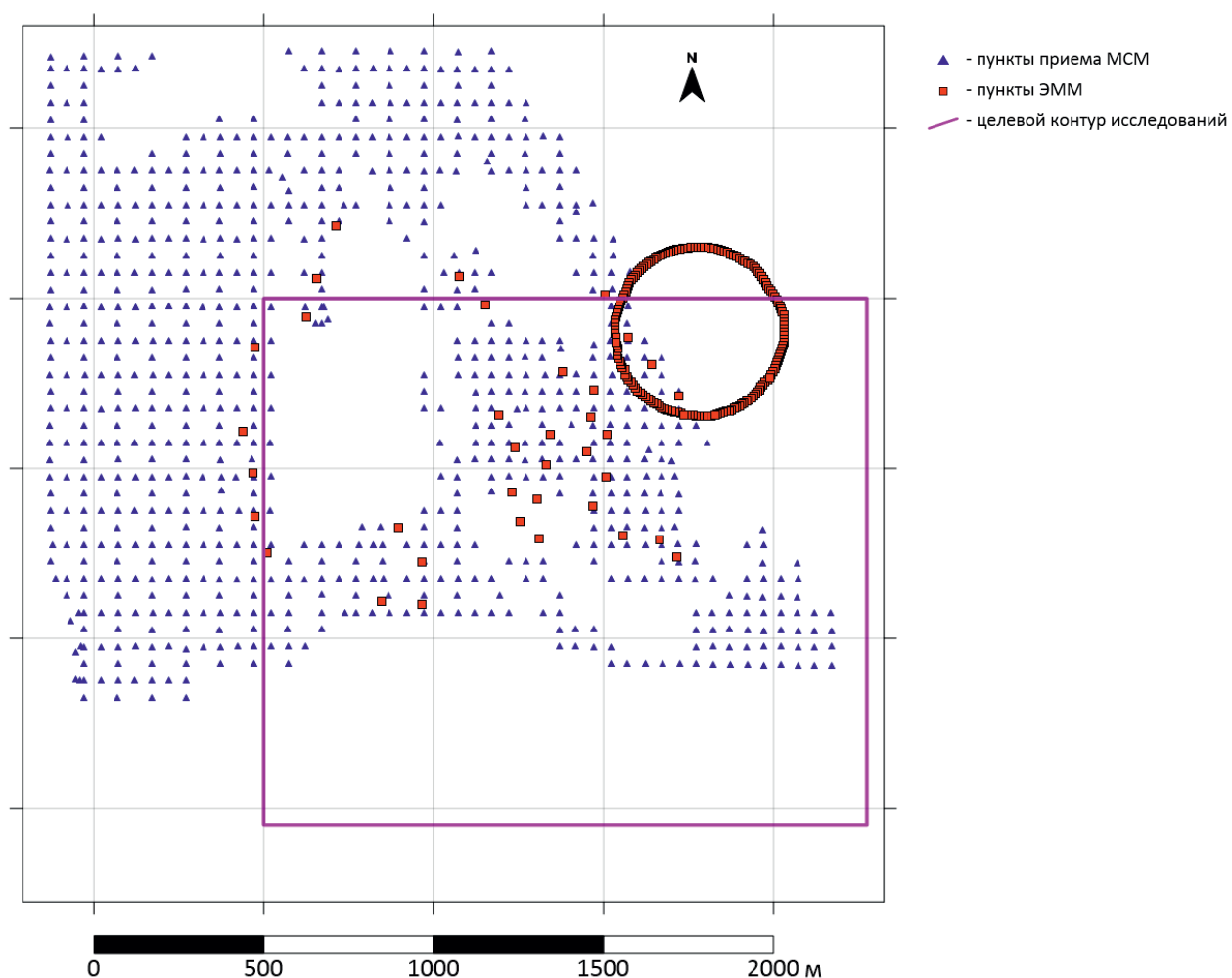
Работы проводились с января по март 2023 г. на участке действующего рудника «Октябрьский» в 7 км на север от района Талнах, г. Норильск. Участок работ сильно осложнен наличием техногенных объектов таких как: ЛЭП, трубопровод, дороги, отсыпки горной породы.

На рис.1 представлены схемы наблюдений сейсмо- и электромониторинга.

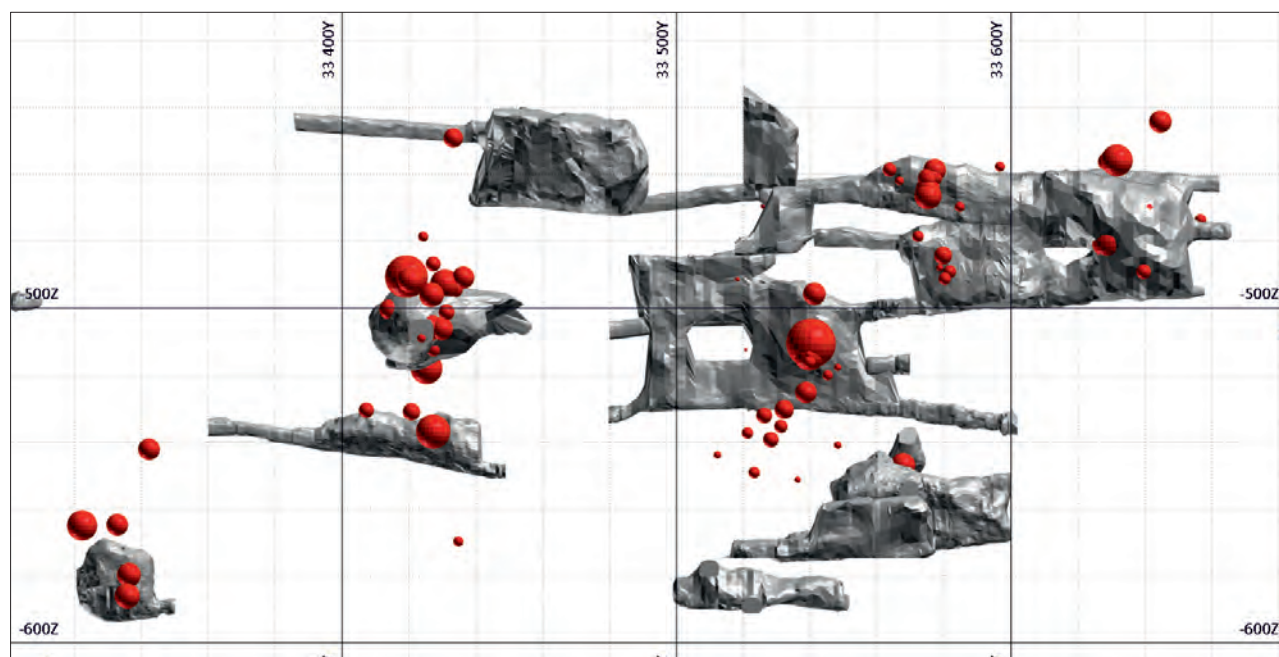
Результаты

Основным методом сейсмического мониторинга являлся микросейсмический мониторинг. В ходе наблюдений было зарегистрировано около 92 000 событий различной природы: события от техногенных воздействий на породу, события во время проведения подземных взрывов и вторичная наведенная сейсмичность. Анализ результатов показал, что большая часть событий связана со сбросом горной породы в рудоспуски.

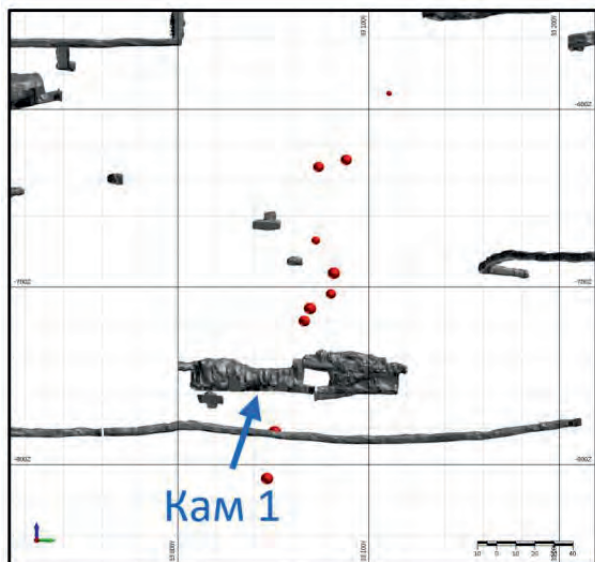
Отдельный период обработки составлял «тихие» вечерние часы, в которые проводились только взрывные мероприятия, свободные от другой техногенной деятельности на руднике. В данные период зафиксированы события, относящиеся исключительно к вторичной сейсмичности в результате подрывов шурфов или областей выработок с повышенным напряженно-деформированным состоянием. Одной из задач мониторинга было наблюдение за потенциальным распространением трещин от взрывов вверх до вышележащей водона-



▲ Рис. 1. Схемы наблюдений.



▲ Рис. 2. Вертикальная проекция (вид с Востока) событий во время проведения подземных взрывов в камерах.



▲ Рис. 3. Схемы наблюдений.

сыщенной толщи D2jk. Результаты показали отсутствие опасных прорывов. События не доходят до подошвы водоносного пласта D2jk. Разброс событий по высоте вокруг камер составляет до 50 м (рис. 2).

В районе камеры 1 зафиксировано несколько импульсов, аномально распространяющихся вниз и вверх от камеры общей высотой до 150 м (до водоупора D2jk не доходят). В другие дни проведения наблюдений такие явления отсутствовали (рис. 3).

Также была посчитана суммарная энергия МСЭ за весь период наблюдений (кроме периодов проведения взрывных работ) по лоцированным событиям, имеющим не техногенную природу (рис. 4). Основная часть энергии МСЭ попадает в диапазон энергии 30-290 усл.ед. и отражена на карте синими областями – данные зоны приурочены к единичным событиям или событиям с низкой энергией. Они отражают процессы трещинообразования, однако не несут рисков, связанных с формированием здесь субвертикальных зон интенсивной открытой трещиноватости. Красным и желтым цветом выделена аномалия повышенной концентрации событий. Размер зоны по вертикали составляет

около 200 м с эпицентром на глубине ~675 м. Это указывает на повышенное напряженно-деформированное состояние пород, на этом участке могут проходить динамические процессы трещинообразования и деформации породы. Расстояние зоны до подошвы водоносного пласта D2jk составляет около 170 м.

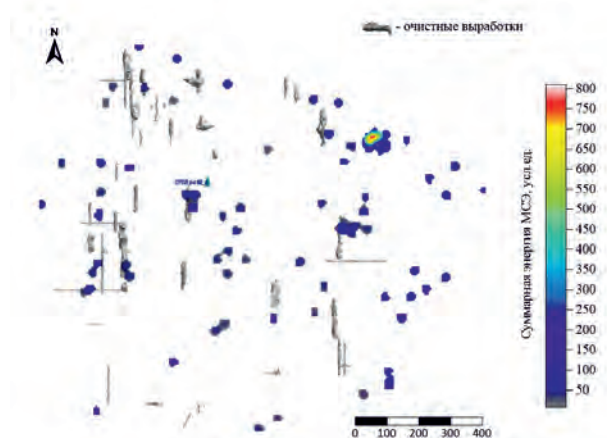
По результатам работ СЛБО были решены следующие задачи:

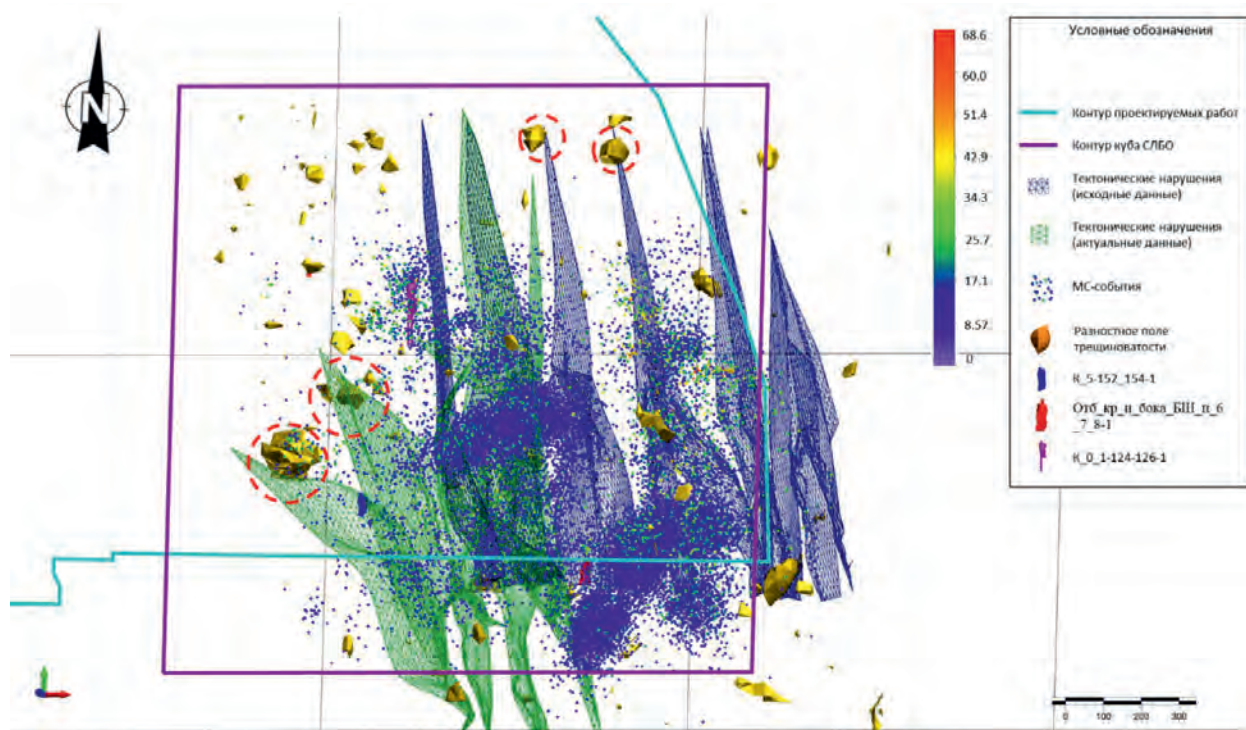
- определение общей геодинамической обстановки на площади работ;
- оценка развития водопроводящих трещин над отработанным пространством;
- оценка динамики развития трещиноватости над очистными выработками;
- анализ активности тектонических нарушений;

Пример сопоставления тектонических нарушений и аномальных зон СЛБО представлен на рис. 5. Зоны аномально высокой трещиноватости часто присутствуют на краевых участках разломов, особенно на их концах, что соответствует геотектонической обстановке, существующей в настоящее время. За счёт интенсивных техногенных воздействий, проводимых непосредственно на разломе, возможна его активизация.

Далее выполнено комплексное сопос-

▼ Рис. 4. Карта суммарной энергии микросейсмической активности.





▲ Рис. 5. Сопоставление линейных разломов тектонических каркасов с зонами аномальной трещиноватости.

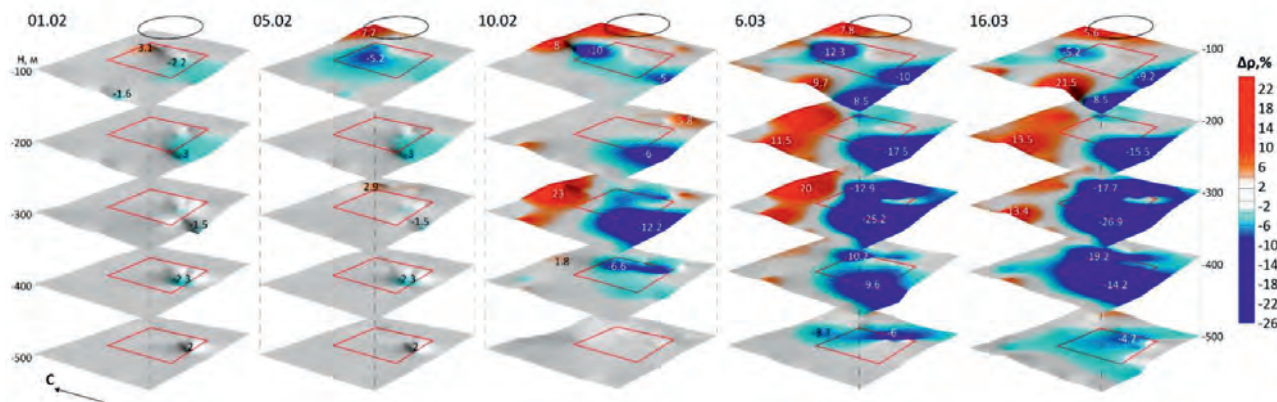
тавление результатов сейсмического мониторинга по МСМ и СЛБО. Распределение открытой трещиноватости (по данным СЛБО) и процесс трещинообразования (по данным МСМ) доминантно соответствует глобальной диагональной системе с основными азимутальными направлениями «юго-восток ↔ северо-запад» и «юго-запад ↔ северо-восток». Местная тектоническая обстановка соответствует пассивной фазе погружения глубинного блока фундамента, что не способствует росту вверх открытых мегатрещин. Также по сопоставлению активности МСЭ и трещиноватости были сделаны выводы о целевых задачах проводимых работ: выявлению водопроводящих трещин над очистными выработками. По результатам анализа и интерпретация материалов СЛБО и МСМ выделены два участка, где отмечается сквозное (через подошву D2jk) трассирование МС-событий, но интенсивность открытой трещиноватости в данной толще незначительная. Это указывает на низкую вероятность формирования здесь открытых мегатрещин и, соотве-

ственно, каналов перетока воды. Однако, на площади исследования данные зоны являются первоочередными объектами контроля в режиме мониторинга и своевременного проведения профилактических мероприятий для исключения вертикальных перетоков воды в отработанные пространства.

По результатам электромагнитного мониторинга (ЭММ) были выделены зоны дефицита и профицита электропроводности (Рис.6).

По результатам обработки данных ЭММ (32 дня в активном режиме и 17 дней в пассивном) можно сделать следующие выводы:

По результату применения машинного обучения в данных активного мониторинга установлена: корреляция с известными сейсмособытиями, а также с эпизодами индустриальной подготовки ко взрывам и электрофизическими изменениями в среде от взрывов, наступающими после сейсмособытий. Характер поведения сопротивления после взрыва разнополярный соответствующий уменьшению и увеличению про-



▲ Рис. 6. Динамика перераспределения флюидального агента.

дольного сопротивления.

- выявлены «скачкообразные» изменения «фазового состояния» среды в периоды 05.02.2023-10.02.2023 и 02.03.2023-10.03.2023.

- прослежена динамика перераспределения флюидального агента между основными коллекторами горного массива.

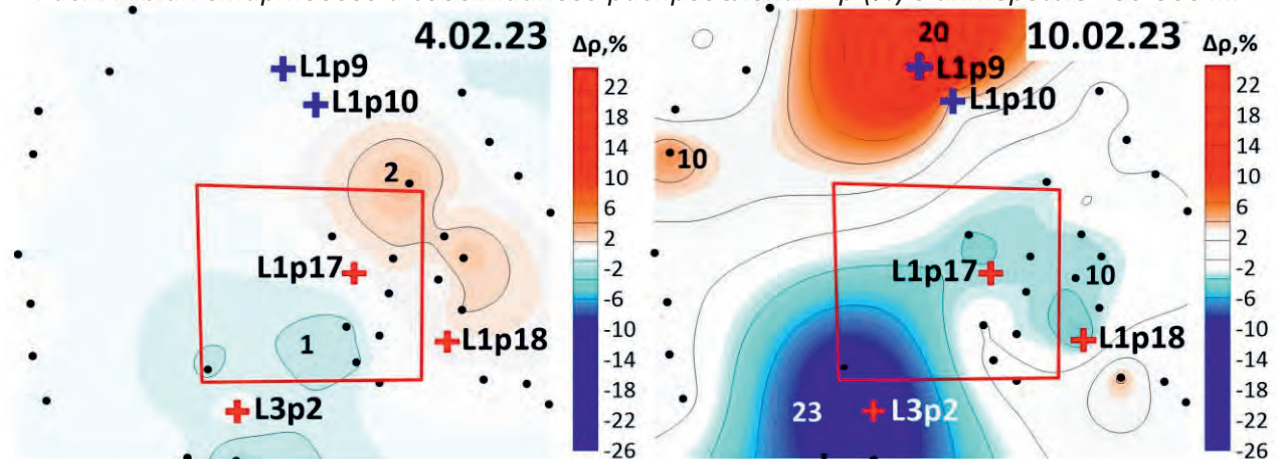
- установлен прецедент фрагментарной проницаемости мантуровской свиты по факту глубинной миграции значений дифференциального сопротивления.

Пассивный режим:

Выделено 106 475 амплитудно-значимых «событий», из них:

- 88 413 событий 1-го типа (единичные выбросы),
- 15 493 события типа 2 (длительностью до 30 секунд),
- 2569 – типа 3 (длительностью более 30 секунд).

▼ Рис. 7. План стартового и событийного распределения Δp (%) в интервале 200-300 м.



Все выделенные по амплитудному признаку «события» были отнесены к разряду промышленных помех, не имеющих прямой связи с подземными взрывными работами.

Анализ возможных причин релаксации водообмена между водоносными коллекторами ВЧР и нижним полупространством.

Значительное изменение интервального дифференциального сопротивления Δp с эпицентрами в терминалах L3p2, L1p17, L1p18 (профицит, зона ослабленных трещиноватых пород) и L1p09, L1p10 (дефицит, зона интенсивного карстообразования и тектонических нарушений) произошло 10 февраля 2023 (рис. 7).

Сравнение горизонтальных секторальных срезов стартовой модели и 10 февраля показало увеличенный дифференциал Δp . На севере и юге площади

изменение разнонаправленно - на севере выделяется зона дефицита проводимости (увеличение сопротивления до 20 %, на юге – уменьшение до 23 %. Этот дифферент может означать, что в гидравлически связанных резервуарах произошло перераспределение объемов воды вследствие геодинамических либо термальных процессов ВЧР. Накопленная в кавернозных коллекторах C_2P_2 - $D_{зж}$ вода из верхнего резервуара на уровне 130-200 м стала разгружаться на нижний уровень 230 – 400 м. Направление разгрузки – обширная зона трещиноватости в интервале 200-300 м в юго-восточном направлении в сторону локальной ослабленной зоны мантуровской свиты.

Заключение

Выводы по сейсморазведке:

1. МСМ отчетливо фиксирует техногенную активность на руднике.
2. События, зафиксированные во время проведения подземных взрывов в очистных выработках, не достигают подошвы водоносного пласта D_{2jk} .
3. Во время МСМ зафиксированы события не техногенного характера, указывающие на увеличение напряженно-деформированного состояния породы.
4. По результатам сейсмических работ СЛБО решены задачи оценки трещиноватости, НДС геосреды, активности тектонических нарушений, актуализации геодинамической обстановки, выделения ослабленных зон.

Выводы по комплексу методов:

1. Анализ результатов комплекса геофизических методов позволяет с пространственной погрешностью 50 м выделить зоны повышенной трещиноватости, ослабленные участки, зоны предполагаемого изменения водонасыще-

ния.

2. Выявленные аномалии (профицит) электропроводности зоны №2 в предположении является продолжением зоны дезинтеграции пород.

3. Сейсмомониторинг фиксирует участки ослабленных пород трассировкой в вертикальном направлении от камеры КАМ-1 и вдоль тектонических определенных разломов.

Результаты проведенных исследований подтверждают, что безопасность подземных работ на рудных месторождениях напрямую зависит от своевременного выявления признаков повышения трещиноватости и напряженно-деформированного состояния грунта. Использование комплексных методов сейсмического и электромагнитного мониторинга позволяет определять зоны потенциальной опасности, контролировать развитие аномальных процессов и своевременно принимать меры для предотвращения обрушений и затоплений.

Обнаруженные сейсмические и электромагнитные аномалии свидетельствуют о наличии активных зон ослабленных пород и опасных трещиноватых областей. Такой системный подход к мониторингу обеспечивает раннюю диагностику возможных чрезвычайных ситуаций и способствует повышению безопасности работ, что особенно важно при работе в сложных геологических условиях.