

**К.С. Мальский, В.В. Романов**

# **ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК СЕЙСМИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ И ГЕОРАДИОЛОКАЦИЕЙ\***

Рассмотрена задача определения состояния горных выработок георадиолокацией и сейсмическими методами. Георадиолокация применялась для картирования обводненных участков горного массива, недоступных прямому обследованию. Для выделения зон с повышенной водонасыщенностью использовался признак локального возрастания амплитуды отраженных электромагнитных волн. Сейсмические методы использовались для оценки устойчивости выработок месторождения к сейсмическим событиям различного ранга — горным ударам, вибрациям, акустической эмиссии, промышленным взрывам, слабым и сильным землетрясениям. Регистрация микросейсмических колебаний позволила уточнить спектральный состав и интенсивность возможных сейсмических событий, выделить частоты наибольшей уязвимости выработок, проследить контуры ослабленных зон в пределах рудника. Для обработки записей микросейсм применялся метод японского сейсмолога Накамуры. Использование указанных методов инженерной геофизики показано на примере золоторудного месторождения Мурунтау (Узбекистан). На основании полученных результатов было проведено детальное микросейсмическое районирование месторождения и отмечены области повышенной водонасыщенности.

Ключевые слова: геофизические методы, сейсмические сигналы, горные выработки, инженерная электроразведка, георадиолокация.

## **Введение**

**Б**езопасная и эффективная разработка месторождений полезных ископаемых возможна только при условии контроля состояния горных выработок. Задача установления наиболее уязвимых участков месторождения успешно решается комплексом геофизических методов. Разнообразие физических свойств, их тесная связь с геологическими и физико-механиче-

---

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-35-60070 мол\_а\_дк.

скими параметрами, делает применение инженерно-геофизических методов перспективным направлением в области разработки месторождений.

В 2010 г. для локализации обводненных зон и районирования по степени устойчивости к землетрясениям и массовым взрывам был выполнен комплекс геофизических работ на месторождении Мурунтау (Узбекистан). В предлагаемой статье представлено описание комплекса, методика полевых работ, особенности обработки и интерпретации, полученные результаты.

### **Геологическое строение месторождения Мурунтау [2]**

Карьер Мурунтау Навоийского горно-металлургического комбината — золоторудное предприятие, глубина которого в настоящее время составляет 450 м и постоянно увеличивается. Месторождение Мурунтау представлено крутопадающим рудным телом, прослеженным от поверхности до глубины около двух километров. В результате тектонических процессов отдельные блоки месторождения отделились от основного рудного тела и сместились в сторону, погрузившись на глубину более (500–600) м.

Месторождение Мурунтау расположено в пределах герцинского геосинклинального пояса Южного Тянь-Шаня, в древних осадочно-метаморфических образованиях. Указанные отложения подразделяются на ауминзинскую, тасказганскую и бесапанскую свиты рифея. В нижней части разреза преобладают карбонатно-терригенно-вулканогенные отложения, включающие углисто-сланцисто-кварцевые и углисто-сланцистые сланцы. Месторождение Мурунтау размещено в верхней части разреза, в песчаниках и алевролитах бесапанской и частично тасказганской свит.

Главной чертой рудовмещающей толщи является тонкое переслаивание пород, с различными физико-механическими свойствами и составом, что влияет на особенности морфологии и характера оруденения, а также на геофизические параметры.

Строение и структуру рудного поля месторождения Мурунтау определяет Тасказганская антиклиналь, в крыльях которой развиваются пологие перегибы слоев. Месторождение Мурунтау расположено в одном из таких перегибов. Рудное поле провано Южным, Структурным и Северо-восточным разломами. Отложения золоторудного района смяты в тесно сжатые складки с крутым падением крыльев, осложненные складками низших порядков. Шарниры структур изогнуты в горизонтальной плоскости и подняты или погружены под углами до 30°.

Район месторождения имеет высокую сейсмичность — 8 баллов по шкале MSK-64. Строение и признаки современной геодинамической активности района указывают на возможность тектонической перенапряженности рудного поля ниже коры выветривания. Состояние бортов карьера Мурунтау характеризуется наличием деформирующихся участков размером до ста и более метров. При этом большая их часть приходится на северный и южный борта, предположительно подвергающиеся действию растягивающих напряжений. Восточный и западный борта устойчивее, они подвержены напряжениям сжатия, так как плоскости напластования наклонены в сторону выработанного пространства. Для пород средних и глубоких горизонтов месторождения отмечается повышение прочностных свойств по сравнению с верхними горизонтами. Процессы концентрации напряжений распространяются вглубь массива, где породы находятся в состоянии объемного сжатия, а по контуру карьера формируются зоны с различными видами напряженно-деформированного состояния пород и формами проявления горного давления.

Гидрогеологические условия месторождения в большей степени определяются дренированием вод подземными горными выработками, что обуславливает безводность горного массива. Подземные воды спорадически распространены в виде подвешенных линз, имеющих сезонное развитие. В результате геофизических работ методом вертикального электрического зондирования, проведенных геомеханическим бюро карьера Мурунтау, были определены глубины проникновения техногенных вод, дающие два интервала замачивания: один на глубине (3,5—4,5) м, другой — (17,0—25,0) м. Подпитка подземных вод происходит из-за фильтрации вод по зонам разлома и утечками техногенных вод. Неравномерная обводненность участков карьера приводит к образованию в разрезе потенциально-неустойчивых обводненных участков.

При добыче руды применяются массовые взрывы с использованием от 300 до 1500 т взрывчатого вещества в скважинах глубиной 18 м. Таким образом, разработка карьера сопровождается рядом геотехнологических проблем — вероятными горными ударами, обрушением скважин, подтапливанием, оползанием бортов карьера.

### **Геофизические методы при исследовании месторождения**

Выбор комплекса геофизических методов в горных выработках определяется спецификой решаемых задач и условиями

проведения работ. Наиболее эффективными являются сейсмические методы и георадиолокация [4]. Наблюдения за полем микросейсмических колебаний позволяют спрогнозировать уровень и частоты опасных сейсмических явлений, возникающих в конкретных участках выработок. При помощи георадиолокации определяются зоны с аномально высокими водно-физическими свойствами [1].

Георадиолокация представляет сканирование среды электромагнитным полем кило- и мегагерцового диапазона. При проведении георадиолокации в пространстве горного массива непрерывно перемещается антенный блок, состоящий из излучающего и приемного устройства. Антенна-источник возбуждает импульсное электромагнитное поле с частотами (90–1700) МГц, которое воспринимается приемным устройством. Импульсы вторичных электромагнитных волн после обработки формируют изображение геологической среды на глубинах до (15–20) м [4, 11].

Скорость электромагнитной волны обратно пропорциональна относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ , которая у подземных вод в 10–20 раз больше, чем у большинства породообразующих минералов. Поэтому скорость электромагнитных

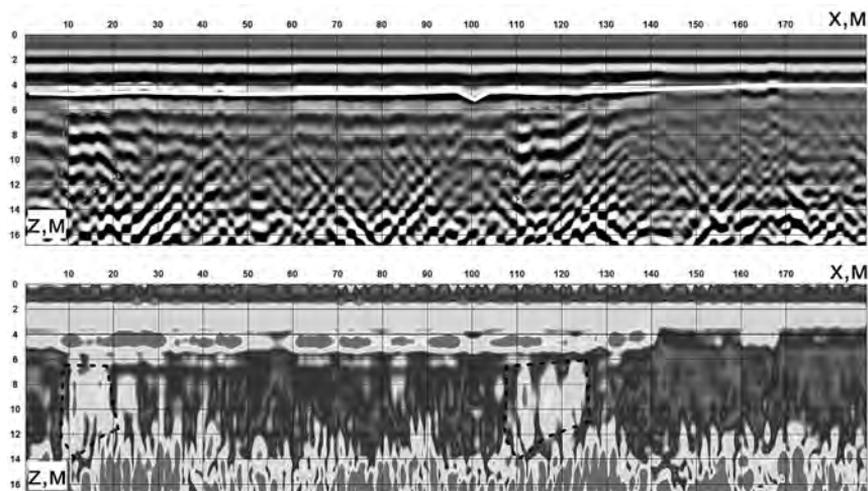


Рис. 1. Георадиолокационный разрез (сверху) и разрез мгновенных амплитуд Гильберт-преобразования (снизу). Сплошной линией указана отражающая граница (глубина 4,5 м), пунктиром – зоны повышенных амплитуд отраженных волн, хорошо выделяемые на разрезах мгновенных амплитуд

волн в обводенных зонах резко падает, что вызывает увеличение на георадиолокационном разрезе (рис. 1).

Для поиска обводенных зон на карьере Мурунтау применялся георадиолокационный комплекс ОКО-3 (производство ООО «Логис») с антенным блоком 250 МГц [4, 10]. Глубинность исследования в условиях карьера не превышала 10–12 м.

Другим направлением исследований горных выработок является микрорайонирование по ожидаемой интенсивности опасных сейсмических событий – землетрясений, горных ударов, волн от массовых взрывов. Для решения задач этого направления анализируются спектры микросейсмических колебаний. Микросейсмические представляют собой непрерывные, слабые колебания земной поверхности в широком интервале амплитуд и частот. Для целей сейсмического микрорайонирования наибольший интерес представляют микросейсмические с частотами (0,5–10) Гц [8].

При регистрации микросейсмических колебаний применяются трехкомпонентные низкочастотные акселерометры или велосиметры. Вектор ускорения или скорости микросейсмических колебаний определяется совокупным измерением при

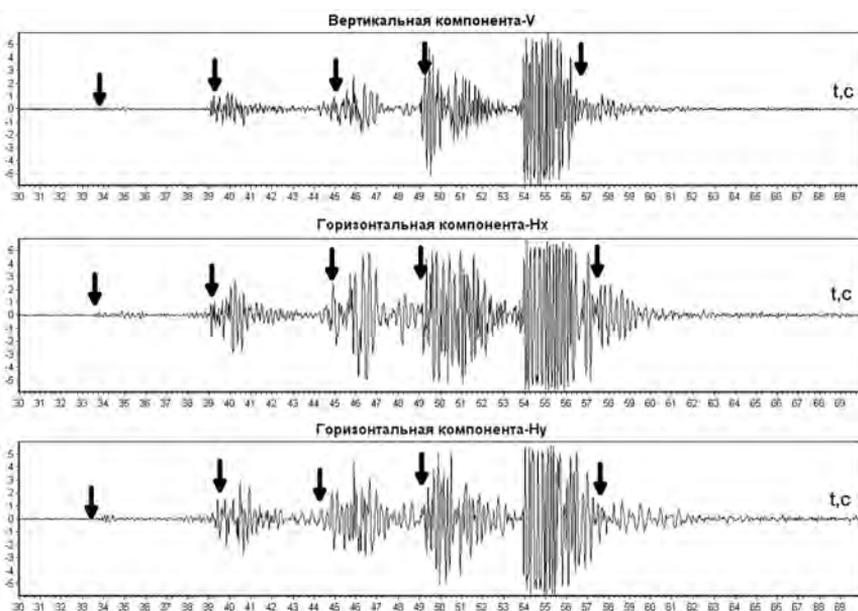


Рис. 2. Возникновение микросейсмических колебаний при проведении массовых взрывов на карьере Мурунтау. Показаны записи трех компонент векторной акселерограммы, стрелками выделены проявления отдельных взрывов

помощи установки из трех различно-ориентированных датчиков – вертикального и двух горизонтальных. Акселерометр ориентируется по сторонам света так, чтобы ось чувствительности первого горизонтального датчика ( $X$ ) совпадала с направлением север-юг, а у второго ( $Y$ ) ориентировалась по направлению запад-восток.

Реакция точки наблюдения на ожидаемое сейсмическое воздействие оценивается по методу японского сейсмолога Накамуры [11]. Метод заключается в вычислении комплексного спектра, равного отношению спектральных амплитуд горизонтальной и вертикальной компонент микросейсмических колебаний (1).

$$\frac{H}{V} = \frac{H_X + H_Y}{2V}$$

где  $V$  – спектральная амплитуда вертикальной компоненты микросейсмических колебаний,  $H$  – средняя спектральная амплитуда по двум ортогональным компонентам  $H_X$  и  $H_Y$ .

Для измерений на месторождении Мурунтау применялся четырехканальный автоматический регистратор сейсмических сигналов «Дельта-03М» (производство ООО «Логис») в комплекте с сейсмическим трехкомпонентным акселерометром А0531. Записи микросейсмических колебаний синхронизировались с массовыми промышленными взрывами (рис. 2).

### Полученные результаты

Проведенные георадиолокационные исследования позволили установить контуры известных обводненных зон карьера Мурунтау, а также выявить новые, ранее неизвестные трещиноватые зоны, заполненные подземными водами. Для повышения достоверности интерпретации на георадиолокационные разрезы наносились полноцветные диаграммы мгновенных амплитуд (рис. 3). С высокой степенью вероятности отражающие границы с повышенными амплитудами совпадали с контурами обводненных зон [3].

Для определения устойчивости горного массива анализировались спектры Накамуры до прихода волн, вызванных массовыми взрывами, во время колебаний, спровоцированных взрывах и после их прекращения (рис. 4).

На спектрах выделяются два устойчивых максимума на частотах 1–2 Гц и 4–5 Гц. Этим пикам соответствовало увеличение интенсивности сейсмических воздействий на 0,3 балла в отдельных, ослабленных разломной тектоникой, участках месторождения.

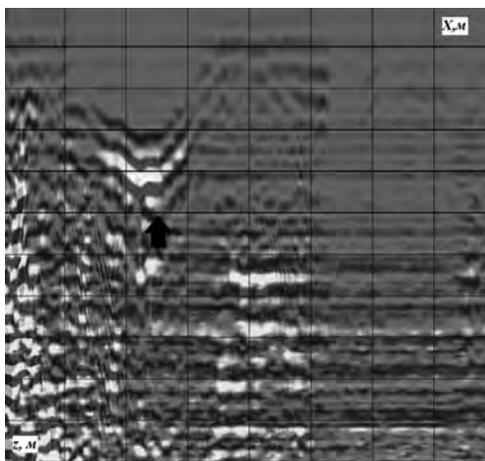


Рис. 3. Установление контуров обводненной зоны на георадиолокационном разрезе с нанесенным на него разрезом мгновенных амплитуд. Установленная зона показана стрелкой

Была отмечена различная реакция горного массива на слабые и сильные сейсмические колебания. В момент прихода упругих волн от массовых взрывов в спектральном диапазоне 1–3 Гц наблюдалось приращение «балльности», тогда как до и после

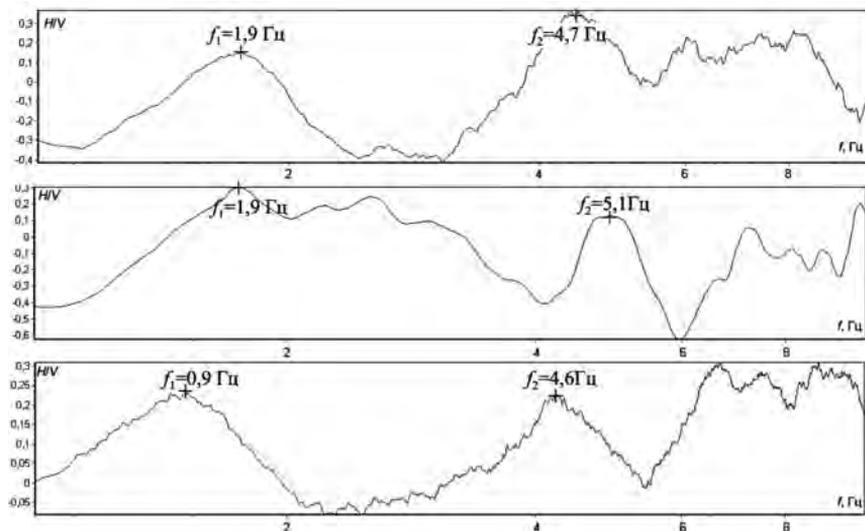


Рис. 4. Спектры Накамуры для различных временных интервалов (пояснения в тексте)

взрыва в том же интервале фиксировалось лишь близкие к нулю или отрицательные значения спектра Накамуры.

### **Обсуждение результатов**

Полученные результаты подтвердили высокую надежность и разрешающую способность георадиолокации при картировании водонасыщенных зон в слабромагнитных горных породах. Локальное возрастание амплитуд объясняется ростом коэффициента отражения границы из-за повышения скоростной дифференциации среды при обводнении. Скопления подземных вод выделялись совместной интерпретацией наложенных друг на друга георадиолокационного разреза и диаграммы мгновенных амплитуд (рис. 3) [5, 6, 7].

Применение метода Накамуры к записям микросейсмических колебаний позволило провести районирование рудника Мурунтау по ожидаемой интенсивности землетрясений и иных сейсмических событий. Максимальное приращение интенсивности не превысило 0,3 балла, наиболее уязвимым объект оказался к частотам 2 и 4 Гц. Первый пик (2,0 Гц) оказался близким к расчетной фундаментальной частоте бортов карьера Мурунтау — 1,8 Гц. При проведении массовых взрывов аномальная интенсивность также проявилась во всем частотам в диапазоне 1–3 Гц.

Различия в откликах среды на массовые взрывы и слабые микросейсмические колебания указывают на существенную нелинейность свойств среды по отношению к сейсмическим событиям разного уровня. В связи с этим, представляется, что сейсмическое микрорайонирование, основанное только на записях слабых землетрясений, учитывает не все особенности разрушающих воздействий более сильных воздействий.

### **Выводы**

1. Признаком наличия обводненных зон в горных выработках являются повышенные значения мгновенных амплитуд отраженных электромагнитных волн, зарегистрированных георадиолокацией.

2. Микросейсмическое районирование месторождений реализуется путем анализа записей колебаний поверхностей горных выработок при помощи акселерометров на основе метода Накамуры.

3. Отмечено резонансное увеличение амплитуды слабых и сильных сейсмических событий на фундаментальной частоте борта карьера Мурунтау.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данильев С. М., Глазунов В. В. Обоснование георадиолокационных критериев обнаружения и распознавания зон деструкций инженерных объектов на основе математического моделирования // Engineering Geophysics 2011. – 2011.
2. Рафаилович М. С. Золоторудные гиганты в черносланцевых толщах Центральной и Северной Азии // Отечественная геология. 2012. – № 1. – С. 29–39.
3. Романов В. В., Мальский К. С. Анализ возможностей изучения гидрогеологического режима карьеров и подземных горных выработок инженерной сейсморазведкой // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 6. – С. 74–78.
4. Романов В. В. Из опыта комплексного применения сейсморазведки и георадиолокации при инженерно-геологических изысканиях на территории Москвы // Инженерные изыскания. – 2015. – № 5–6. – С. 44–49.
5. Романов В. В. Интерпретация сейсмической томографии на примере изучения геологического строения оползневого склона // Разведка и охрана недр. – 2015. – № 3. – С. 34–37.
6. Романов В. В., Мальский К. С., Боровой Е. А. Определение устойчивости бортов карьеров при инженерно-геологических изысканиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 7. – С. 77–81.
7. Романов В. В., Гапонов Д. А. Применение инженерной сейсморазведки при изучении грунтовых вод в глинистых грунтах // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. – 2014. – № 6 (184). – С. 52–59.
8. Сергеев С. В., Синица И. В., Карякин В. Ф. Оценка склонности массива пород на КМА к горным ударам // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки. – 2015. – Т. 31. – № 9 (206). – С. 132–137.
9. Романов В. В., Посеренин А. И., Дронов А. Н., Мальский К. С. Обзор геофизических методов, применимых при поиске геомеханических нарушений вблизи горных выработок // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 1. – С. 243–248.
10. Соловьев Н. В., Романов В. В., Мальский К. С. Основные направления совершенствования технико-технологического обеспечения геологоразведочных работ // Разведка и охрана недр. – 2016. – № 5. – С. 47–53.
11. Nakamura Y. A. Method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface // Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports. – 1989. – Т. 30. – № 1. **ГИАБ**

## КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*Мальский Кирилл Сергеевич*<sup>1</sup> – доцент, e-mail: sabbat@mail.ru,  
*Романов Виктор Валерьевич*<sup>1</sup> – кандидат технических наук, доцент,  
e-mail: roman\_off@mail.ru,

<sup>1</sup> Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе.

UDC  
550.837.6+  
550.834.042+  
622

**K.S. Mal'skiy, V.V. Romanov**

## **ANALYSIS OF UNDERGROUND OPENINGS USING SEISMIC AND GEORADAR METHODS**

The work is devoted to an actual problem of determining the status and structure of mining GPR and seismic methods. We consider the use of GPR to map water-bearing sections of rock massif, inaccessible to direct examination. Seismic methods were used to evaluate the array of field resistance to seismic events of different rank – mountain shock, vibration, acoustic emission, industrial explosions, weak and strong earthquakes. Register microseismic oscillations allowed to specify the spectral composition and intensity of potential seismic events, select the frequency of the most vulnerable generation, trace the contours of the weakened zones within the mine. For the record processing microseismic vibrations applied method known Japanese seismologist Nakamura. The use of these methods of engineering geophysics exemplified gold deposit Muruntau (Uzbekistan). On the basis of the results was carried out detailed field microseismic zoning of the area and marked increased water saturation.

Key words: geophysical methods, seismic signals, mining, engineering electromagnetics, GRP.

### **AUTHORS**

*Mal'skiy K.S.*<sup>1</sup>, Assistant Professor, e-mail: sabbat@mail.ru,  
*Romanov V.V.*<sup>1</sup>, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,  
e-mail: roman\_off@mail.ru,

<sup>1</sup> Russian State Geological Prospecting University named after Sergo Ordzhonikidze (MGRI-RSGPU), 117997, Moscow, Russia.

### **ACKNOWLEDGEMENTS**

The study has been supported by the Russian Foundation for Basic Research, Project No. 163560070mol\_a\_dk.

### **REFERENCES**

1. Danil'ev S. M., Glazunov V. V. *Engineering Geophysics* 2011, 2011.
2. Rafailovich M. S. *Otechestvennaya geologiya*. 2012, no 1, pp. 29–39.
3. Romanov V. V., Mal'skiy K. S. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015, no 6, pp. 74–78.
4. Romanov V. V. *Inzhenernye izyskaniya*. 2015, no 5–6, pp. 44–49.
5. Romanov V. V. *Razvedka i okhrana neдр*. 2015, no 3, pp. 34–37.
6. Romanov V. V., Mal'skiy K. S., Borovoy E. A. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015, no 7, pp. 77–81.
7. Romanov V. V., Gaponov D. A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Seriya: Estestvennye nauki*. 2014, no 6 (184), pp. 52–59.
8. Sergeev S. V., Sinitsa I. V., Karyakin V. F. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki*. 2015, vol. 31, no 9 (206), pp. 132–137.
9. Romanov V. V., Poserenin A. I., Dronov A. N., Mal'skiy K. S. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2016, no 1, pp. 243–248.
10. Solov'ev N. V., Romanov V. V., Mal'skiy K. S. *Razvedka i okhrana neдр*. 2016, no 5, pp. 47–53.
11. Nakamura Y. A. Method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports*. 1989, vol. 30. № 1.