

УДК 622.271.332:550.835(470.21)

ГЕОРАДАРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ И МОНИТОРИНГА ГОРНТЕХНИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

А.И. Калашник¹, А.Ю. Дьяков², Д.В. Запорожец³

¹ ведущий научный сотрудник лаборатории Геофлюидомеханики, кандидат технических наук, e-mail: kalashnik@goi.kolasc.net.ru

² научный сотрудник, e-mail: dyaakov@goi.kolasc.net.ru

³ научный сотрудник, e-mail: zaporojec@goi.kolasc.net.ru

^{1, 2, 3} Горный институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия

Аннотация. В работе приведено обоснование георадарного оборудования, применяемого для исследования внутренней структуры и мониторинга горнотехнических конструкций на горнопромышленных предприятиях Кольского региона. Измерения выполнялись продольным и поперечным профилированием с использованием георадарного комплекса Ramac/GPR X3M, оснащенного экранированными антеннами. Интерпретация результатов базировалась на выявленных закономерностях искажения наведенного электромагнитного поля вследствие различия физических свойств пород основного массива и внутренних зон неоднородностей (разломная тектоника, участки повышенной трещиноватости и водонасыщенности). Показано, что интенсивность искажения волнового поля определяется контрастностью физических свойств пород и глубиной расположения зоны. Многочисленными исследованиями подтверждена целесообразность применения данного георадарного оборудования для решения ряда горнотехнических задач.

Ключевые слова: георадарное оборудование, горнотехнические конструкции, внутренняя структура, неоднородность, водонасыщение.

GPR EQUIPMENT FOR INTERNAL STRUCTURE RESEARCH AND MONITORING OF MINING STRUCTURES

Anatolii Kalashnik¹, Andrey Dyakov², Dmitry Zaporojec³

¹Leading Researcher of Geoflyuidomechanical laboratory, Ph.D., e-mail: kalashnik@goi.kolasc.net.ru

²Scientific Researcher, e-mail: dyaakov@goi.kolasc.net.ru

³Scientific Researcher, mail: zaporojec@goi.kolasc.net.ru

^{1, 2, 3} Mining Institute KSC RAS, Apatity, Russia

Abstract. The paper describes the justification of georadar equipment used for research of internal structure and monitoring of mining structures at mining enterprises of Kola region. Measurements were performed by longitudinal and transverse profiling using Ramac/GPR X3M georadar complex equipped with screened antennas. The interpretation of the results was based on the detected patterns of distortion of the induced electromagnetic field due to the difference between the physical properties of the rocks of the main massif and the internal zones of inhomogeneity's (fault tectonics, areas of increased fracturing and

water saturation). Intensity of wave field distortion is shown to be determined by contrast of physical properties of rocks and depth of zone location. Numerous studies have confirmed the feasibility of using this georadar equipment to solve a number of mining problems.

Keywords: georadar equipment, mining structures, internal structure, heterogeneity, water saturation.

Введение. Ведение горных работ при разработке полезных ископаемых, строительство и эксплуатация глубоких карьеров и подземных рудников, выдвигают особые требования к устойчивому и функциональному состоянию горнотехнических конструкций. Своевременное выявление внутренних структурных неоднородностей пород (зоны трещиноватости, тектонические нарушения, раздробленные и обводненные зоны) играет важную роль в выборе рациональной и безопасной технологии ведения горных работ. В настоящее время активно развиваются неразрушающие (в основном геофизические) методы изучения структуры и состояния горнотехнических конструкций, среди которых необходимо выделить георадиолокационные (электромагнитные) и сейсмические [1]. Вместе с тем георадиолокационные методы, в сравнении с другими геофизическими, для решения горнотехнических задач являются относительно новыми и носят инновационный характер [2-6].

Цель работы. Методы георадиолокационного (в публикациях по горным наукам - георадарного) подповерхностного исследования горнотехнических конструкций основаны на изучении распространения наведенных электромагнитных волн в слагающих конструкции породах [3-5]. Идея заключается в излучении импульсов электромагнитных волн и регистрации сигналов, отраженных от границ раздела слоев и зон зондируемых пород, имеющих различные электрофизические свойства. Такими границами раздела в исследуемых породах являются, например, контакт между сухими и водонасыщенными грунтами (уровень подземных вод), контакты между породами различного литологического состава, между породой и материалом искусственного сооружения, между мерзлыми и талыми грунтами, между коренными и раздробленными породами и т.п. Вместе с тем постоянное и интенсивное ведение горных работ (бурение, взрывание, погрузка, транспортирование, и др.) вызывает различного рода помехи, приводящие к искажению результатов исследований [7-8]. Целью данной работы являлось обоснование применения для исследования внутренней структуры и мониторинга горнотехнических конструкций на действующих горнопромышленных предприятиях георадарного комплекса Ramac/GPR X3M, оснащенного экранированными антеннами.

Результаты исследования. Наиболее важными параметрами, характеризующими возможности применения метода георадиолокации в горнотехнических конструкциях, являются удельное затухание и скорость распространения электромагнитных волн в слагающих их породах. Удельное затухание определяет глубинность зондирования, а знание скорости распространения электромагнитных волн необходимо для пересчета измеряемого значения временной задержки отраженного импульса в расчетное значение глубины до отражающей границы.

Принцип действия аппаратуры подповерхностного георадарного зондирования (в принятой терминологии - георадара) основан на излучении сверхширокополосных (наносекундных) импульсов метрового и дециметрового диапазона электромагнитных волн и приеме сигналов, отраженных от границ раздела слоев зондируемых пород, имеющих различные электрофизические свойства [9-11].

Применение импульсов различного диапазона электромагнитных волн обусловлено выбором глубинности и необходимой разрешающей способности исследования (минимальный размер отражающего объекта или его компонентов). Разрешающая способность определяется длиной волны, которая прямо пропорциональна скорости и обратно пропорциональна частоте электромагнитных волн в массиве скальных пород. При понижении частоты уменьшается разрешающая способность, но увеличивается глубинность исследований. Например, для скальных пород глубинность георадарного зондирования антеннами 100-50 МГц составляет в среднем 30-40 м с разрешающей способностью 0,25-0,5 м, а для антенн 800-500 МГц разрешающая способность составит 0,05-0,1 м при глубине зондирования 5-15 м [8,11].

Диэлектрическая проницаемость, влияющая на скорость прохождения электромагнитных волн, является ключевым параметром для георадарных исследований, так как отраженные сигналы электромагнитных волн возникают на границах сред с разными скоростями. Для исследования массивов скальных пород и грунтов это границы между сухими и водонасыщенными породами (уровень подземных вод), контакты между породами различного литологического состава, между породой и материалом искусственного сооружения, между ненарушенными и нарушенными (раздробленными) породами [11].

В последнее время существенно возросло число новаций в камеральной обработке георадарных данных, прежде всего, связано с реализацией 3-х мерных систем [6,10,12,13]. Уделено большое внимание повышению информативности и точности оценки строения массива пород на основе совершенствования алгоритмов обработки данных с использованием ме-

тодов статистического анализа, процедур вейвлет-анализа, а так же оптимизации параметров площадных георадарных исследований.

Для исследования внутренней структуры и мониторинга горнотехнических конструкций на действующих горнодобывающих предприятиях, в экспериментальных условиях, был протестирован георадарный комплекс Ramac GPR/X3M (производства компании Mala GeoScience, Швеция), к характерным особенностям которого следует отнести: модульность, экранированные антенны, высокое качество, оперативность получаемых данных и возможность привязки к GPS [6,7].

Рабочий комплект георадарного комплекса (далее – георадара) Ramac GPR/X3M включает в себя: блок управления X3M, антенны и внешний персональный компьютер или специализированный модуль управления и визуализации (монитор Ramac XV10), который обрабатывает принятый сигнал и отображает полученные данные на дисплее (рис.1.).

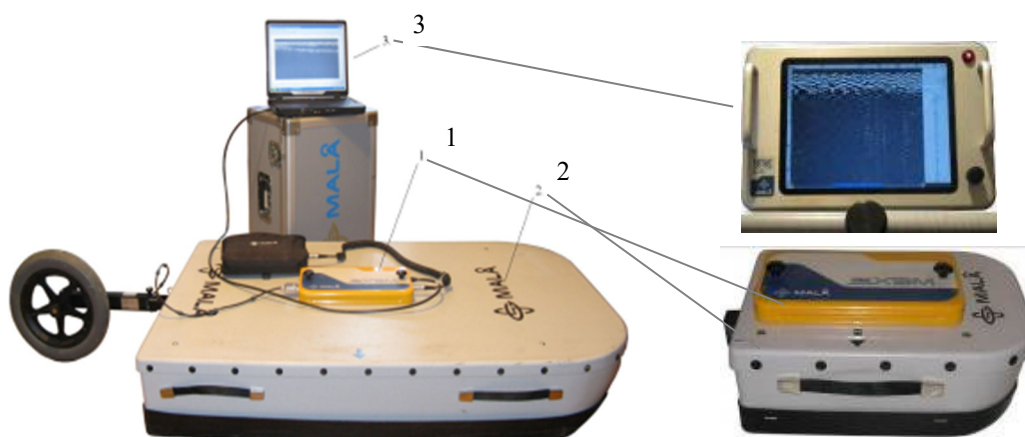


Рисунок 1 - Георадарный комплекс Ramac GPR/X3M: 1 - блок управления X3M; 2 – экранированные антенны; 3 - внешний ноутбук (слева) и специализированный модуль управления и визуализации монитор Ramac XV10 (справа)

Технические характеристики блока управления X3M георадара Ramac GPR/X3M приведены в таблице 1.

Существенным достоинством георадара Ramac GPR/X3M является комплектование экранированными антеннами. Экранированный тип антенн отличается от неэкранированных тем, что большая часть энергии излучается только в нижнюю полусферу пространства, то есть в исследуемые породы. То же самое относится и к принимаемым сигналам – но несомненным преимуществом экранированных антенн является то, что они

слабо чувствительны к электромагнитным волнам, пришедшим из пространства над антенной (иначе говоря - к помехам).

Таблица 1 - Технические характеристики блока управления ХЗМ георадара Ramac GPR

Разрядность, бит	16
Временной интервал зондирования, нс	до 2000
Количество точек в трассе	128-8192 (1024 в режиме автонакопления)
Скорость передачи данных, КБ/с	40-400
Частота повторения импульсов передатчика, кГц	100
Передача данных	IEEE 1284(ЕСР)
Количество накоплений	1-32768
Режимы регистрации данных	По времени, по перемещению, по шагам
Привязка данных на местности	С помощью датчиков перемещения, GPS или вручную
Поддерживаемые антенны	Экранированные антенны 100-800МГц
Питание, В	12 Li-Ion аккумулятор
Размеры, мм	310x180x30
Вес, кг	1,7
Рабочая температура, °С	-20 +50
Пылевлагозащита	IP 67

Экранированные антенны георадара Ramac GPR/ХЗМ содержат передающий и приемный элементы в едином корпусе. Приемный элемент находится в передней части, а передающий – в задней части корпуса. Технические характеристики антенн георадара Ramac GPR/ХЗМ представлены в таблице 2.

Георадар Ramac GPR/ХЗМ работает следующим образом: блок управления ХЗМ посылает синхронизирующий сигнал передающему и приемному модулям. После получения сигнала передатчик генерирует и посылает электрический импульс в антенну. От антенны импульс распространяется в изучаемую среду, в ней он отражается от различных неоднородностей и возвращается к антенне (к приемнику).

Таблица 2 - Технические характеристики антенн георадара Ramac GPR/X3M

Описание	Частота зондирования, МГц	Средняя разрешающая способность, м	Диапазон рабочих глубин, м	Размеры, м. Вес, кг.
Антенна экранированная 100 МГц	100	0,25	0-30	1,25×0,78×0,2 25,5
Антенна экранированная 500 МГц	500	0,1	0-8	0,5×0,33×0,16 5
Антенна экранированная 800 МГц	800	0,05	0-3	0,38×0,2×0,12 2.6

Приемник после получения синхронизирующего сигнала начинает накапливать выборки с определенной периодичностью по времени и передавать их блоку управления X3M. Блок управления X3M помещает каждую поступающую выборку на соответствующее место в данной трассе. Когда трасса будет полностью сформирована, она посылается на компьютер, где сохраняется на жестком диске компьютера и отображается на мониторе.

При проведении съемки георадар перемещается по размеченному профилю наблюдения, излучая импульсы, получая и записывая трассы с определенным заданным шагом: по расстоянию или по времени. В результате получается непрерывный профиль - запись подповерхностной волновой картины по профилю наблюдения, называемая радарограммой.

По результатам георадарной съемки, с использованием специальных процедур обработки программного продукта «RadExplorer» (производства ООО «ДЕКО-Геофизика»), строятся временные разрезы (радарограммы), на которых по горизонтали указывается расстояние в метрах, а по вертикали – время двойного пробега волны. Волновая картина радарограммы представляет собой совокупность записей сигналов (трасс), пришедших к приемной антенне в интервал времени от начального момента посылки зондирующего импульса до конца интервала записи (развертки). Начальные точки трасс располагаются на горизонтальной оси с тем шагом, с которым они были записаны на профиле.

Задачей интерпретации радарограмм являлось выделение, и проследивание осей синфазности отраженных волн от различных границ раздела (отражающих границ) и их сопоставление с горно-геологическими особенностями разреза. Признаками, по которым объект распознавался на радарограмме

программах в процессе интерпретации, служили различные характеристики волнового поля (участки с различными типами записи).

Для преобразования временного разреза в глубинный возможно использовать два способа определения диэлектрической проницаемости и скорости электромагнитной волны в массиве пород в полевых условиях, так называемое “in situ” – на месте [12]. В традиционном исполнении «антенна-излучатель» и «антенна-приемник» осуществляется по годографу дифрагированной волны - условно называется способом гипербол, и применим, когда на радарограмме отчетливо проявляются волновые эффекты в виде гипербол. Этот способ позволяет получить значения диэлектрической проницаемости и скоростные характеристики разреза с определенной погрешностью (в пределах разрешающей способности применяемых антенн). Второй способ по годографу отраженной волны - способ оценки скоростей может быть реализован по данным многоканальных измерений или одноканальных радаров, работающих с изменяемым расстоянием между передающей и приемной антеннами (построение годографа задержки сигнала). Определение диэлектрической проницаемости и скоростной модели разреза этим методом осуществляется путем последовательного проведения измерений. В свою очередь, использование двух и более комплексов георадиолокации, отличающихся способами получения информации, весьма затратное, ввиду их высокой аппаратной стоимости. Таким образом, имея в своем распоряжении только экранированные антенны, где приемник и передатчик находятся в едином корпусе, использовалось вычисление скоростей в разрезе по годографу дифрагирующей волны.

Выводы. Приведено обоснование георадарного оборудования Ramac/GPR X3M, оснащенного экранированными антеннами, применяемого для исследования внутренней структуры и мониторинга горнотехнических конструкций на горнопромышленных предприятиях Кольского региона. Георадарные измерения выполнялись продольным и поперечным профилированием на исследуемых участках. Интерпретация результатов базировалась на выявлении закономерностей искажения наведенного электромагнитного поля вследствие различия физических свойств пород основного массива и внутренних зон неоднородностей (разломная тектоника, участки повышенной трещиноватости и водонасыщенности). Показано, что интенсивность искажения волнового поля определяется контрастностью физических свойств пород и глубиной расположения зоны. В частности, выявленные особенности геолого-структурного строения скального массива на уступах карьера позволяют выполнить подбор рациональных параметров буровых, взрывных и экскаваторных работ, оптимально учи-

тывающих эти особенности, и позволяющие обеспечить максимально возможное равномерное дробление горной массы для последующих технологических этапов ее обработки. Многочисленными исследованиями подтверждена целесообразность применения данного георадарного оборудования для решения ряда горнотехнических задач.

ЛИТЕРАТУРА

1. Abramov N.N. Identification of water-saturated zones in a protective hydraulic earthen structure by synchronous electromagnetic and seismic sounding / Abramov N.N., Dyakov A.Yu., Kalashnik A.I. // Power Technology and Engineering, 2019. – Т. 53– № 2– С. 167-171.

2. Мельников Н.Н. Инновационные георадарные технологии изучения подповерхностной структуры и состояния природно-технических систем / Мельников Н.Н., Калашник А.И. // Вестник КНЦ, 2010. - №3. – С.4-8.

3 Калашник А.И. Подповерхностное георадарное зондирование горно-геологических сред Кольского полуострова / Калашник А.И., Запорожец Д.В., Дьяков А.Ю., Демахин А.Ю. // Вестник МГТУ: Тр. Мурман. гос. тех. университета, 2009. –т.12. - №4. – С.576-583.

4. Javier Rey Characterization of the sedimentary fabrics in ornamental rocks by using GPR / Javier Rey, Julián Martínez, Violeta Montiel, Francisco Cañadas, Nicolás Ruiz // Near Surface Geophysics 15(5), 2017, – Pages 457-465

5. Allen Benter GPR signal attenuation through fragmented rock / Allen Benter, Wayne Moore, Michael Antolovich Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, 2016 – Section A: Mining Technology. – Volume 125. – Issue 2. – Pages 114-120

6. Мельников Н.Н. Применение современных методов для комплексных исследований состояния гидротехнических сооружений региона Баренцева моря / Мельников Н.Н., Калашник А.И., Калашник Н.А., Запорожец Д.В. // Вестник МГТУ, 2017. – Т. 20. – № 1. С. – 13-20.

7. Мельников Н.Н. Опыт применения георадарных подповерхностных исследований в западной части российского сектора Арктики / Мельников Н.Н., Калашник А.И., Запорожец Д.В., Дьяков А.Ю., Максимов Д.А. //Проблемы Арктики и Антарктики. – 2016. - № 1. – С.39-49.

8. Калашник А.И. Исследования георадарами структуры и текущего состояния горных пород, слагающих уступы основного карьера Ковдорского ГОКа / Калашник А.И., Запорожец Д.В., Дьяков А.Ю., Казачков С.В., Сохарев В.А. // Горный журнал. – 2014. – № 4. – С.60-64.

9. Мельников Н.Н. Создание многоуровневой системы геодинамического мониторинга горнотехнических и нефтегазовых объектов западной части российского сектора Арктики / Мельников Н.Н., Калашник А.И. // Арктика: экология и экономика. – 2015. - № 3 (19). – С.66-75.

10. Калашник А.И. Исследования ограждающего насыпного гидротехнического сооружения как прототипа дамбы хвостохранилища горно-обогатительного предприятия / Калашник А.И., Калашник Н.А. //Вестник КНЦ. – 2013. - № 1. – С. 27-30.

11. Калашник А.И., Казачков С.В., Сохарев В.А., Запорожец Д.В., Дьяков А.Ю. Выявление дислокаций в скальных горнотехнических конструкциях // Вестник МГТУ: Тр. Мурман. гос. тех. университета. – 2013. – Т.16. - № 1. – С. 93-97.

12. Mohamed Elkarmotya In-situ GPR test for three-dimensional mapping of the dielectric constant in a rock mass / Mohamed Elkarmotya, Camilla Colla, Elena Gabrielli, Paolo Papeschi, Stefano Bonduà, Roberto Bruno // Journal of Applied Geophysics, 2017. – Volume 146. – Pages 1-15

13. Melnikov N.N., Kalashnik A.I., Kalashnik N.A. Integrated multi-level geofluid mechanics monitoring system for mine waterworks / Melnikov N.N., Kalashnik A.I., Kalashnik N.A. // Eurasian Mining. – 2018.– №2. – С.7-10.

УДК 622.831.3:622.34

ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАЗРАБОТКИ РУДНЫХ ПЛАСТОВ В ТЕКТОНИЧЕСКИ НАПРЯЖЕННЫХ ПОРОДАХ

А.И. Калашник

ведущий научный сотрудник лаборатории Геофлюидомеханики, канд. техн. наук, Горный институт КНЦ РАН, Апатиты, Россия, e-mail: kalashnik@goi.kolasc.net.ru

Аннотация. В работе изложены результаты исследования, направленного на обоснование методического подхода к геомеханическому обеспечению разработки рудных пластов в тектонически напряженных породах. Концепция методического подхода заключается в том, что в структуре взаимосвязи геомеханики и технологии подземных горных работ выделяются шесть основных этапов, отражающих жизненный цикл разработки рудного месторождения: разведка, доразведка и вскрытие, опытно-промышленные работы, эксплуатация, неполная подработка, полная подработка, консервация. Показано, что сложность геомеханического обоснования возрастает кратно в случае, когда месторождение представлено свитой рудных тел и располагается в тектонически напряженном массиве скальных пород. Выполнено обоснование и даны геомеханические рекомендации для условий совместной отработки двух рудных пластов в условиях действия тектонических сил, регламентирующие порядок и последовательность ведения горных работ.

Ключевые слова: геомеханика, подземная разработка, рудные пласты, тектонически напряженные породы.

GEOMECHANICAL ENSURING OF MINING DEVELOPMENT OF TECTONIC STRESSED ORE LAYERS

Anatoly Kalashnik

Leading Researcher of Geoflyuidomechanikal Laboratory, Ph.D., Mining institute KSC RAS, Apatity, Russia, e-mail: kalashnik@goi.kolasc.net.ru