

УДК 622.271.332:550.837.76(470.21)

**ГЕОРАДАРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОЛОГО-СТРУКТУРНОГО СТРОЕНИЯ РАБОЧЕГО УСТУПА КАРЬЕРА В ЦЕЛЯХ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ПРОВЕДЕНИЯ БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТ\***

**А. И. Калашник, А. Ю. Дьяков**  
Горный институт КНЦ РАН

**Аннотация**

Статья посвящена исследованию геолого-структурного строения законтурного массива пород участков глубоких рабочих уступов карьера «Железный» АО «Ковдорский ГОК». Приведены результаты георадарных исследований до проведения работ на уступе и после бурения взрывных скважин в комплексе с визуальным и телеметрическим их обследованием. Установлена взаимосвязь структурной нарушенности пород и их диэлектрической проницаемости. Предложены подходы по оперативной оценке структурной нарушенности пород взрывного блока рабочего уступа карьера георадарным зондированием.

**Ключевые слова:**

*карьер, уступ, БВР, георадарное зондирование, структурная нарушенность, оперативная оценка.*



Разработка глубоких горизонтов карьеров выдвигает особое требование к проведению буровзрывных работ (БВР) на рабочих уступах с учетом обеспечения оптимального дробления пород и устойчивости стенок уступов после проведения взрывных работ. Затраты на проведение БВР, качество отбойки и дезинтеграции горных пород, а также производительность карьерного оборудования напрямую зависят от того, в какой степени параметры БВР соответствуют геолого-структурному

строению уступа. Наличие в массиве горных пород различного рода структурных неоднородностей (зоны трещиноватости, обводнения, геологических включений, тектонических нарушений и т.п.) приводит к поглощению и рассеиванию энергии распространяющейся взрывной волны, в результате чего происходит неравномерное дробление горной массы. Дополнительные затраты на довзрывание негабаритов приводят к значительному удорожанию стоимости ведения горных работ. Поэтому важную роль приобретает знание геолого-структурного строения уступа в пределах взрывного блока, что существенно влияет на качество взрывной отбойки. За счет этого становится возможным подбор рациональных параметров буровых, взрывных и экскаваторных работ, оптимально учитывающих геолого-структурные особенности массива пород, которые должны обеспечивать максимально возможное равномерное дробление горной массы для последующих технологических этапов ее обработки.

Одним из оперативных методов изучения геолого-структурного строения массива горных пород является георадиолокационное подповерхностное зондирование, представляющее собой относительно малозатратное, оперативное и информативное средство измерений с высокой степенью разрешения, позволяющее получать результаты практически в режиме реального

---

\* Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ 15-05-05835.

времени [1–5]. Поэтому целью данной работы являлось изучение возможности применения георадиолокационного обследования законтурного массива пород взрывных блоков глубоких рабочих уступов карьера для оценки их геолого-структурного строения (прежде всего степени структурной нарушенности) до проведения и при подготовке буровзрывных работ.

В качестве объекта исследований был принят рудник «Железный» АО «Ковдорский ГОК». Георадарные исследования были проведены на участках глубоких рабочих уступов западного (горизонт -35 запад), юго-западного (горизонт -110 юго-запад) и северного (горизонт -110 север) бортов карьера общей протяженностью около 4 км (рис. 1). Георадиолокационные измерения выполнялись продольным и поперечным профилированием с использованием георадарного комплекса RAMAC по поверхности уступа до проведения работ и после бурения взрывных скважин в комплексе с телеметрическим обследованием (с помощью телевизионной камеры) стенок скважин, созданием стоп-кадров и протоколированием визуально определяемых трещин и зон повышенной трещиноватости пород. Горно-геологические условия исследуемых взрывных блоков согласно паспортам БВР: горизонт -110 юго-запад апатит-магнетитовая руда V категории трещиноватости; горизонт -110 север апатит-форстерит-магнетитовая руда, пироксениты V категории трещиноватости; горизонт -35 запад ийолиты IV категории трещиноватости. Обследуемые взрывные блоки являлись “сухими” – до 17–20 м глубины буровзрывных скважин вода отсутствовала.



Рис. 1. Обследуемый георадиолокацией участок взрывного блока рабочего уступа рудника «Железный» АО «Ковдорский ГОК»

Результаты георадарного исследования геолого-структурного строения уступа вначале обрабатывались с использованием специализированных для вида исследований компьютерных программ (ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ и RadExplorer), интерпретировались отдельно, а затем выполнялся комплексный анализ полученных данных в пространственно-глубинной взаимосвязи. Первичный анализ обработанных радарограмм показал, что волновые картины до и после бурения скважин отличаются незначительно ввиду использования низкочастотной антенны 100 МГц с установленной глубиной зондирования до 30 м. В случае использования высокочастотных антенн от 1000 МГц и выше, обладающих большей разрешающей способностью, было бы возможным выявление дополнительно раскрытых/образованных трещин в породах в непосредственной окрестности скважины.

Изложение основных принципов георадиолокации, которые подробно описаны в широко известных работах исследователей в области георадиолокации (М.И. Финкельштейн, А.В. Старовойтов, М.Л. Владов, D.J. Daniels, M.J. Harry и др.) [см., например, 6], не являлось целью данной статьи. Известно, что для определения скорости электромагнитной волны в среде используется формула:

$$V = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon}},$$

где  $c$  – скорость света,  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды [6].

Определить диэлектрическую проницаемость однородных/сплошных скальных пород можно на образцах в соответствии с ГОСТ 25495-82 «Породы горные. Метод определения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь».

В случае неоднородности среды (для массива скальных горных пород повышение их «несплошности»/нарушенности) картина значительно усложняется вследствие дифракции, преломления, отражения от границ/контуров, затухания электромагнитных волн. Кроме того, используемое промышленное георадарное оборудование (георадар RAMAC) имеет базу измерений около одного метра и, соответственно, однородные образцы скальных пород должны иметь размеры не менее 3 м (например, исходя из принципа Сен-Венана). Поэтому диэлектрическая проницаемость пород определялась в натуральных условиях тремя способами:

1. Определение диэлектрической проницаемости и глубины слоя по годографу дифрагированной волны (основанный на эффекте дифракции) – условно называется способом гипербола и применим, когда на георадарограмме отчетливо проявляются волновые эффекты в виде гипербола. Этот способ дает представления о скоростной характеристике разреза на основании следующей зависимости:

$$t(x) = \frac{2L}{V} = \frac{2\sqrt{x^2 + h^2}}{V},$$

где  $L$  – путь, пройденный волной;  $V$  – скорость;  $h$  – глубина залегания объекта;  $x$  – координата [6].

2. Определение диэлектрической проницаемости и глубины слоя по годографу отраженной волны (метод зондирования, или метод ОПВ (общего пункта возбуждения)) – способ оценки скоростей реализуется по данным многоканальных измерений или одноканальных радаров, работающих с изменяемым расстоянием между передающей и приемной антеннами (построение годографа задержки сигнала). Определение скоростей слоя этим методом осуществляется с учетом расстояния между приемной и передающей антеннами (базы антенны). По двум измерениям задержек сигнала и на расстояниях между приемником и передатчиком и по уравнению годографа однозначно определяются мощность слоя и его диэлектрическая проницаемость по следующим формулам (Руководство по эксплуатации георадаров, ООО «ВНИИСМИ»):

$$h_1 = \sqrt{\frac{t_2^2 d_1^2 - t_1^2 d_2^2}{4(t_1^2 - t_2^2)}},$$

$$\varepsilon_1 = \frac{t_1^2 c^2}{4h_1^2 + d_1^2}.$$

3. Определение глубины слоя и вычисление усредненного значения диэлектрической проницаемости по данным геологических скважин, так называемый «принцип калибровки». Принцип калибровки заключается в одновременном определении глубины геологических слоев двумя методами – по скважине и георадаром с последующим их сопоставлением. Затем с помощью компьютерной программы обработки георадарных данных, итерационно изменяя значение диэлектрической проницаемости, выявленную границу на радарограмме совмещают

с глубиной границы, определенной по геологической скважине. Если границ (слоев) по скважине несколько, данная процедура повторяется для следующего слоя, и таким образом строится скоростная модель исследуемого участка пород.

Для камеральной обработки данных георадиолокационных измерений использовалась программа ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ, реализующая обработку результатов анализа поля обратного рассеяния. На вход программы автоматизированной обработки подавалась числовая матрица амплитуд отраженных сигналов, полученная при георадиолокационном профилировании. В результате вычислений на выходе формируется матрица того же размера, но уже со значениями диэлектрической проницаемости для каждой точки двумерного пространства разреза. Технология (основанная на эффекте дифракции, как и в случае годографа дифрагирующей волны, но в автоматизированном программном режиме по всей площади разреза) позволяет производить построение разрезов как в случае наличия отражающих границ, так и в случае непрерывного изменения электрофизических свойств по профилю наблюдений и по глубине.

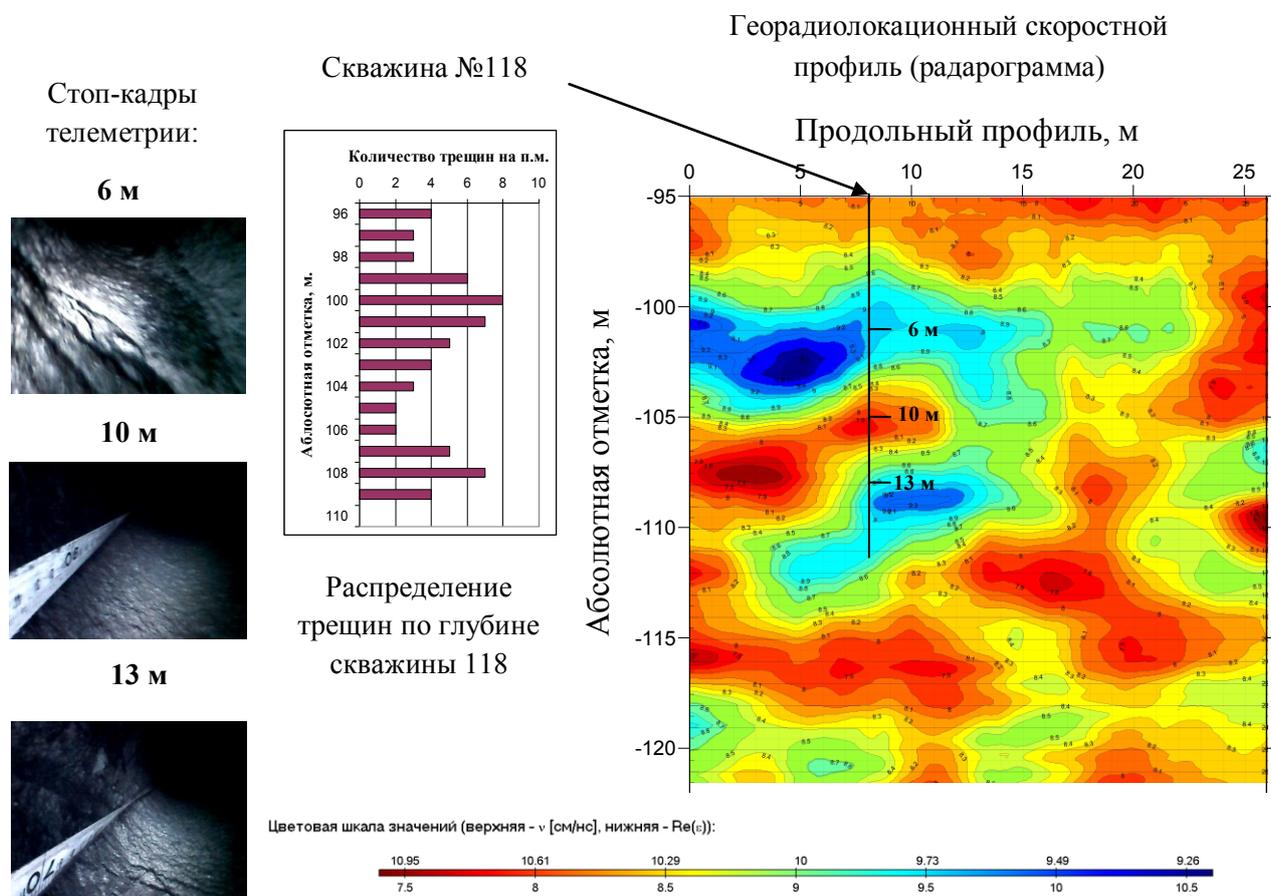


Рис. 2. Данные комплексных исследований взрывного блока рабочего уступа в пространственно-глубинной увязке

Геолого-структурная интерпретация заключалась в выявлении и локализации зон структурной нарушенности пород по данным георадиолокации с заверкой телеметрическим обследованием стенок скважин (с точки зрения наличия и ориентировочного числа трещин

на погонный метр). Телеметрическим обследованием фиксировались закрытые типы трещин – разрывы сплошности горных пород, хорошо заметные, но с плотно прижатыми стенками. Выявлялись прежде всего визуально видимые зоны трещиноватости – участки пород, в пределах которых трещины развиты более интенсивно, чем в окружающем массиве. Следует отметить, что довольно частым случаем было то, что для взрывного блока с категорией трещиноватости V по данным паспорта БВР наблюдались зоны нарушенности с категорией трещиноватости III или даже II, которые существенно повлияют на качество отбойки и дробления горной массы.

В частности, на рис. 2 приведены взаимосвязанные по глубине данные телеметрического обследования скважины № 118, распределение числа трещин (на 1 погонный метр (п.м.) стенки скважины как количественная характеристика интенсивности трещиноватости (нарушенности) пород) и радарограмма вертикального сечения, построенная в изолиниях диэлектрической проницаемости пород по данным георадиолокационного профилирования этого участка рабочего уступа протяженностью 25 м. Как видно из гистограммы в центральной части рис. 2, число трещин по глубине скважин изменяется от 2–4 на 1 п.м. (приповерхностная зона и породы на глубине около 10 м) до 5 и более на интервалах абсолютных отметок 98.5–102 м и 106.5–109 м (глубина скважины 3.5–7 м и 11.5–14 м от поверхности соответственно). На радарограмме (правая часть рис. 2) визуально для этих глубин выделяются зоны голубого и синего цветов, в пределах которых диэлектрическая проницаемость пород регистрируется в более высоких значениях: от 8.8 до 9.7. То есть большее количество трещин на п.м. в массиве пород коррелируется с повышенным значением диэлектрической проницаемости на радарограмме этого участка. Таким образом, можно предположить, что определяемые георадиолокационными измерениями значения диэлектрической проницаемости пород свыше 8.8 будут соответствовать породам повышенной трещиноватости (нарушенности).

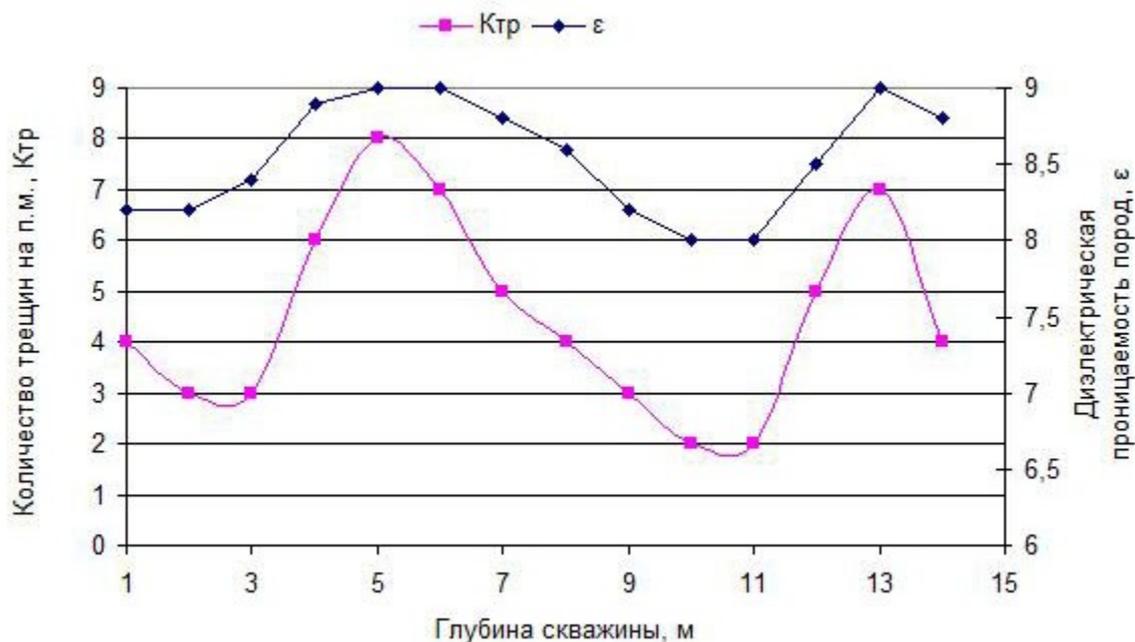


Рис. 3. Графики изменения интенсивности трещиноватости ( $K_{тр}$ ) и диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  пород по глубине скважин

Для этого были статистически обработаны данные регистрации числа трещин на п.м. (интенсивности трещиноватости  $K_{тр}$ ) и георадиолокационных измерений диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  по шести буровым скважинам одного участка уступа и построены графики

изменения средних их значений по глубине (рис. 3). На рисунке видна четкая корреляция как в характерах изменения графиков, так и в количественных значениях.

Установленная взаимосвязь интенсивности трещиноватости (нарушенности) пород и их диэлектрической проницаемости была положена в основу интерпретации данных георадиолокационного зондирования всех остальных участков исследуемых взрывных блоков рабочих уступов карьера. Результаты проведенных исследований были переданы в технический отдел комбината, и специалистами служб главного инженера карьера и буровзрывного участка были внесены корректировки в паспорта взрывных блоков в части расположения взрывных скважин и параметров БВР.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Исследования георадарами структуры и текущего состояния горных пород, слагающих уступы основного карьера Ковдорского ГОКа / *А.И. Калашник и др.* // Горный журнал. 2014. №4. С. 60–64.
2. Подповерхностное георадарное зондирование горно-геологических сред Кольского полуострова / *А.И. Калашник и др.* // Вестник МГТУ. Тр. Мурман. гос. тех. университета. 2009. Т. 12, № 4. С. 576–583.
3. Исследования горнотехнических конструкций карьера георадарными технологиями / *А.И. Калашник и др.* // Вестник КНЦ РАН. 2012. № 2. С. 58–64.
4. Выявление дислокаций в скальных горнотехнических конструкциях / *А.И. Калашник и др.* // Вестник МГТУ. 2013. Т. 16, № 1. С. 93–97.
5. *Мельников Н.Н., Калашник А.И.* Инновационные георадарные технологии изучения подповерхностной структуры и состояния природно-технических систем // Вестник КНЦ РАН. 2010. № 3. С. 4–8.
6. *Владов М.Л., Старовойтов А.В.* Введение в георадиолокацию. М.: МГУ, 2005. 153 с.

#### Сведения об авторах

*Калашник Анатолий Ильич* – к.т.н., зав. лабораторией Горного института КНЦ РАН;

e-mail: [kalashnik@goi.kolasc.net.ru](mailto:kalashnik@goi.kolasc.net.ru)

*Дьяков Андрей Юрьевич* – научный сотрудник Горного института КНЦ РАН;

e-mail: [dyakov@goi.kolasc.net.ru](mailto:dyakov@goi.kolasc.net.ru)