

А. И. Калашник, А. Ю. Дьяков

## Оценка нарушенности скальных пород георадарным зондированием с использованием водонасыщения для контрастности

Важнейшим элементом в вопросах эффективности и безопасности разработки месторождений полезных ископаемых является учет основных структурных особенностей массива скальных пород. В работе рассматриваются методические вопросы применения георадарного зондирования для исследования внутренней структуры скальных пород. Георадарные исследования проводились на рабочем уступе карьера "Железный" Ковдорского ГОКа. Вначале зондирование было выполнено продольным профилированием массива пород в естественном их состоянии на глубину до 20 м в комплексе с телеметрическим обследованием трещиноватости пород в скважине, которая располагалась на профиле. Затем скважина была полностью залита водой, и георадарные исследования повторялись через 15, 30 и 60 мин одновременно с регистрацией понижения уровня воды в скважине. Полученные результаты георадарных исследований проанализированы с целью выявления влияния водонасыщения скальных пород на регистрируемые электромагнитные характеристики, а также определения взаимосвязи структурной нарушенности пород и их диэлектрической проницаемости до и после водонасыщения. Установлено, что водонасыщение скальных пород – индикатор, который позволяет более контрастно выявлять зоны нарушенности пород ввиду относительно незначительной разности диэлектрической проницаемости в ненарушенном и нарушенном массиве сухих пород. Выполненная георадарным зондированием оценка нарушенности скальных пород уступа карьера с использованием водоналива в скважину для контрастности измерений показала, что насыщенные водой, пористые, проницаемые, трещиноватые породы имеют более высокие значения диэлектрической проницаемости, чем сухие/монокристаллические, слаботрещиноватые породы, у которых наблюдались более низкие значения диэлектрической проницаемости. Установлено, что вследствие водонасыщения пород изменения значений диэлектрической проницаемости увеличились в два раза и составили 0,6 ед., в то время как до насыщения эти изменения составляли только 0,3 ед., т. е. были в два раза ниже. В целях обоснования оценки нарушенности скальных пород георадарным зондированием выполнен сопоставительный анализ георадарных данных и вычисленной на основе коэффициента фильтрации пустотности пород в окрестности скважины. Проведенный анализ показал, что с увеличением пустот в породе, и соответственно водонасыщенности, их диэлектрическая проницаемость увеличивается.

**Ключевые слова:** скальные породы, нарушенность, георадарное зондирование, радарограмма, водонасыщение

*Информация о статье:* поступила в редакцию 26.12.2018; получена после доработки 12.03.2019

### Введение

При открытой разработке рудных месторождений полезных ископаемых очень важно обеспечить устойчивость бортов и уступов карьера, не допуская критических деформаций в течение всего периода строительства и эксплуатации карьера. Информация о состоянии пород приконтурного скального массива приобретает большое значение для локализации потенциально опасных участков, в пределах которых возможны потери устойчивости уступов различного характера. В свою очередь установлено, что на механическую устойчивость скального массива, помимо геолого-структурного строения, технологии разработки месторождений, темпа ведения горных работ, также существенно влияют гидрогеологические условия [1–3]. В зависимости от водонасыщения трещин и пор пород, слагающих обрабатываемое месторождение, устойчивость пород на обнажениях может быть различной.

В работах [4; 5] показано, что одним из методов изучения механического состояния и геолого-структурного строения массива горных пород может являться георадарное подповерхностное зондирование. Неоднократно было выявлено, что повышенная обводненность пород отражается в изменении регистрируемых волновых параметров, что свидетельствует об изменении физических свойств горных пород вследствие водонасыщения. Накопленный опыт дает основания утверждать, что георадарные измерения позволяют выполнять оперативный мониторинг степени водонасыщения пород посредством исследования изменения их физических свойств. Это особенно важно в период весеннего снеготаяния или обильных дождей, когда степень обводненности на некоторых участках существенно повышается [6–8]. С другой стороны, выявленная георадарным зондированием изменчивость физических свойств пород в условиях явной их обводненности предоставляет возможность для количественной оценки внутренней несплошности (трещиноватости, пористости, каверности) массива пород. Настоящее исследование направлено на выявление качественных и количественных зависимостей регистрируемых волновых характеристик от степени нарушенности исследуемых пород посредством их контрастного водонасыщения.

### Материалы и методы

В качестве объекта исследований выбран рабочий уступ горизонта –35 западного борта карьера "Железный" АО "Ковдорский ГОК". По геологическому строению исследуемый участок сложен преимущественно ийолитами.

В целях определения строения и выявления структурной нарушенности участка уступа выполнено его комплексное обследование: визуальный осмотр; телеметрическое обследование нескольких буровых скважин (глубиной 18 м, диаметром 0,165 м), находящихся на расстоянии 5 м друг от друга; георадарное продольное зондирование вдоль скважин. Данные телеметрического обследования скважин и георадарного зондирования были подвергнуты комплексному анализу в пространственно-глубинной их увязке. На рис. 1 представлены взаимоувязанные по глубине данные визуального обследования и стоп-кадры телеметрии по скважине с условным номером № 1 (а), распределения количества трещин в скважине на 1 погонный метр (количественная характеристика интенсивности трещиноватости пород) (б) и фрагмент радарограммы георадарного зондирования, в изолиниях диэлектрической проницаемости пород у скважины (в).

Анализ гистограммы (рис. 1, б) показал, что количество трещин по глубине скважины изменяется от 2–4 трещин на метр в приповерхностной зоне (2–7 м) до 4–11 на интервале 8–11 м. Визуально на радарограмме георадарного зондирования (рис. 1, в) для глубин 8–11 м выделяется зона зеленого цвета, в пределах которой значения диэлектрической проницаемости пород равны и выше 8,6 ед.

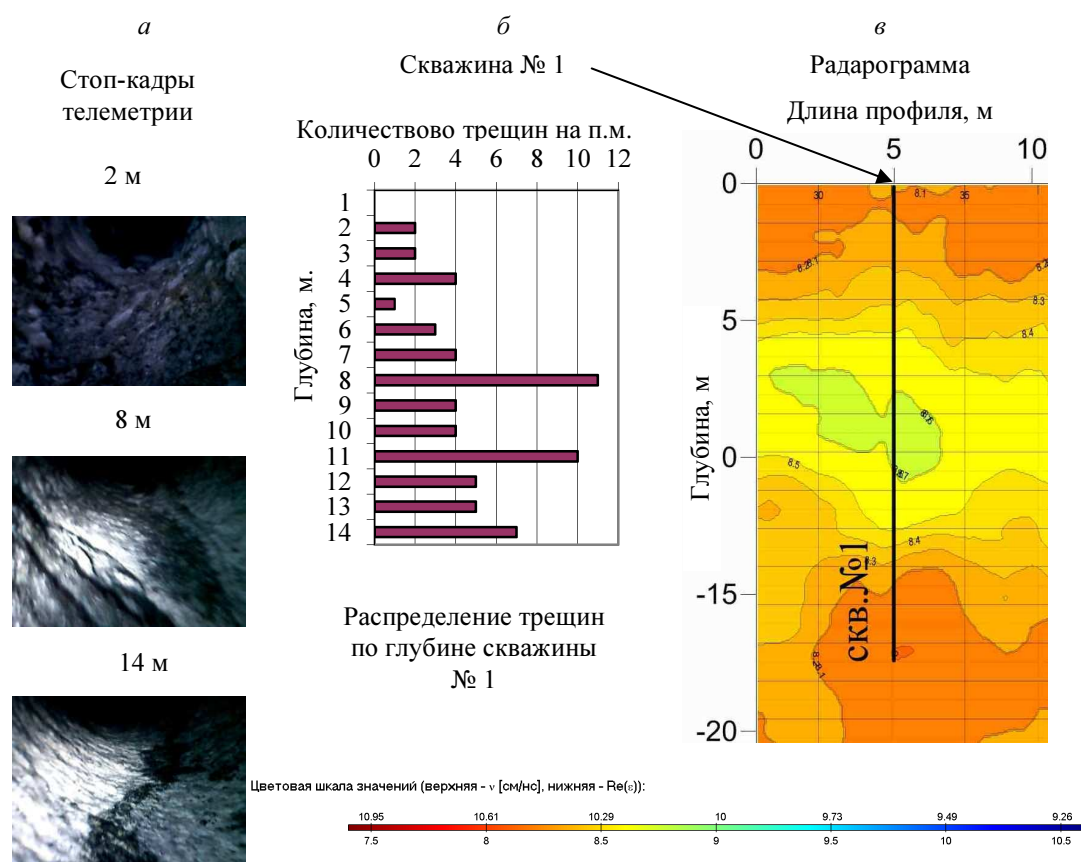


Рис. 1. Данные комплексных исследований пород участка уступа у скважины № 1 в пространственно-глубинной их увязке  
Fig. 1. Data of complex studies of the rocks of the ledge section at No. 1 well in their spatial-depth linking

Таким образом, можно предположить, что определяемые георадарным зондированием значения диэлектрической проницаемости пород от 8,6 ед. и выше будут соответствовать породам повышенной трещиноватости. Вместе с тем полученные значения диэлектрической проницаемости пород по скважине несмотря на относительно большое количество трещин на глубине 8–11 м изменились незначительно: от 8,3 ед. в приповерхностной зоне до 8,6 ед. на глубине 8–11 м (принимаемая зона более нарушенных пород). Поэтому в целях получения более контрастных результирующих данных георадарного зондирования был выполнен налив воды в скважину № 1 и проведены режимные георадарные профилирования участка уступа по одному и тому же маршруту. Постепенное понижение уровня воды в скважине фиксировалось замерами во времени, совпадающими с временем режимного георадарного профилирования.

Анализ динамики уровня воды в скважине № 1 (рис. 2) позволил выявить два временных участка фильтрации: первый, весьма кратковременный участок графика  $0 \leq t \leq 15$  мин, на котором происходит быстрое понижение уровня воды (вследствие ее фильтрации в породы нарушенной приповерхностной части околоскважинного пространства), аппроксимировать который можно следующим выражением:

$$h = -0,13t, \quad (1)$$

где величина достоверности аппроксимации  $R^2 = 1$ , и второй, более плавный, в интервале  $15 \leq t \leq 60$  мин, по-видимому, вследствие установившегося режима фильтрации воды в породы, который можно аппроксимировать  $R^2 = 0,99$  следующим, практически линейным, выражением:

$$h = -0,02t - 1,8, \quad (2)$$

где  $h$  – уровень воды в скважине от поверхности,  $t$  – время после выполнения экспресс-налива.

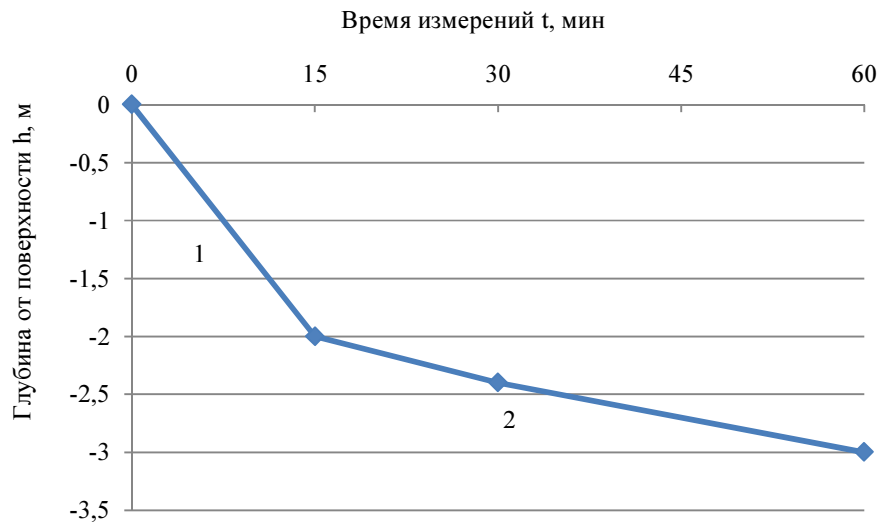


Рис. 2. Динамика уровня воды в скважине № 1 после экспресс-налива  
 Fig. 2. Dynamics of the water level in No. 1 well after the express filling

### Результаты и обсуждение

Режимные георадарные зондирования участка пород в окрестности скважины № 1 были выполнены до налива и через 15, 30 и 60 мин после налива воды в скважину. Полученные радарограммы обработаны в программе Георадар-Эксперт, рассчитаны значения диэлектрической проницаемости пород (рис. 3).

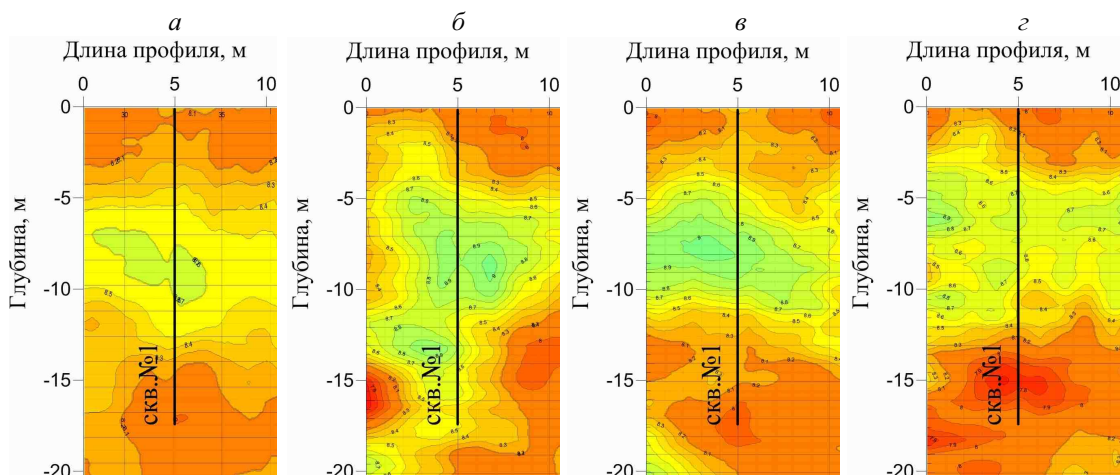


Рис. 3. Распределение значений диэлектрической проницаемости в массиве горных пород до и после проведения экспресс-налива (а – 0; б – 15; в – 30; г – 60 мин)

Fig. 3. Distribution of dielectric permittivity values in the rock massif after express filling (а – 0; б – 15; в – 30; г – 60 minutes)

Анализ данных георадарного зондирования, представленных на рис. 3, показал, что после проведения налива водонасыщенность пород в окрестности скважины повысилась, что привело к регистрации повышенных

значений диэлектрической проницаемости. Как видно из рис. 3, через 15 мин после проведения налива в скважину регистрируемые значения диэлектрической проницаемости, начиная с глубины 5 м, возросли и далее составляли от 8,6 ед. до 8,9 ед. на всем оставшемся интервале глубины скважины № 1. Спустя 30 мин произошло резкое уменьшение регистрируемых значений диэлектрической проницаемости до значений 8,2–8,6 ед. на интервале глубин 10–18 м, вместе с тем как в интервале 6–8 м значения диэлектрической проницаемости остались практически без изменений. Измерениями, выполненными через час (60 мин), было определено, что уровень регистрируемой диэлектрической проницаемости приблизился к значениям 7,8–8,6 ед., полученным до проведения налива в скважину. Изменения значений диэлектрической проницаемости до 0,4 ед. в сторону уменьшения на глубине 12–16 м могут свидетельствовать о вымывании водой заполнителя трещин, замещения минеральных частиц пород или уплотнения при некотором смыкании трещин [9; 10]. По данным телеметрического обследования (рис. 1, б) этот участок характеризуется относительно большим количеством трещин: 7–8 на погонный метр.

Выполненная георадарным зондированием оценка нарушенности скальных пород уступа карьера с использованием водоналива в скважину для контрастности измерений показала, что сухие/монокристаллические, слаботрещиноватые породы будут иметь более низкие значения диэлектрической проницаемости, а насыщенные водой, пористые, проницаемые, трещиноватые породы – более высокие значения диэлектрической проницаемости.

Для оценки фильтрационной способности пород в окрестности скважины № 1, имеющей диаметр 0,165 м и глубину 18,3 м, по данным налива вычислен коэффициент фильтрации, среднее значение которого составило 0,011 м/сут.

Коэффициент фильтрации определялся по методике Шестакова В. М. [11]:

$$k = 2,3 \cdot (\omega / l_0) \cdot \lg(H_0 / H), \quad (3)$$

где  $\omega$  – площадь горизонтального сечения скважины,  $l_0$  – расчетный размер водопримной части скважины, который для скважины с фильтром длиной  $l$  и радиусом  $r$  равен:

$$l_0 = 2,73l / \lg(0,7l / r). \quad (4)$$

Анализ диаграммы прослеживания коэффициента фильтрации (рис. 4) позволил сопоставить изменение коэффициента фильтрации со значениями диэлектрической проницаемости во временных интервалах 15, 30 и 60 мин. Значения диэлектрической проницаемости на радарограмме (рис. 3) в интервале глубин 5–18 м максимально увеличились через 15 мин после налива воды в скважину на 0,6 ед. в интервале 8,6–8,9 ед., в свою очередь средний коэффициент фильтрации здесь максимален и составляет  $k = 0,024$  м/сут. Далее коэффициент фильтрации равномерно уменьшается на протяжении всего цикла измерений. Через 30 мин значения диэлектрической проницаемости на глубине 5–18 м (рис. 3) уменьшились и лежат в интервале 8,4–8,7 ед., также и среднее значение коэффициента фильтрации уменьшилось и составило  $k = 0,015$  м/сут. Через 60 мин после налива значения диэлектрической проницаемости приблизились к значениям, полученным до проведения налива в скважину, коэффициент фильтрации  $k = 0,0011$  м/сут. Таким образом, выполненный анализ показал, что согласно классификации горных пород [12] по степени водопроницаемости породы относятся к IV категории: слабопроницаемые или полупроницаемые с коэффициентом фильтрации  $k < 0,1$  м/сут.

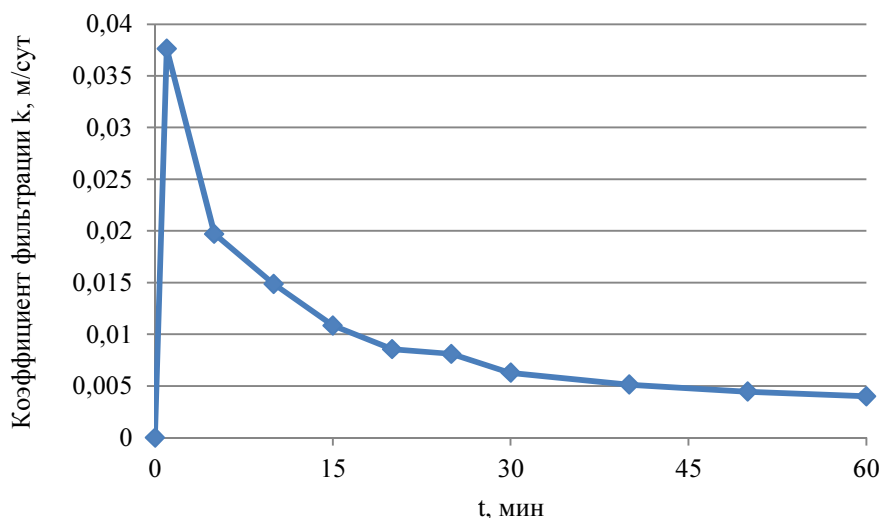


Рис. 4. Диаграмма временного прослеживания коэффициента фильтрации  
Fig. 4. Temporary tracking of the filtration coefficient

Для определения пустотности ( $\Pi$ ) рассмотрим массив скальных пород в форме цилиндра диаметром 10 м, глубиной 18,3 м и скважиной № 1 в центре, в которую осуществлялся налив. Объем  $V$  породы цилиндра с водой в скважине № 1 составил  $1436,55 \text{ м}^3$ , через 15 мин после налива уровень воды уменьшился на два метра, таким образом, объем воды, заполнивший трещины и поры вмещающих скальных пород, составил  $0,043 \text{ м}^3$ . Отношение объема воды во времени к общему объему исследуемого участка отражает состояние пустотности массива пород в определенный момент времени по глубине. На рис 5, а представлено изменение пустотности через 15, 30 и 60 мин.

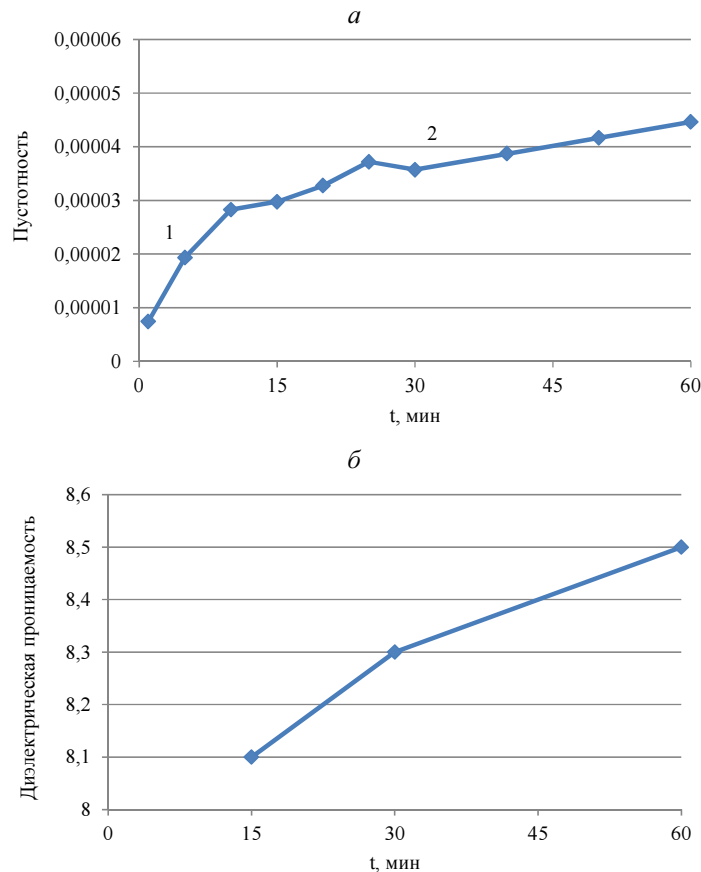


Рис. 5. Диаграмма временного прослеживания пустотности (а) и значений диэлектрической проницаемости в массиве пород (б)

Fig. 5. Diagram of time tracking of voidness (a) and dielectric constant values in the rock mass (b)

Анализ диаграммы временного прослеживания пустотности в скважине № 1 (рис. 5, а) позволил выявить два временных участка: первый, весьма кратковременный участок графика  $0 \leq t \leq 15$  мин, на котором происходит значительное увеличение значений пустотности от  $1 \cdot 10^{-5}$  до  $3 \cdot 10^{-5}$  ед., аппроксимировать  $R^2 = 0,88$  который можно следующим выражением:

$$\Pi = 2 \cdot 10^{-6}t + 9 \cdot 10^{-6}, \quad (5)$$

и второй, более плавный, в интервале  $15 \leq t \leq 60$  мин, по-видимому, вследствие установившегося режима фильтрации воды в породы (рис. 2), который можно аппроксимировать  $R^2 = 0,97$  следующим, практически линейным, выражением:

$$\Pi = 3 \cdot 10^{-7}t + 3 \cdot 10^{-5}, \quad (6)$$

где  $\Pi$  – пустотность,  $t$  – время после выполнения экспресс-налива.

В свою очередь, значения диэлектрической проницаемости после проведения налива в скальную породу показали тенденцию к увеличению на протяжении всего времени наблюдений (рис. 5, б) и описываются выражением:

$$\varepsilon = 0,0086t + 8. \quad (7)$$

Таким образом, вода, налитая в скважину в скальных породах, перемещаясь по трещинам и порам, позволила определить пустотность и контрастное изменение диэлектрической проницаемости скальных пород под действием водонасыщения.

По рассчитанным значениям диэлектрической проницаемости пород (рис. 3) построены графики их изменчивости по оси скважины (рис. 6).

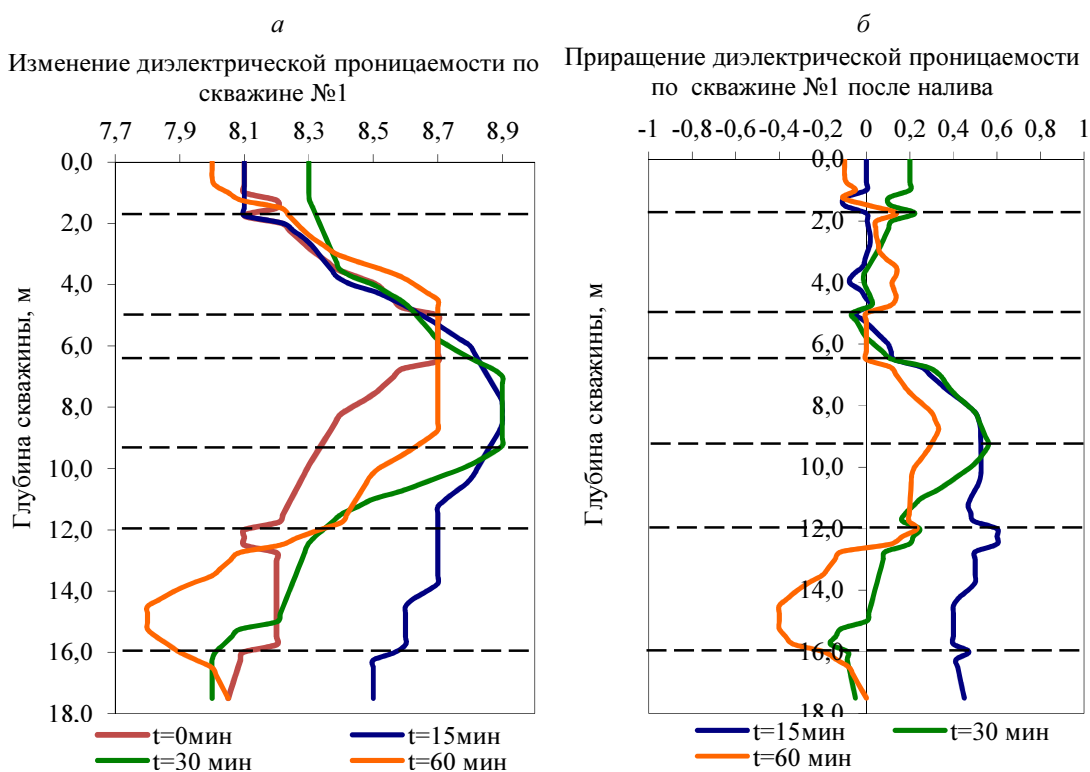


Рис. 6. Зависимости значений диэлектрической проницаемости пород у скважины (а) и их приращений (б)  
Fig. 6. Dependencies of dielectric permittivity of rocks at the well (a) and their increments (b)

Как видно из рис. 6, а, после проведения налива скважины № 1 образовалось несколько зон, разделенных пунктирными линиями, которые в определенной степени характеризуют этот участок массива пород. На интервале глубин 0–1,8 м, выделяемых как приповерхностная зона, особых изменений в значениях диэлектрической проницаемости для  $t = 0$  и после проведения налива  $t > 0$  не происходит. На следующем интервале 1,8–5 м идет постепенное увеличение значений диэлектрической проницаемости для всех временных интервалов, что может быть связано с изменением свойств породы по глубине. Интервал 5–6,2 м соответствует максимальным значениям диэлектрической проницаемости до проведения налива в скважину № 1, что соответствует трещиноватому массиву. На глубине 6,2–12 м максимальные изменения значений диэлектрической проницаемости (до 0,6 ед.) произошли после налива воды через 15 мин. По мере понижения уровня воды в скважине и ее распространения в околоскважинном пространстве картина изменения диэлектрической проницаемости меняется. Через 30 мин в интервале глубин 12–16 м произошло небольшое падение значений диэлектрической проницаемости до 0,2 ед., с сохранением высоких значений до 0,6 ед. на глубине 9,5 м. На интервале 16–18 м значения диэлектрической проницаемости изменились незначительно. В слабопроницаемых породах вода по трещинам и порам, вымыв возможный заполнитель, распространилась практически везде, в интервале глубин 2–12 м повсеместно значения диэлектрической проницаемости увеличились, тем самым позволив более детально определить степень нарушенности пород.

На рис. 6, б представлено изменение (отклонение) зарегистрированной диэлектрической проницаемости после налива воды в скважину, где за исходное состояние массива взято значение диэлектрической проницаемости при  $t = 0$ , т. е. до налива воды в скважину. Изменение значений диэлектрической проницаемости на 0,5 ед. в интервале глубин 8–10 м коррелирует с исходным водонасыщением массива скальных пород по трещинам, что подтверждается данными телеметрического обследования скважины № 1 до проведения налива (рис. 1, б), где на 8 и 11 метре скважины отмечается большое количество увлажненных трещин на погонный метр (10–11 шт).

### Заключение

Проведенные исследования позволили выявить влияние воды на результаты георадарного зондирования, а также определить категорию пород по степени водопроницаемости. Установлено, что вода является индикатором, который позволяет более контрастно выявлять зоны нарушенности пород, ввиду относительно незначительной разности диэлектрической проницаемости в естественном ненарушенном и нарушенном



массиве. Определена взаимосвязь структурной нарушенности пород и их диэлектрической проницаемости под действием водонасыщения пород. Проведенный анализ позволил выявить количественное влияние воды как фактора определения неоднородности. Целенаправленный налив в скважину показал резкое изменение контрастности диэлектрических свойств в массиве пород. Полученные выводы и значения диэлектрической проницаемости позволяют создать основу для определения сезонного воздействия природных факторов на состояние массива скальных пород, а также выявлять тенденции его изменения, имеющие немаловажное значение в арктических климатических условиях.

#### Благодарности

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ, проект № 18-05-00563а.

#### Библиографический список

1. Гидрогеологические исследования в горном деле / под ред. В. А. Мироненко. М. : Недра, 1976. 352 с.
2. Мюллер Л. Инженерная геология. Механика скальных массивов. Инженерная механика. Геология скальных массивов : [пер. с нем.]. М. : Мир, 1971. 255 с. (Науки о Земле. Фундаментальные труды зарубежных ученых по геологии, геофизике и геохимии; Т. 38).
3. Жукова С. А., Самсонов А. В. Оценка влияния природных факторов на проявление сейсмичности Хибинского массива // Горный журнал. 2014. № 10. С. 47–51.
4. Калашник А. И., Запорожец Д. В., Дьяков А. Ю., Казачков С. В., Сохарев В. А. Исследования георадарами структуры и текущего состояния горных пород, слагающих уступы основного карьера Ковдорского ГОКа // Горный журнал. 2014. № 4. С. 60–64.
5. Калашник А. И., Дьяков А. Ю. Георадарное исследование геолого-структурного строения рабочего уступа карьера // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2015. № 6. С. 73–78.
6. Мельников Н. Н., Калашник А. И., Калашник Н. А., Запорожец Д. В. Комплексная многоуровневая система геомониторинга природно-технических объектов горнодобывающих комплексов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2018. № 4. С. 3–10.
7. Мельников Н. Н., Калашник А. И., Калашник Н. А., Запорожец Д. В. Применение современных методов для комплексных исследований состояния гидротехнических сооружений региона Баренцева моря // Вестник МГТУ. 2017. Т. 20, № 1/1. С. 13–20. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2017-20-1/1-13-20>.
8. Xiao X., Guan B., Ihamouten A., Villain G., Dérobert X., Tian G. Monitoring water transfers in limestone building materials with water retention curve and Ground Penetrating Radar: A comparative study // NDT & E International. 2018. V. 100. P. 31–39. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2018.08.00210>.
9. Боярский Д. А., Тихонов В. В. Влияние связанной воды на диэлектрическую проницаемость влажных и мерзлых почв. М. : Препринт ИКИ РАН, 2003. 48 с.
10. Шуваев А. Н., Гензе Д. А. Диэлектрическая проницаемость грунтов нарушенной структуры // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2011. № 1. С. 200–206.
11. Опытнo-фильтрaционные работы / под ред. В. М. Шестакова, Д. Н. Башкатова. М. : Недра, 1974. 203 с.
12. Керкис Е. Е. Методы изучения фильтрационных свойств горных пород. Л. : Недра : Ленингр. отд-ние, 1975. 231 с.

#### References

1. Hidrogeologicheskiye issledovaniya v gornom dele [Hydrogeological studies in mining] / pod red. V. A. Mironenko. M. : Nedra, 1976. 352 p.
2. Myuller L. Inzhenernaya geologiya. Mekhanika skal'nykh massivov. Inzhenernaya mekhanika. Geologiya skal'nykh massivov [Engineering geology. Mechanics of rock massifs. Engineering mechanics. Geology of rock massifs] : [per. s nem.]. M. : Mir, 1971. 255 p. (Nauki o Zemle. Fundamental'nyye trudy zarubezhnykh uchenykh po geologii, geofizike i geokhimii; V. 38).
3. Zhukova S. A., Samsonov A. V. Otsenka vliyaniya prirodnykh faktorov na proyavleniye seysmichnosti Khibinskogo massiva [Assessment of the influence of natural factors on the seismicity of the Khibiny massif] // Gornyy zhurnal. 2014. N 10. P. 47–51.
4. Kalashnik A. I., Zaporozhets D. V., D'yakov A. Yu., Kazachkov S. V., Sokharev V. A. Issledovaniya georadarami struktury i tekushchego sostoyaniya gornykh porod, slagayushchikh ustupy osnovnogo kar'yera Kovdorskogo GOKa [Geo-radar studies of the structure and current state of rocks that form the main career of the Kovdorsky GOK] // Gornyy zhurnal. 2014. N 4. P. 60–64.
5. Kalashnik A. I., D'yakov A. Yu. Georadarnoye issledovaniye geologo-struktornogo stroyeniya rabocheho ustupa kar'yera [Georadar study of the geologic-structural structure of the working ledge of a quarry] // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal. 2015. N 6. P. 73–78.

6. Mel'nikov N. N., Kalashnik A. I., Kalashnik N. A., Zaporozhets D. V. Kompleksnaya mnogourovnevaya sistema geomonitoringa prirodno-tekhnicheskikh ob'yektov gornodobyvayushchikh kompleksov [Complex multi-level system of geomonitoring of natural-technical objects of mining complexes] // Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh. 2018. N 4. P. 3–10.

7. Mel'nikov N. N., Kalashnik A. I., Kalashnik N. A., Zaporozhets D. V. Primeneniye sovremennykh metodov dlya kompleksnykh issledovaniy sostoyaniya gidrotekhnicheskikh sooruzheniy regiona Barentseva morya [Application of modern methods for complex studies of the state of hydraulic structures of the Barents Sea region] // Vestnik MGTU. 2017. V. 20, N 1/1. P. 13–20. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2017-20-1/1-13-20>.

8. Xiao X., Guan B., Ihamouten A., Villain G., Dérobert X., Tian G. Monitoring water transfers in limestone building materials with water retention curve and Ground Penetrating Radar: A comparative study // NDT & E International. 2018. V. 100. P. 31–39. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2018.08.00210>.

9. Boyarskiy D. A., Tikhonov V. V. Vliyaniye svyazannoy vody na dielektricheskuyu pronitsayemost' vlazhnykh i merzlykh pochv [Effect of bound water on the dielectric constant of wet and frozen soils]. M. : Preprint IKI RAN, 2003. 48 p.

10. Shuvayev A. N., Genze D. A. Dielektricheskaya pronitsayemost' gruntov narushennoy struktury [Dielectric permeability of soils of disturbed structure] // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. 2011. N 1. P. 200–206.

11. Opytno-fil'tratsionnyye raboty [Experimental filtration works] / pod red. V. M. Shestakova, D. N. Bashkatova. M. : Nedra, 1974. 203 p.

12. Kerkis Ye. Ye. Metody izucheniya fil'tratsionnykh svoystv gornykh porod [Methods for studying the filtration properties of rocks]. L. : Nedra : Leningr. otd-niye, 1975. 231 p.

#### Сведения об авторах

**Калашник Анатолий Ильич** – ул. Ферсмана, 24, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Горный институт КНЦ РАН, канд. техн. наук; e-mail: [kalashnik@goi.kolasc.net.ru](mailto:kalashnik@goi.kolasc.net.ru)

**Kalashnik A. I.** – 24, Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Mining Institute KSC RAS, Cand. of Tech. Sci.; e-mail: [kalashnik@goi.kolasc.net.ru](mailto:kalashnik@goi.kolasc.net.ru)

**Дьяков Андрей Юрьевич** – ул. Ферсмана, 24, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Горный институт КНЦ РАН, науч. сотрудник; e-mail: [dyakov@goi.kolasc.net.ru](mailto:dyakov@goi.kolasc.net.ru)

**Dyakov A. Yu.** – 24, Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Mining Institute KSC RAS, Researcher; e-mail: [dyakov@goi.kolasc.net.ru](mailto:dyakov@goi.kolasc.net.ru)



A. I. Kalashnik, A. Yu. Dyakov

## **Evaluation of rock disturbance by GPR sensing using water saturation for contrast**

The most important element concerning efficiency and safety of developing mineral deposits is the consideration of the main structural features of the rock massif. The paper considers methodological issues of the GPR sensing application to study the internal structure of rocks. GPR surveys have been performed on a working bench of the Zhelezny mine, Kovdorsky GOK. Initially, the sensing has been performed by longitudinal profiling of the rock mass in its natural state to the depth of 20 m in combination with a telemetric survey of rock fracturing in the borehole located on the profile. Then the borehole was completely flooded with water, and GPR sensing studies have being repeated after 15, 30 and 60 minutes simultaneously with the registration of a decrease in the water level in the borehole. The GPR study results have been analysed in order to identify the effect of rocks' water-saturation on the recorded electromagnetic characteristics, and to determine the relationship of structural disturbance of rocks and their dielectric constant before and after water-saturation. It has been revealed that rock water saturation is an indicator that allows for more contrasting detection of rock disturbance zones due to the relatively insignificant difference in dielectric constant in the undisturbed and disturbed dry rock massif. The rock disturbance in an open pit slope has been estimated by GPR sensing, using water-filled borehole for contrast of measurements. The assessment has shown that water-saturated, porous, permeable, fractured rocks have higher dielectric constant values than dry/ monolithic, weakly fractured rocks that have lower dielectric values permeability. It has been established that due to the water-saturation of rocks changes in the values of dielectric constant increased twice, and amounted to 0.6 units, while before saturation these changes were only 0.3 units, i. e. were two times lower. In order to substantiate the assessment of rock disturbance by GPR sensing, a comparative analysis has been made of GPR data and void of rocks in the vicinity of the borehole calculated on the basis of the filtration coefficient. The analysis has shown that the dielectric constant increases with increasing voids in the rock and, accordingly, with increasing water-saturation.

**Key words:** rocks, disturbance, GPR sensing, radarogram, water saturation

*Article info:* received 26.12.2018; received in revised 12.03.2019