

Интерпретация результатов георадарного зондирования скального массива пород с использованием цифрового образа

А.И. Калашник, А.Ю. Дьяков ✉

Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация

✉ a.dyakov@ksc.ru

Резюме: Рассмотрен методический подход к интерпретации результатов георадарного зондирования скального массива пород с использованием цифрового образа. Выполненными исследованиями установлено, что при георадарном зондировании массивов скальных пород наблюдается искажение наведенного электромагнитного поля на участках с различающимися физическими свойствами пород (такими, как неоднородности массива, трещиноватость пород, зоны повышенного водонасыщения). Создание с использованием компьютерного моделирования цифрового образа электромагнитного поля, вызванного георадарным зондированием, позволило значительно уменьшить неопределенность при интерпретации полученных натурных данных путем понимания механизма формирования особенностей волновых характеристик и сравнения синтетических данных с натурными. Выявлены закономерности формирования волновых картин георадарных модельных данных (изменение осей синфазности и амплитудных характеристик сигнала) массива скальных пород, содержащего структурные неоднородности. При георадарном зондировании такого массива пород на волновых картинах появляются отражения от краевых частей неоднородностей в виде ветвей гипербол. Интенсивность искажения волнового поля определяется контрастностью физических свойств пород, а также пространственной ориентацией и глубиной расположения неоднородностей, что является ключевым параметром георадарного зондирования. Установлено, что изменчивость физических свойств пород скального массива вблизи нарушений вносит значительные искажения в параметры, определяемые георадарным зондированием, включая угол падения нарушений. Рассмотренный методический подход предоставляет основу для создания цифрового образа георадарного зондирования массива скальных пород.

Ключевые слова: георадарное зондирование, скальные породы, волновое поле, компьютерное моделирование, цифровой образ

Для цитирования: Калашник А.И., Дьяков А.Ю. Интерпретация результатов георадарного зондирования скального массива пород с использованием цифрового образа. *Горная промышленность*. 2023;(5S):119–124. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5S-119-124>

Interpretation of the results of georadar sounding of a rock mass using a digital image

A.I. Kalashnik, A.Y. Dyakov ✉

Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Science; Apatity, Russian Federation

✉ a.dyakov@ksc.ru

Abstract: A methodological approach to interpreting the results of georadar sounding of a rock mass using a digital image is considered. The studies carried out have established that during the georadar probing of the rock masses, distortion of the induced electromagnetic field is observed in areas with different physical properties of the rocks (such as the rock mass heterogeneity, rock fracturing, zones of increased water saturation). The creation of a digital image of the electromagnetic field caused by ground penetrating radar sounding using computer modeling made it possible to significantly reduce the uncertainty in interpretation of the obtained field data through understanding the mechanism of formation of the wave characteristics and comparing synthetic data with the in-situ data. Regularities in formation of the wave patterns of the ground penetrating radar model data (changes in the in-phase axes and amplitude characteristics of the signal) of a rock mass containing structural heterogeneities have been identified. When sounding such a rock mass with the georadar, reflections from the edges of heterogeneities appear in the wave patterns in the form of hyperbola branches. The intensity of the wave field distortion is determined by the contrast of the physical properties of rocks, as well as by the spatial orientation and depth of the heterogeneity, which is a key parameter of georadar sensing. It has been established that the variability of the physical properties of rock masses near disturbances introduces significant distortions into the parameters determined by georadar sounding, including the angle of incidence of disturbances. The considered methodological approach provides the basis for creating a digital image of georadar probing of a rock mass.

Keywords: georadar sounding, rocks, wave field, computer modeling, digital image

For citation: Kalashnik A.I., Dyakov A.Y. Interpretation of the results of georadar sounding of a rock mass using a digital image. *Russian Mining Industry*. 2023;(5S):119–124. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5S-119-124>

Введение

Для эффективной и рациональной разработки полезных ископаемых в скальных массивах карьерами необходима детализированная информация о структуре и состоянии пород, определяющих качество ведения горных работ. Одной из важных задач является выявление нарушенных зон пород рабочих уступов карьера, оказывающих существенное влияние как на устойчивость обнажений пород, так и на последующую отработку уступа. Наиболее достоверные знания о структуре и состоянии пород скального массива получаются на основе данных специально пробуренных геологических скважин, однако в этом случае возможно получение только фактически точечных данных. Увеличение количества скважин, сгущение сетки их расположения в целях получения достаточной полноты данных приводит к неоправданно высоким затратам. В этой связи применение неразрушающих, дающих сплошную (профильную) картину методов исследования является предпочтительным и экономически значительно более выгодным. Для изучения геолого-структурного строения массивов скальных пород активно используется георадарное зондирование [1–4]. Этот метод основан на излучении электромагнитного поля для исследования внутренней структуры массива за счет регистрации изменений физических свойств слагающих его пород.

Неразрушающее георадарное зондирование доказало свою эффективность в исследовании внутренней структуры и физических свойств различных типов пород [3; 5; 6] и может быть успешно использовано для изучения строения скальных массивов. Так, например, георадарными определениями выявлены признаки зон структурных неоднородностей в подземных рудниках и на карьерах [3; 5; 7]. Для выявления и изучения зон тектонических нарушений (разломов) земной коры успешным является комплексирование георадиолокации с радиоимпедансным методом [8]. В ряде работ показано, что применение метода георадиолокации позволило не только выявить местоположения разрывных нарушений, но и определить их мощность с углами падения. В частности, на Старобинском месторождении отмечен успешный опыт применения георадарных исследований при научно-техническом сопровождении проходки разведочной выработки в разломной зоне [7]. Рассмотрены вопросы интерпретации данных георадара на основе разнообразных и сложных моделей в зоне разлома, отмечено, что идентификация таких структур крайне затруднена [9]. С использованием численного моделирования работы георадара выявлены особенности волновой картины в зоне разлома [10].

Из зарубежного опыта применения георадиолокации выделяются работы, связанные с изучением крупных разломных структур: Fossodella Valle Fault (Италия) [11], Songino Fault (Монголия) [12], Narmada-SonFault (Индия) [13]. Большое внимание уделено применению компьютерного моделирования работы георадара при интерпретации вертикальных разломов в Южной Корее [14; 15]. В предгорном регионе хребта Пир-Панджал к северо-западу от Гималаев путем интеграции геоморфологических показателей в сочетании с георадарными данными выполнен анализ неотектонических структур [16]. Также необходимо выделить работу, посвященную интерпретации прохождения георадарного сигнала сквозь трещиноватую породу [17].

Несмотря на то что георадарное зондирование широко используется исследователями для изучения физических свойств горных пород, вопросы, связанные с влиянием

этих свойств на точность локализации нарушений этим методом, до сих пор остаются открытыми. Применение стандартных подходов для идентификации и локализации зон структурных нарушений при интерпретации данных георадарного зондирования подходит не для всех случаев, что связано с большим разнообразием геолого-геофизических условий. Целью работы являлись разработка и апробирование методического подхода к интерпретации результатов георадарного зондирования скального массива пород с использованием цифрового образа.

Методы

Георадарное зондирование основано на излучении сверхширокополосных импульсов электромагнитных волн метрового и дециметрового диапазона в массив пород, а затем приёма результирующих сигналов, которые возникают на границах раздела слоев зондируемой среды с разными электрофизическими свойствами. Главным физическим параметром пород является их диэлектрическая проницаемость, которая определяет скорость прохождения электромагнитных волн. В результате георадарного зондирования получают радарограммы, которые представляют собой временные разрезы. На горизонтальной оси радарограммы отмечается пройденное георадаром расстояние, а на вертикальной оси – время прихода отраженных сигналов в наносекундах [1].

Картины распределения скорости распространения электромагнитных волн в массиве пород предоставляют возможность использования георадарного зондирования для изучения его внутренней структуры. Параметры результирующего сигнала георадарного зондирования информативны в отношении внутренней изменчивости свойств и неоднородности структуры скальных пород.

Для исследований применялся георадарный комплекс «Лоза-1В», оснащенный незранированной антенной 100 МГц. Результаты инструментальных измерений показали, что наведенное электромагнитное поле искажается на участках, где физические свойства скальных пород различаются (например, зоны неоднородностей массива, участки повышенной трещиноватости, зоны повышенного водонасыщения) [1; 3].

Одним из подходов к уменьшению неоднозначности при интерпретации данных георадарного зондирования является математическое моделирование радарограмм. Для решения прямой задачи георадарного зондирования используют конечно-разностное моделирование, основанное на решении уравнений Максвелла, которое реализовано в различных программных продуктах, например, GPRMAX и MatGPR. Исследование особенностей волновых процессов в техногенно-нарушенных скальных массивах с установлением связи между волновыми характеристиками электромагнитного сигнала и состоянием нарушенного (трещиноватого) массива скальных пород предоставляет основу для количественной интерпретации данных георадарного зондирования. Компьютерное моделирование электромагнитного поля, индуцированного георадарным зондированием, применяется для теоретического обоснования подходов к оценке влияния физических свойств скальных пород на локализацию ее нарушений георадарным зондированием. Моделирование значительно снижает неоднозначность в интерпретации георадарных данных, позволяя понять механизм формирования особенностей волновых характеристик (оси синфазности, амплитудные значения) и сравнить модельные данные с натурными.

Результаты

Результаты георадарных исследований внутренней структуры массива скальных пород и локализация его структурных нарушений на участке рабочего уступа рудника карьер Железный Ковдорского горнорудного массива скальных пород представлены на рис. 1. Полученные и обработанные радарограммы соотнесены с панорамным фотоснимком обнажений уступа карьера и использованы в дальнейшем анализе. В частности, локализуется наклонное структурное нарушение, четко визуализируемое на снимке и определяемое на радарограмме.

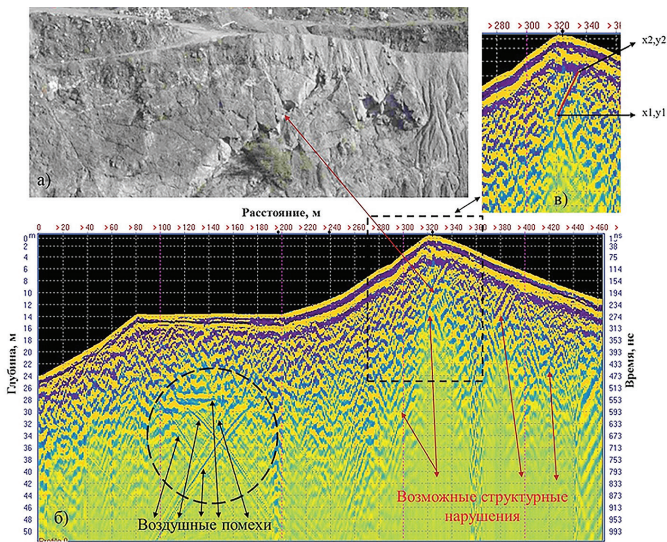


Рис. 1
Георадарное обследование массива скальных пород уступа карьера Железный:
а – фотоснимок обнажения уступа;
б – интерпретированная радарограмма;
в – фрагмент радарограммы с локализованным структурным нарушением

Fig. 1
GPR survey of the rock mass of a bench in the Zhelezny open-pit:
а – a photograph of the bench outcrop,
б – an interpreted radargram,
в – a fragment of a radargram with a localized structural disturbance

Анализ волновой радарограммы, полученной методом профилирования на постоянной базе (рис. 1, б), показал, что в интервале длины профиля 100–200 м на глубине 15 м от поверхности (28 по вертикальной оси), фиксируется большое количество гиперболических отражений, которые приурочены к находящимся на поверхности уступа сооружениям и конструкциям. Вычисленные для этого участка скорости V по теоретически рассчитанной гиперболе лежат в интервале 11–13,8 см/нс и интерпретируются как воздушные помехи. В правой части профиля на отметках его длины 340, 400 и 440 м прослеживаются возможные структурные нарушения. Значения скоростей для этого участка по теоретически рассчитанной гиперболе лежат в интервале 5,6–9,13 см/нс, что косвенно может свидетельствовать, что данные отражения получены от структур, находящихся непосредственно в массиве скальных пород. Выявленная на радарограмме в интервале расстояния 300–340 м структурная нарушенность (рис. 1, в), четко коррелирует с данными фотосъемки и визуального обследования уступа (рис. 1, а), на которых также четко прослеживается структурное нарушение.

Для анализа волновых картин и устранения неоднозначности при интерпретации данных выполнено компьютерное моделирование наведенного электромагнитного поля с генерацией синтетических радарограмм [1]. Для этого был создан цифровой образ георадарного зондирования массива скальных пород, включающий в себя последовательное создание геометрической компьютерной схемы, генерирование синтетических моделей радарограмм и волновых форм электромагнитного сигнала, с получением результирующих цифровых радарограмм (рис. 2).

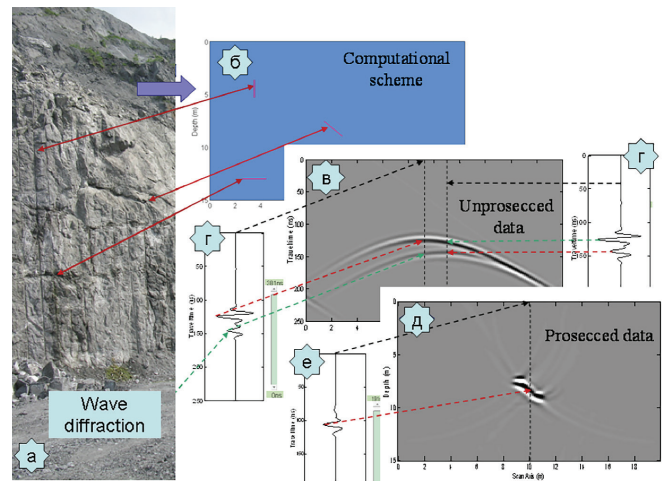


Рис. 2
Создание цифрового образа георадарного зондирования массива скальных пород:
а – неоднородности на обнажении уступа карьера;
б – компьютерная схема модели; в – синтетическая модель радарограммы;
г, е – волновые формы электромагнитного сигнала;
д – результирующая цифровая радарограмма

Fig. 2
Creation of a digital image of the georadar sounding of a rock mass:
а – heterogeneities on the outcrop of the open-pit bench,
б – a computer diagram of the model,
в – a synthetic model of the radargram,
г, е – waveforms of the electromagnetic signal,
д – the resulting digital radargram

Компьютерным моделированием имитировалась работа георадара, оснащенного антенной 100 МГц (наведенное электромагнитное поле). Моделируемый массив пород включал разнонаклонные (пологая субгоризонтальная, наклонная и вертикальная) структурные неоднородности, по отношению к дневной поверхности (рис. 2, а). Геометрическая схема модели участка скальных пород соответствовала вертикальному разрезу уступа размерами 25x10 м, включающему в себя неоднородности мощностью 0,1 м (рис. 2, б). Диэлектрическая проницаемость пород задавалась на разных этапах от 3 до 15 усл. ед. Синтетические модели радарограммы созданы для выделенных трех типов структурных нарушений (рис. 2, в) с различными волновыми формами электромагнитного сигнала (рис. 2, г). Результирующая цифровая радарограмма представляет собой формирующиеся в окрестности нарушения форму электромагнитного сигнала (рис. 2, е) и волновую картину (рис. 2, д).

Построенные по результатам многовариантного моделирования зависимости угла падения структурной нарушенности массива скальных пород от их диэлектрической проницаемости представлены на рис. 3. Рассмотрены зависимости положения наклонного структурного нарушения по отметкам георадарного профиля и по глубине (для фиксированных значений диэлектрической проницаемости) (рис. 3, а), и угла падения нарушения от диэлектрической проницаемости пород (в диапазоне от 3 до 15 усл. ед.) (рис. 3, б).

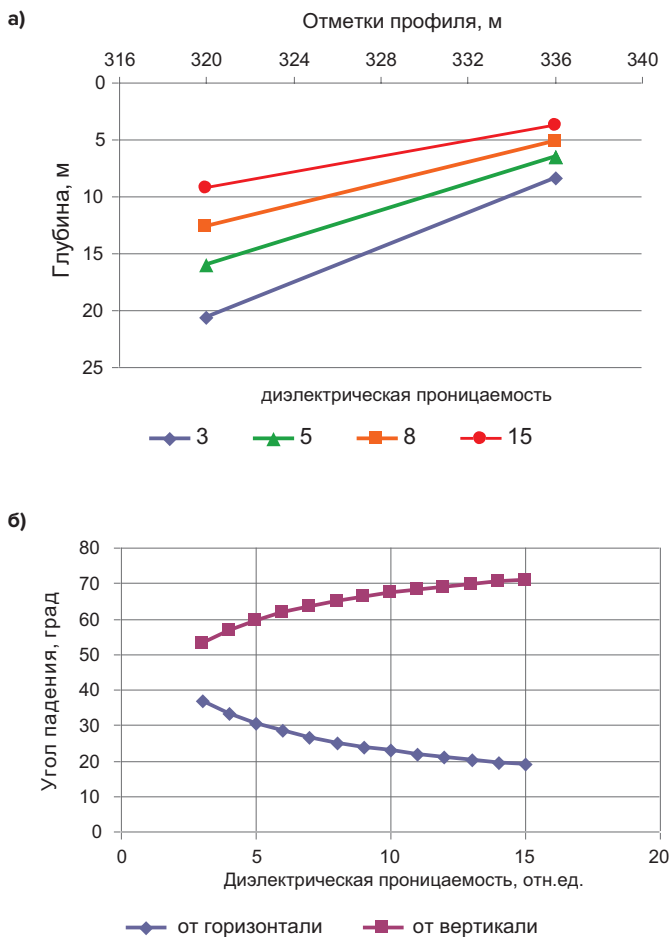


Рис. 3
Зависимости угла падения структурной нарушенности массива скальных пород от их диэлектрической проницаемости:
а – положение в пространстве;
б – отклонение от горизонтали и вертикали

Fig. 3
Dependence of the angle of incidence of the structural disturbance of the rock mass on its dielectric constant:
а – position in space,
б – deviation from horizontal and vertical axes

Обсуждение результатов

Особенностью георадарных исследований является то, что низкие значения диэлектрической проницаемости скальных пород в большинстве случаев характерны для плотных/монолитных участков пород, а повышенные обусловлены нарушенностью (трещиноватостью) пород, а также наличием воды в полостях и трещинах. Результаты исследований указывают на то, что зональное изменение диэлектрической проницаемости может привести

к погрешности при локализации структурных нарушений в пространстве как по глубине, так и по углу падения, что следует учитывать при интерпретации данных георадарного зондирования внутреннего строения массива.

При проведении исследований выявлено большое количество вторичных волн, маскирующих полезный сигнал, что значительно усложняет интерпретацию полученных данных. Появление такого рода волн на радарограммах связано со сферическим фронтом распространения электромагнитной волны, и, следовательно, объекты, размеры которых соизмеримы или меньше длины волны в данной среде, будут вести себя как точечные источники вторичных волн. Такие объекты будут отображаться в виде гипербол на радарограммах. При этом плоские отражающие поверхности, размеры которых превышают длину волны, будут сохранять свою форму. Для устранения данного эффекта применяется процедура миграции, заключающаяся в суммировании всех волн от элементарных источников по своим гиперболическим осям синфазности.

Результаты компьютерного моделирования электромагнитного поля, индуцированного георадарным зондированием, уточнили волновую картину осей синфазности и амплитудных характеристик георадарного сигнала на радарограмме скального массива пород, ослабленного различного рода (пологой, наклонной, вертикальной) структурной неоднородностью. При имитации приближения георадара к неоднородности, на результирующей цифровой радарограмме заблаговременно проявляются отражения в виде ветвей гипербол от углов неоднородности.

Интерпретация результатов георадарного зондирования скального массива пород с использованием цифрового образа заключалась в уточнении данных по локализации структурного нарушения в пространстве. На основе многовариантного моделирования исследуемого участка уступа карьера выявлено, что зональная изменчивость диэлектрической проницаемости пород приводит как к разбросу глубины (от 3 до 8 м верхней и от 8 до 21 м нижней части), так и угла падения (от 19 до 37 град от горизонтали или от 53 до 71 град от вертикали) структурного нарушения.

Таким образом, применение цифрового образа георадарного зондирования массива скальных пород позволяет снизить неопределенность данных и тем самым повысить точность локализации структурного нарушения по результатам полевых измерений.

Заключение

С применением георадарных технологий выполнены исследования внутренней структуры участка рабочего уступа рудника Железный Ковдорского горнорудного массива скальных пород. Получены и интерпретированы волновые радарограммы, отражающие изменчивость физических свойств пород. Выполнена идентификация структурных нарушений массива пород. Создание с применением компьютерного моделирования наведенного электромагнитного поля цифрового образа георадарного зондирования массива скальных пород, включающего разнонаклонные структурные нарушения, позволило уточнить подходы к их локализации в массиве посредством анализа осей синфазности сигналов волновой картины радарограмм. Установлены зависимости угла падения структурной нарушенности массива скальных

пород от их диэлектрической проницаемости как по положению в пространстве, так и по отклонению от горизонтали и вертикали. С использованием выявленных особенностей изменения волнового поля создан цифровой образ георадарного зондирования массива скальных пород. Использование цифрового образа позволило уточнить локализацию структурного нарушения на участке уступа действующего карьера Железный Ковдорского

горнорудного массива скальных пород. Выявлено, что зональная изменчивость диэлектрической проницаемости пород существенно сказывается на результирующую как в пространстве, так и по углу падения локализацию структурных нарушений в массиве скальных пород.

Список литературы

1. Дьяков А.Ю., Калашник А.И. *Методические основы георадарных исследований горнотехнических объектов*. Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН; 2021. 110 с. <https://doi.org/10.37614/978.5.91137.443.3>
2. Жуков А.А., Пригара А.М., Царев Р.И., Ворошилов В.А. Решение горнотехнических задач на месторождении калийных солей методами геофизики. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(5-1):82–91. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_51_0_82
3. 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):60–64. Режим доступа: <https://rudmet.ru/journal/1298/article/22125/>
4. 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):3–10. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20180401>
5. Харисов Т.Ф., Мельник В.В., Харисова О.Д., Замятин А.Л. Геофизические исследования массива горных пород в условиях подземного рудника. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;(3-1):255–263. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-31-0-255-263>
6. Набатов В.В., Уткина А.В. Анализ поведения добротности и ее составляющих при георадиолокационном выявлении полостей в массиве пород на границе «обделка-грунт». *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(6):142–155. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_6_0_142
7. Мусалев Д.Н., Прохоров Н.Н., Клубук А.М. Опыт георадиолокационных исследований при научно-техническом сопровождении горных работ на Старобинском месторождении калийных солей. *Горный журнал*. 2018;(8):42–47. <https://doi.org/10.17580/gzh.2018.08.05>
8. Башкуев Ю.Б., Хаптанов В.Б., Дембелов М.Г. Комплексование георадарных и радиоимпедансных зондирований Байкальской рифтовой зоне. *Геодинамика и тектонофизика*. 2019;10(2):603–620. <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-3-0429>
9. Александров П.Н., Морозов Ю.А., Кулаковский А.Л., Матвеев М.А., Смутьская А.И., Соколова Ю.Ф. Изучение приповерхностной структуры метаморфических толщ георадарным методом (Северное Приладожье). *Геофизические исследования*. 2020;21(1):5–23. <https://doi.org/10.21455/gr2020.1-1>
10. Bricheva S.S., Dubrovin I.O., Lunina O.V., Denisenko I.A., Matasov V.V., Turova I.V., Entin A.L., Panin A.V., Deev E.V. Numerical simulation of ground-penetrating radar data for studying the geometry of fault zone. *Near Surface Geophysics*. 2021;19(2):261–277. <https://doi.org/10.1002/nsg.12153>
11. Ercoli M., Cirillo D., Pauselli C., Jol H.M., Brozzetti F. Ground-penetrating radar signature of Quaternary faulting: a study from the Mt. Pollino region, southern Apennines, Italy. *Solid Earth*. 2021;12(11):2573–2596. <https://doi.org/10.5194/se-12-2573-2021>
12. Bano M., Tsend-Ayush N., Schlupp A., Munkhuu U. Ground-Penetrating Radar Imaging of Near-Surface Deformation along the Songino Active Fault in the Vicinity of Ulaanbaatar, Mongolia. *Applied Sciences*. 2021;11(17):8242. <https://doi.org/10.3390/app11178242>
13. Chamyal L.S., Parul Joshi, Swarali Vasaikar, Maurya D.M. Neotectonic characterization of the Narmada-Son Fault (NSF) using field and GPR data, Gujarat, western India. *Journal of the Palaeontological Society of India*. 2022;67(1):72–84.
14. Kobayashi T., Sun C., Choi J.-H. Near-surface fault investigation by Ground Penetrating Radar (GPR) surveys. *Journal of the Geological Society of Korea*. 2022;58(4):445–455. <https://doi.org/10.14770/jgsk.2022.58.4.445>
15. Kobayashi T., Ko K., Choi S.-J., Choi J.-H. Orthogonal dual polarization GPR measurement for detection of buried vertical fault. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2022;19:4022805. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2022.3156295>
16. Bali B.S., Wani A.A. Analysis of neotectonic structures in the piedmont region of Pir Panjal Range NW Himalaya by integrating geomorphic indicators coupled with geophysical transects (GPR). *Natural Hazards*. 2021;105(2):2869–2882. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04428-4>
17. Benter A, Moore W., Antolovich M. GPR signal attenuation through fragmented rock. *Mining Technology*. 2016;125(2):114–120. <https://doi.org/10.1080/14749009.2015.1110950>

References

1. Dyakov A.Yu., Kalashnik A.I. *Methodical bases of GPR studies of mining facilities*. Apatity: Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences; 2021. 110 p. (In Russ). <https://doi.org/10.37614/978.5.91137.443.3>
2. Zhukov A.A., Prigara A.M., Tsarev R.I., Voroshilov V.A. Solution of mining engineering problems at a potassium salt deposit using geophysical methods. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(5-1):82–91. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_51_0_82

3. Kalashnik A.I., Zaporozhets D.V., Dyakov A.Yu., Kazachkov S.V., Sokharev V.A. GPR-study of open-pit benches related to rock structure and condition, Zhelezny open pit mine, Kovdorsky mining-and-processing integrated works. *Gornyi Zhurnal*. 2014;(4):60–64. (In Russ.) Available at: <https://rudmet.ru/journal/1298/article/22125/>
4. Mel'nikov N.N., Kalashnik A.I., Kalashnik N.A., Zaporozhets D.V. Multi-level geomonitring of natural-and-technical objects in the mining industry. *Journal of Mining Science*. 2018;54(4):535–540. <https://doi.org/10.1134/S1062739118043977>
5. Kharisov T.F., Mel'nik V.V., Kharisova O.D., Zamjatin A.L. Geophysical research of the rock massif in underground mine conditions. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020;(3-1):255–263. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-31-0-255-263>
6. Nabatov V.V., Utkina A.V. Behavior of the quality factor and its constituents in radar detection of voids at the rock-lining interface. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(6):142–155. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_6_0_142
7. Musalev D.N., Prokhorov N.N., Klabuk A.M. Experience of GPR application in scientific and engineering supervision of potash mining at the Starobinsk deposit. *Gornyi Zhurnal*. 2018;(8):42–47. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2018.08.05>
8. Bashkuev Yu.B., Khaptanov V.B., Dembelov M.G. Integration of the GPR and radio-impedance techniques in studies of the Baikal rift zone. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2019;10(3):603–620. (In Russ.) <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-3-0429>
9. Aleksandrov P.N., Morozov Y.A., Kulakovskij A.L., Matveev M.A., Smul'skaya A.I., Sokolova Y.F. Studying of the metamorphic stratum subsurface structure by the georadar method (the Northern Ladoga region). *Geophysical Research*. 2020;21(1):5–23. (In Russ.) <https://doi.org/10.21455/gr2020.1-1>
10. Bricheva S.S., Dubrovin I.O., Lunina O.V., Denisenko I.A., Matasov V.V., Turova I.V., Entin A.L., Panin A.V., Deev E.V. Numerical simulation of ground-penetrating radar data for studying the geometry of fault zone. *Near Surface Geophysics*. 2021;19(2):261–277. <https://doi.org/10.1002/nsg.12153>
11. Ercoli M., Cirillo D., Pauselli C., Jol H.M., Brozzetti F. Ground-penetrating radar signature of Quaternary faulting: a study from the Mt. Pollino region, southern Apennines, Italy. *Solid Earth*. 2021;12(11):2573–2596. <https://doi.org/10.5194/se-12-2573-2021>
12. Bano M., Tsend-Ayush N., Schlupp A., Munkhuu U. Ground-Penetrating Radar Imaging of Near-Surface Deformation along the Songino Active Fault in the Vicinity of Ulaanbaatar, Mongolia. *Applied Sciences*. 2021;11(17):8242. <https://doi.org/10.3390/app11178242>
13. Chamyal L.S., Parul Joshi, Swarali Vasaikar, Maurya D.M. Neotectonic characterization of the Narmada-Son Fault (NSF) using field and GPR data, Gujarat, western India. *Journal of the Palaeontological Society of India*. 2022;67(1):72–84.
14. Kobayashi T., Sun C., Choi J.-H. Near-surface fault investigation by Ground Penetrating Radar (GPR) surveys. *Journal of the Geological Society of Korea*. 2022;58(4):445–455. <https://doi.org/10.14770/jgsk.2022.58.4.445>
15. Kobayashi T., Ko K., Choi S.-J., Choi J.-H. Orthogonal dual polarization GPR measurement for detection of buried vertical fault. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2022;19:4022805. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2022.3156295>
16. Bali B.S., Wani A.A. Analysis of neotectonic structures in the piedmont region of Pir Panjal Range NW Himalaya by integrating geomorphic indicators coupled with geophysical transects (GPR). *Natural Hazards*. 2021;105(2):2869–2882. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04428-4>
17. Benter A, Moore W., Antolovich M. GPR signal attenuation through fragmented rock. *Mining Technology*. 2016;125(2):114–120. <https://doi.org/10.1080/14749009.2015.1110950>

Информация об авторах

Калашник Анатолий Ильич – кандидат технических наук, руководитель лаборатории геофлюидомеханики, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук; г. Апатиты, Российская Федерация; e-mail: a.kalashnik@ksc.ru

Дьяков Андрей Юрьевич – научный сотрудник лаборатории геофлюидомеханики, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук; г. Апатиты, Российская Федерация; e-mail: a.dyakov@ksc.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 22.11.2023

Поступила после рецензирования: 09.11.2023

Принята к публикации: 23.11.2023

Information about the authors

Anatolii I. Kalashnik – Cand. Sci. (Eng.), Head of laboratory, Mining Institute Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; e-mail: a.kalashnik@ksc.ru

Andrey Y. Dyakov – Scientific Researcher, Mining Institute Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; e-mail: a.dyakov@ksc.ru

Article info

Received: 22.11.2023

Revised: 09.11.2023

Accepted: 23.11.2023