

КОМПЛЕКСНЫЙ ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКИЙ КАРОТАЖ ПРИКОНТУРНОГО МАССИВА. ОБОРУДОВАНИЕ И ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

П.В. Николенко¹, М.Г. Зайцев¹

¹ НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: p.nikolenko@misis.ru

Аннотация: Одним из направлений совершенствования скважинных геофизических методов изучения строения и состояния породного массива является совместное проведение оптических и акустических исследований с последующей комплексной обработкой их результатов. Для уточнения параметров акустических измерений в статье приводятся результаты прозвучивания поперечными волнами изотропных и слоистых пород, а также образцов, содержащих трещину. Показано, что наибольшее затухание амплитуды поперечной волны происходит при совпадении направлений смещения частиц и плоскостей напластований (плоскостей трещин), что может быть использовано для определения наклона трещины при реализации скважинных ультразвуковых исследований. Для проверки концепции комплексирования ультразвуковых и оптических измерений были изготовлены специализированный каротажный комплекс, а также физическая модель измерительной скважины. Центральной частью каротажного комплекса является зонд, позволяющий производить бесконтактную оптическую оценку особенностей строения стенки скважины, а также регистрировать параметры продольных и поперечных волн с управляемым вектором поляризации в ультразвуковом диапазоне частот. Эксперименты на модели показали эффективность работы комплекса. При этом повышение надежности метода достигается качественным совпадением результатов акустических и оптических измерений, а высокая производительность контроля – за счет возможности проведения ультразвуковых измерений только в зонах, в которых аномалии выявлены по результатам оптических измерений.

Ключевые слова: каротаж, горные породы, ультразвук, оптические методы, комплексирование, трещиноватость, контроль, поперечные волны.

Благодарность: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-77-00046).

Для цитирования: Николенко П. В., Зайцев М. Г. Комплексный оптико-акустический каротаж приконтурного массива. Оборудование и физическое моделирование // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 1. – С. 95–106. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_1_0_95.

Integrated acoustic and optical logging in adjacent rock mass. Equipment and physical modeling

P.V. Nikolenko¹, M.G. Zaitsev¹

¹ National University of Science and Technology «MISS», Moscow, Russia,
e-mail: p.nikolenko@misis.ru

Abstract: One of the routes of advancing the downhole geophysical survey of the rock mass structure and behavior is the joint acoustic and optical research and the integrated processing of the results. For refining the acoustic measurement parameters, the article describes the shear wave scanning inspection of isotropic and laminated rocks, as well as samples with fracture. It is shown that the strongest attenuation of the shear wave amplitude takes place when the directions of particle displacement and stratification planes (fracture planes) coincide, and this fact can be used to determine fracture slopes during downhole ultrasonic scanning. With a view to testing the concept of ultrasonic and optical measurement integration, a dedicated logging system and a physical model of a well were manufactured. The core of the logging system is a sonic device capable of contactless optical identification of structural features of the well walls, as well as can record parameters of P- and S-waves with the adjustable polarization phasor in the ultrasonic frequency range. The model experimentation proved efficiency of the logging system. The method reliability increases with the qualitative coincidence of the acoustic and optical measurement results, and the performance enhances as the ultrasonic measurement is only carried out in abnormal zones detected by the optical inspection.

Key words: logging, rocks, ultrasound, optical methods, complexing, jointing, control, shear waves.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation, Project No. 21-77-00046.

For citation: Nikolenko P. V., Zaitsev M. G. Integrated acoustic and optical logging in adjacent rock mass. Equipment and physical modeling. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(1):95-106. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_1_0_95.

Введение

Наиболее полная и своевременно полученная информация о строении и состоянии породного массива в окрестностях горных выработок является основой обеспечения безопасности ведения горных работ, используется для верификации геомеханических моделей, а также коррекции технологических процессов подземной добычи полезных ископаемых. Одним из наиболее эффективных способов получения такой информации является применение различных методов горной геофизики [1 – 3], в частности в скважинном варианте исполнения [4]. Последний является наиболее оптимальным, сочетающим в себе относительно большую глубину зондирования массива (определяемую глубиной измерительных скважин), а также высокое простран-

ственное разрешение, зависящее от конкретного метода и шага зондирования.

Наибольшее распространение при контроле строения массива получили ультразвуковые (УЗ) скважинные методы в вариантах межскважинного прозвучивания или каротажа [5 – 7]. Экспериментальные исследования на моделях [8, 9], а также в натуральных условиях [10, 11] показали эффективность подобных методов. Однако следует понимать, что в отличие от каротажных измерений, производимых в скважинах, заполненных буровым раствором или водой [12 – 15], при реализации каротажа приконтурного массива приходится иметь дело с необходимыми скважинами. Это приводит к необходимости использовать сухой акустический контакт на границе «преобразователь – порода», обеспечи-

ваемый специальными прижимными устройствами. Использование таких устройств является вынужденной мерой, значительно исключающей возможность проведения непрерывного УЗ-сканирования скважины. В работах [16, 17] отмечается высокая трудоемкость проведения таких измерений.

Альтернативой каротажу с сухим акустическим контактом до известной степени можно считать методы телевизионного высокочастотного УЗ-сканирования [18 – 20]. Подобные методы позволяют в бесконтактном режиме на основе анализа отраженного от стенок скважины сигнала оценивать ее внутреннее состояние. При этом разрешающая способность таких методов относительно невысока (выявляются трещины с раскрытием более 3 мм и каверны более 1 см [21]).

Еще одним подходом к изучению строения массива является использование оптических методов, заключающихся в получении изображения внутренней поверхности скважины различными видеозондами [22 – 26]. Подобные методы отличаются высокой производительностью проведения натуральных измерений, однако дальнейшая интерпретация является довольно трудоемкой и часто носит субъективный характер.

Другим подходом к оптическому сканированию является регистрация отдельных параметров фоточувствительными модулями различного назначения. Ранее в работах [27, 28] были обоснованы основные принципы оптических измерений в скважинах, разработаны устройства для их реализации, а также экспериментально продемонстрированы возможности. Так, в работе [28] показано, что оптические измерения многоканальными зондами, работающими по принципу регистрации интенсивности отраженного от стенки скважины света, позволяют с высокой точностью определять наличие трещин, а также вычис-

лять углы их падения и простирания. Также была установлена взаимосвязь между шероховатостью поверхности скважины и амплитудными параметрами УЗ-колебаний, а также разработан электронный модуль для бесконтактной оценки степени шероховатости стенки скважины в зоне прозвучивания на основе анализа интенсивности рассеяния лазерного излучения [27].

Оптические измерения отличаются высокой производительностью и позволяют получать большие объемы информации о внешнем виде поверхности скважины. Однако очевидно, что полученные данные не будут нести информацию о внутреннем строении прискважинного массива. При этом известно, что в процессе бурения могут происходить как процесс образования новых неглубоких трещин, так и обратный процесс — залечивание существующих трещин (заполнение их пылью и буровой мелочью). Таким образом, оптические методы должны быть в обязательном порядке дополнены методами, позволяющими оценить особенности подповерхностного строения и состояния пород, а также подтвердить (или опровергнуть) результаты оптического сканирования. Для решения последней задачи при определении пространственного расположения трещины наряду с оптическими методами предлагается использовать прозвучивание поперечными волнами с изменяемым вектором поляризации, позволяющими не только установить факт наличия трещины, но и оценить угол ее падения.

Методы экспериментальных исследований на образцах и физической модели скважины

Лабораторные исследования производились в два этапа — измерения на образцах и измерения на физической модели скважины. Поскольку изготовление физической модели, содержащей

все возможные особенности строения массива (мелкослоистую структуру, трещины различных направлений с разными типами заполнителей и т.п.), практически невозможно, то на первом этапе целью исследований было определение влияния анизотропии и трещиноватости пород на параметры распространения поперечных волн с изменяемым вектором поляризации на образцах. Всего было подготовлено три группы по пять образцов: группа «Гр», представленная изотропным гранитом Мансуровского месторождения; группа «ЖК», представленная слоистым железистым кварцитом КМА; группа «Г», представленная гипсом с доломитовыми включениями Новомосковского месторождения. В дополнение ненарушенным образцам были подготовлены образцы гранита, содержащие магистральную трещину, пересекающую образец перпендикулярно его оси (группа «Тр»). Внешний вид образцов представлен на рис. 1.

Для установления влияния анизотропии образцов на параметры поперечных волн был подготовлен специализированный стенд, состоящий из двух преобразователей поперечных волн с точечным акустическим контактом, генератора ультразвуковых сигналов, предусилителя ПАЭФ-014 и аналого-цифрового преобразователя с частотой дискретизации 5 МГц, подключенного к персональному компьютеру. Программное обеспечение позволяло в автоматизированном режиме определять амплитуду и скорость поперечных волн, а также сохранять полные волновые формы ультразвуковых колебаний.

Прозвучивание производилось по схеме, представленной на рис. 1. На боковой поверхности образца устанавливались и закреплялись акустические преобразователи. Усилие прижима на протяжении эксперимента оставалось фиксированным и равным 10 Н и достигалось использованием металлического

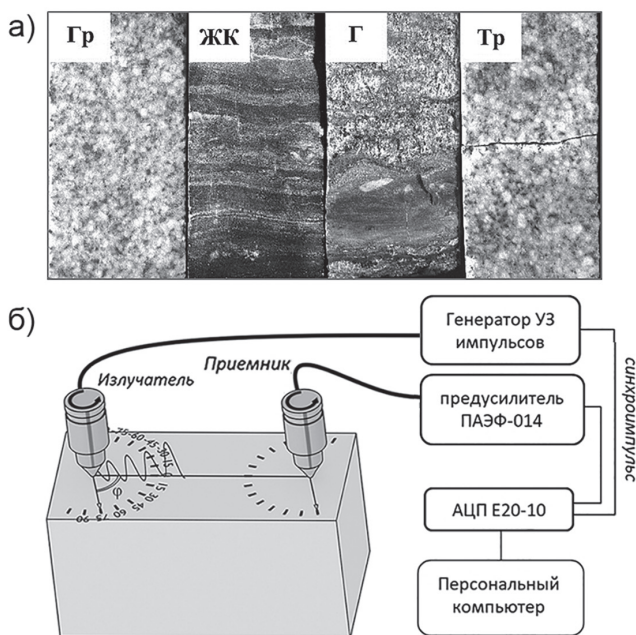


Рис. 1. Образцы горных пород (а) и схема их прозвучивания (б)

Fig. 1. Rock samples (a) and sounding scheme (b)



Рис. 2. Общий вид оптико-акустического каротажного комплекса (а) и физическая модель скважины (б)
 Fig. 2. Overview of optical-acoustic logging complex (a) and measurement process on well physical model (b)

груза. Излучающий и приемный преобразователи располагались так, чтобы векторы поляризации поперечных волн оказывались параллельными, а угол φ между направлением колебания частиц и осью образца составлял 90° . Измерения производились с шагом $\varphi = 15^\circ$ в диапазоне $-90^\circ \div 90^\circ$. Таким образом, для каждого образца формировался массив из 13 волновых форм, содержащих информацию об амплитудах, скоростях и спектральном составе поперечных волн.

Второй этап исследований заключался в проведении совместных акустических и оптических измерений на физической модели скважины с использованием специально разработанного оптико-акустического каротажного комплекса. Общий вид использованного каротажного комплекса и физическая модель скважины представлены на рис. 2.

Основой каротажного комплекса является специально разработанный каротажный зонд, состоящий из модулей ультразвуковых и оптических измерений. УЗ-модуль состоит из двух пьезоэлектрических преобразователей поперечных волн S1802 0.05A0D2PS с резонансной

частотой 50 кГц и сервоприводов, позволяющих, вращая преобразователи, изменять угол между вектором поляризации S-волны и осью скважины. Управление сервоприводами осуществляется с управляющего модуля, связанного с зондом многожильным экранированным кабелем. Прижим преобразователей к стенке скважины осуществляется пневматической системой и насосом с цифровым манометром. Модуль позволяет определять скорости распространения и амплитуды продольных и поперечных волн, а также (в случае записи полных волновых форм) весь набор спектральных параметров.

Оптический модуль предназначен для бесконтактного определения степени шероховатости поверхности скважины, а также выявления трещин, пересекающих скважину, и оценки их ориентации в пространстве. В основе работы модуля лежит принцип измерения интенсивности отраженного от стенки скважины светового излучения (как обычного на разных длинах волн, так и лазерного). Подробно конструкции оптических модулей, а также результаты их испытаний описаны в работах [27, 28].

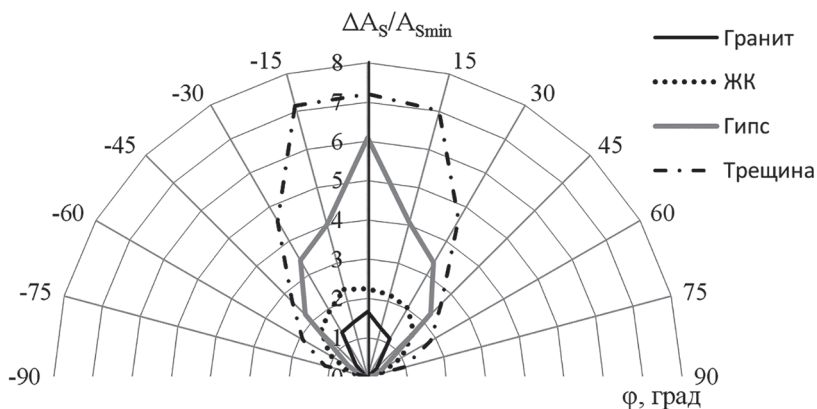


Рис. 3. Результаты экспериментального определения $A_s(\varphi)/A_{s_{min}}(\varphi)$
 Fig. 3. Results of the $A_s(\varphi)/A_{s_{min}}(\varphi)$ experimental determination

Модель массива представляла собой цилиндр, изготовленный из песчано-цементной смеси с внешним диаметром 200 мм, в центре которого была оборудована скважина диаметром 76 мм. Общая длина модели составляла 1500 мм. На отметках 700 и 1000 мм в модели были созданы две магистральные трещины, ортогонально пересекающие скважину. Первая трещина имела раскрытие 1 мм и была полностью заполнена глиной, вторая трещина оставалась незаполненной. На участке 700–1000 мм с помощью шарошки на внутренней поверхности скважины была нанесена фактурная поверхность с шероховатостью $R_a \approx 200$ мкм (для остальных участков модели $R_a \approx 50$ мкм) в соответствии с ГОСТ 2789-73.

Акустические измерения производились с шагом 50 мм, при этом в каждой точке осуществлялась регистрация 7 волновых форм для углов φ от -45° до 45° с шагом 15° (максимальный диапазон поворота преобразователей в зонде). Шаг оптических измерений составлял 5 мм. Основными информативными параметрами выступали: для оценки шероховатости — интенсивность рассеянного на неровностях лазерного излучения I_{ψ} ; для определения наличия и

ориентации трещины — интенсивность света, измеренная 8 светочувствительными элементами, расположенными по периметру зонда, $I_{1.8}^{mp}$.

Анализ результатов экспериментов

Основным информативным параметром при измерениях на образцах была выбрана амплитуда поперечных волн из-за ее высокой чувствительности к трещинам и слоистым структурам. Затухание поперечной волны значительно возрастает при прохождении через сомкнутые трещины, а раскрытие трещин приводит к полному исчезновению подобных колебаний из-за пренебрежимо малых значений модуля сдвига в заполнителях трещин (газе или жидкости). На рис. 3 представлены результаты расчета приращений амплитуды поперечной волны ΔA_s относительно минимально зафиксированной $A_{s_{min}}$.

Из рис. 3 видно, что с ростом степени анизотропии значения $\Delta A_s/A_{s_{min}}$ увеличиваются, при этом в большей степени при $\varphi = 0^\circ$. Наибольшее изменение амплитуды наблюдается в случае наличия трещины. Полученные закономерности объясняются механизмом взаимодействия поперечных волн с границами

слоев и берегами трещин. При углах $\varphi = 90^\circ$ и $\varphi = -90^\circ$ направление сдвиговых колебаний оказывается параллельным напластованию (для образцов ЖК и Г) и берегам магистральной трещины (для образца «Тр»). В этом случае снижение амплитуд поперечных волн связана с различием модулей сдвига G на границах. При этом прохождение поперечных волн возможно только через сомкнутые трещины, в случае заполнения трещин водой или воздухом поперечные волны будут полностью исчезать из-за пренебрежимо малых значений G . При угле

$\varphi = 0^\circ$ направление смещения частиц ортогонально плоскостям напластования и трещине. В этом режиме модуль сдвига не участвует в передаче энергии УЗ-колебаний (фактически в данном случае прохождение поперечных волн через границы будет аналогично прохождению продольных волн). Таким образом, об угле между трещиной (слоистостью) и осью скважины можно судить по максимуму диаграммы $A_S(\varphi)/A_{Smin}(\varphi)$.

Результатом измерений на физической модели стали каротажные диаграммы, представленные вместе со схемой

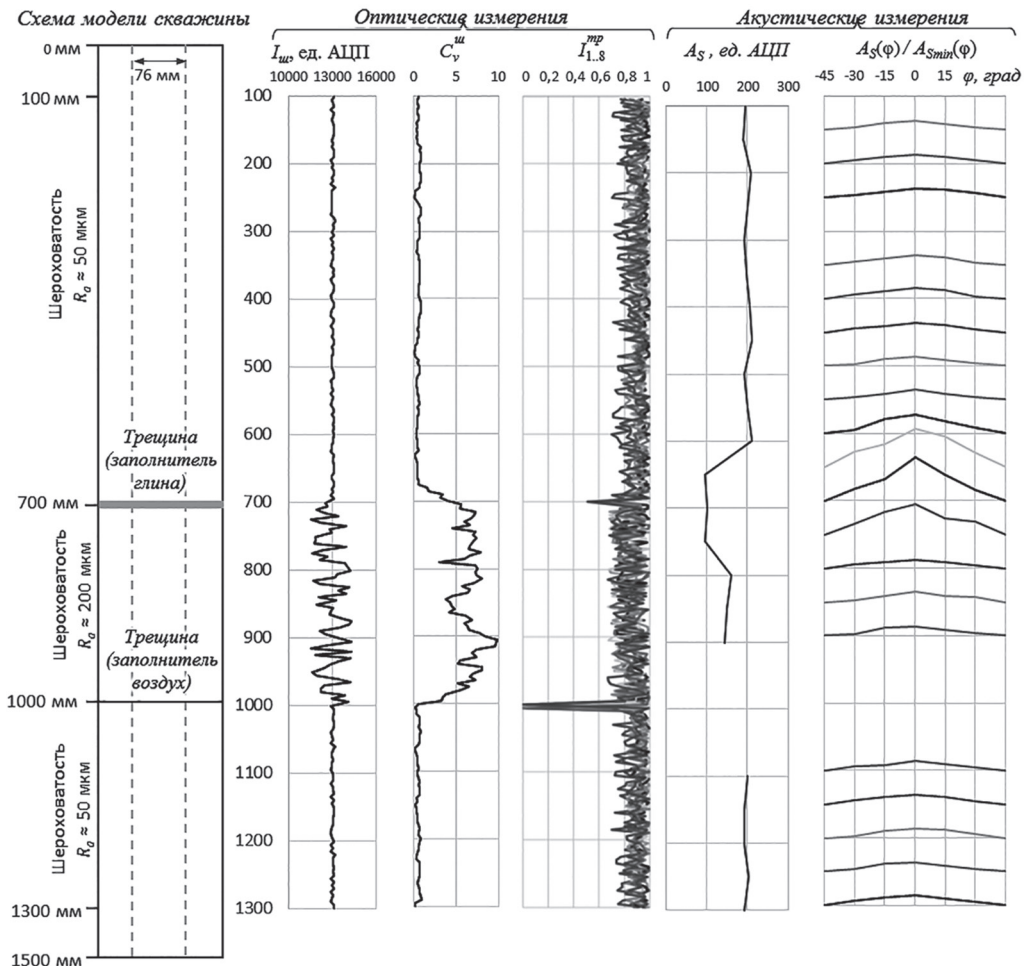


Рис. 4. Каротажные диаграммы, полученные на физической модели скважины

Fig. 4. Well logs obtained on the physical model of the well

скважины на рис. 4. Поскольку точки измерений располагаются в разных местах зонда, для совмещения каротажных диаграмм были введены соответствующие поправки. Точкой получения всей измерительной информации считается середина базы прозвучивания УЗ-модуля каротажного зонда.

Набор каротажных диаграмм состоит из двух блоков, соответствующих оптическим и акустическим измерениям. В дополнение к измеренным значениям $I_{\text{ш}}$ был рассчитан коэффициент вариации в скользящем окне шириной $n = 10$. На рис. 4 видно, что при входе зонда в зону с высокой шероховатостью значения резко возрастают. Увеличение шероховатости также сказывается на уровне амплитуд поперечной волны на участке 800–900 мм, где средние значения A_s оказываются на 25% ниже, чем на участках с низкой шероховатостью (например, на участке 100–600 мм). В данном случае снижение амплитуд можно однозначно трактовать как следствие ухудшения контактных условий на границе «преобразователь–массив», а не нахождения на базе прозвучивания зоны нарушения сплошности массива.

Каротажные кривые, полученные оптическим модулем поиска трещин, указывают на возможное присутствие двух трещин на отметках 700 и 1000 мм, которые выявляются по резкому снижению интенсивности отраженного света на всех 8 фоточувствительных элементах. Совпадение отметок минимальных значений указывает на ортогональное расположение трещины, однако аномалия на отметке 700 мм отличается низким соотношением сигнал/шум (менее 2/1) из-за присутствия глины в трещине. При таком соотношении результаты оптического сканирования не могут считаться достоверными. Подтверждением наличия трещины в данном случае являются результаты ультразвукового про-

звучивания. В районе отметки 700 мм наблюдается резкое (более чем на 50%) снижение A_s , а также искажение линий диаграммы $A_s(\varphi)/A_{s_{\text{min}}}(\varphi)$.

При этом в указанной зоне максимум отношения $A_s/A_{s_{\text{min}}}$ наблюдается при $\varphi = 0^\circ$, что также указывает на ортогональность трещины по отношению к оси скважины. В зоне расположения трещины с воздушным заполнением на акустических диаграммах измеренные значения отсутствуют из-за невозможности регистрации поперечных волн, которые не могут распространяться в жидкостях и газах (реальное раскрытие трещины составляло $\approx 0,5$ мм).

Заключение

Повышение производительности и надежности каротажных измерений в приконтурном массиве пород может быть достигнуто путем комплексирования результатов оптического сканирования и ультразвукового прозвучивания. В работе на основе результатов экспериментов на образцах показана взаимосвязь между анизотропией свойств пород и амплитудой поперечной волны с управляемым вектором поляризации. Установлено, что наибольшее изменение амплитуды наблюдается при ортогональном расположении слоистости пород или магистральной трещины и направлением смещения частиц при сдвиговых колебаниях.

Для проверки эффективности совместных ультразвуковых и оптических измерений была создана модель измерительной скважины, а также изготовлен специализированный каротажный комплекс. Разработанное оборудование позволяет анализировать информацию об особенностях строения поверхности скважины, полученную оптическими модулями, а также информацию о строении прискважинного массива, полученную путем прозвучивания пород поперечными волнами с изменяемым вектором по-

ляризации. Результаты испытаний на физической модели доказали эффективность комплекса. Высокая производительность предлагаемого каротажного метода может быть достигнута выборочным применением трудоемкого, но более информативного УЗ-прозвучивания только в тех зонах, где по результатам оптическо-

го сканирования обнаружены признаки наличия зон нарушения сплошности приконтурного массива. Определение ориентации трещин возможно на основе совместного анализа результатов оптического сканирования и прозвучивания поперечными волнами с управляемым вектором поляризации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жуков А. А., Пригара А. М., Царев Р. И., Шусткина И. Ю. Способ шахтной сейсморазведки для изучения особенностей геологического строения ВКМС // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 4. — С. 121–136. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-04-0-121-136.
2. 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. — С. 42–47. DOI: 10.17580/gzh.2018.08.05.
3. Баженова Е. А. Выделение тектонически нарушенных зон в пределах рудного месторождения по комплексу геофизических методов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 5. — С. 67–83. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_5_0_67.
4. Дорохин К. А. Опыт применения скважинных сейсмоакустических исследований для оценки фактического состояния массива горных пород с использованием 2D и 3D-построений // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 5. — С. 80–88. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-80-88.
5. Kobayashi R. Studies on crack distribution and sonic velocity change in rocks // Journal of the Japan Institute of Metals. 1974, vol. 90, no. 1031, pp. 21–26. DOI: 10.2473/shigentosozai1953.90.1031_21.
6. Shkuratnik V. L., Bochkareva T. N. Theory of electroacoustic path during the interhole sonic testing of rocks surrounding. A worked space // Journal of Mining Science. 1996, vol. 32, no. 6, pp. 476–482. DOI: 10.1007/BF02046110.
7. Rasolofosaon P. N. J., Rabbel W., Siegesmund S., Vollbrecht A. Characterization of crack distribution: Fabric analysis versus ultrasonic inversion // Geophysical Journal International. 2002, vol. 141, no. 2, pp. 413–424. DOI: 10.1046/j.1365-246x.2000.00093.x.
8. Li T., Wang Z., Gu Y. J., Wang R., Wang Y. Experimental study of fracture structure effects on acoustic logging data using a synthetic borehole model // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2019, vol. 183, article 106433. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.106433.
9. Li T., Wang Z., Yu N., Wang R., Wang Y. Numerical study of pore structure effects on acoustic logging data in the borehole environment // Fractals. 2020, vol. 28, no. 3, article 2050049. DOI: 10.1142/S0218348X20500498.
10. Liu Y., Li Y., Qiao L., Fan D. Dry coupled ultrasonic testing technology and its application in testing rock dynamic and static parameters // Meitan Xuebao/Journal of the China Coal Society. 2019, vol. 44, no. 5, pp. 1465–1472. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2019.6019.
11. Liu Y., Qiao L., Li Y., Ma G., Golosov A. M. Ultrasonic spectrum analysis of granite damage evolution based on dry-coupled ultrasonic monitoring technology // Advances in Civil Engineering. 2020, vol. 2020, article 8881800. DOI: 10.1155/2020/8881800.
12. Lorentzen M., Bredesen K., Mosegaard K., Nielsen L. Estimation of shear sonic logs in the heterogeneous and fractured Lower Cretaceous of the Danish North Sea using supervised learning // Geophysical Prospecting. 2022, vol. 70, no. 8, pp. 1410–1431. DOI: 10.1111/1365-2478.13252.
13. Gubaidullin A. A., Boldyreva O. Y., Dudko D. N. Velocity and attenuation of linear waves in porous media saturated with gas and its hydrate // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2022, vol. 63, no. 4, pp. 599–605. DOI: 10.1134/S002189442204006X.

14. Cai M., Li M., Zhu X., Luo H., Zhang Q. Comprehensive evaluation of rock mechanical properties and in-situ stress in tight sandstone oil reservoirs // *Frontiers in Earth Science*. 2022, vol. 10, article 911504. DOI: 10.3389/feart.2022.911504.
15. Lebedev A. V. A way to simplify calculations in acoustic logging // *Geophysics*. 2021, vol. 86, no. 5, pp. 1 – 22. DOI: 10.1190/geo2020-0893.1.
16. Кормнов А. А., Николенко П. В. Структурная диагностика пород кровли горной выработки с использованием ультразвукового шумового корреляционного каротажа // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2016. – № 8. – С. 265 – 271.
17. Schuster K., Amann F., Yong S., Bossart P., Connolly P. High-resolution mini-seismic methods applied in the Mont Terri rock laboratory (Switzerland) // *Swiss Journal of Geosciences*. 2017, vol. 110, no. 1, pp. 213 – 231. DOI: 10.1007/978-3-319-70458-6_11.
18. Winkler K. W., D'Angelo R. Ultrasonic borehole velocity imaging // *Geophysics*. 2006, vol. 71, no. 3, pp. F25 – F30. DOI: 10.1190/1.2194532.
19. Yuan R., Han D., Tang Y., Wei H., Mo T., Wang C. Fracture characterization in oil-based mud boreholes using image logs: example from tight sandstones of Lower Cretaceous Bashiji-qike Formation of KS5 well area, Kuqa Depression, Tarim Basin, China // *Arabian Journal of Geosciences*. 2021, vol. 14, no. 6, article 435. DOI: 10.1007/s12517-021-06750-y.
20. Lei T., Zeroug S., Bose S., Prioul R., Donald A. Inversion of high-resolution high-quality sonic compressional and shear logs for unconventional reservoirs // *Petrophysics*. 2019, vol. 60, no. 6, pp. 697 – 711. DOI: 10.30632/PJV60N6-2019a1.
21. Еникеев В. Н., Ташбулатов В. Д., Гайфуллин М. Я., Гуман О. М. Применение скважинных акустических методов для решения задач разработки месторождений твердых полезных ископаемых // *Каротажник*. – 2011. – № 5 (203). – С. 224 – 237.
22. Williams J., Carole D. Acoustic and optical borehole-wall imaging for fractured-rock aquifer studies // *Journal of Applied Geophysics*. 2004, vol. 55, no. 1 – 2, pp. 151 – 159. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2003.06.009.
23. Sait I., Joerg M. Fracture connectivity from fracture intersections in borehole image logs // *Computers & Geosciences*. 2003, vol. 29, no. 2, pp. 143 – 153. DOI: 10.1016/S0098-3004(02)00113-9.
24. Скворцов В. Ю., Скобелев А. В. Глубинная телевизионная видеосистема «аргоцифра» на каротажном кабеле // *Каротажник*. – 2012. – № 1 (211). – С. 110 – 116.
25. Yuanming J. Infrared radiation with deformation of bolt and rock // *International symposium on photoelectronic detection and imaging 2009: advances in infrared imaging and applications*. 2009, vol. 7383. DOI: 10.1117/12.830941.
26. Weixing W., Fengping W., Xiaojun H., Junfang S. Rock fracture image acquisition using two kinds of lighting and fusion on a wavelet transform // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2016, vol. 75, no. 1, pp. 311 – 324. DOI: 10.1007/s10064-015-0747-4.
27. Николенко П. В., Зайцев М. Г. Оценка шероховатости поверхности и идентификация типа горных пород ультразвуковыми и оптическими методами // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2022. – № 3. – С. 5 – 15. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_3_0_5.
28. Николенко П. В., Зайцев М. Г., Чепур М. Д. Метод и оборудование для экспресс-контроля трещиноватости приконтурного массива пород на основе оптических измерений в скважинах // *Горный журнал*. – 2022. – № 3. – С. 8 – 12. DOI: 10.17580/gzh.2022.03.02. **МИАБ**

REFERENCES

1. Zhukov A. A., Prigara A. M., Tsarev R. I., Shustkina I. Yu. Method of mine seismic survey for studying geological structure features of Verkhnekamskoye salt deposit. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 4, pp. 121 – 136. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-04-0-121-136.

2. Musalev D. N., Prokhorov N. N., Klabuk A. M. GPR research experience in scientific and technical support of mining operations at the starobinskoye potassium salt deposit. *Gornyi Zhurnal*. 2018, no. 8, pp. 42 – 47. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2018.08.05.
3. Bazhenova E. A. Identification of fault zones within an orebody using a set of geophysical methods. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 5, pp. 67 – 83. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_5_0_67.
4. Dorokhin K. A. Experience of borehole seismic sounding for the assessment of physical state of rock mass using 2D and 3D representations. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 5, pp. 80 – 88. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-80-88.
5. Kobayashi R. Studies on crack distribution and sonic velocity change in rocks. *Journal of the Japan Institute of Metals*. 1974, vol. 90, no. 1031, pp. 21 – 26. DOI: 10.2473/shigentosozai1953.90.1031_21.
6. Shkuratnik V. L., Bochkareva T. N. Theory of electroacoustic path during the interhole sonic testing of rocks surrounding. A worked space. *Journal of Mining Science*. 1996, vol. 32, no. 6, pp. 476 – 482. DOI: 10.1007/BF02046110.
7. Rasolofosaon P. N. J., Rabbel W., Siegesmund S., Vollbrecht A. Characterization of crack distribution: Fabric analysis versus ultrasonic inversion. *Geophysical Journal International*. 2002, vol. 141, no. 2. pp. 413 – 424. DOI: 10.1046/j.1365-246x.2000.00093.x.
8. Li T., Wang Z., Gu Y. J., Wang R., Wang Y. Experimental study of fracture structure effects on acoustic logging data using a synthetic borehole model. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2019, vol. 183, article 106433. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.106433.
9. Li T., Wang Z., Yu N., Wang R., Wang Y. Numerical study of pore structure effects on acoustic logging data in the borehole environment. *Fractals*. 2020, vol. 28, no. 3, article 2050049. DOI: 10.1142/S0218348X20500498.
10. Liu Y., Li Y., Qiao L., Fan D. Dry coupled ultrasonic testing technology and its application in testing rock dynamic and static parameters. *Meitan Xuebao/Journal of the China Coal Society*. 2019, vol. 44, no. 5, pp. 1465 – 1472. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2019.6019.
11. Liu Y., Qiao L., Li Y., Ma G., Golosov A. M. Ultrasonic spectrum analysis of granite damage evolution based on dry-coupled ultrasonic monitoring technology. *Advances in Civil Engineering*. 2020, vol. 2020, article 8881800. DOI: 10.1155/2020/8881800.
12. Lorentzen M., Bredesen K., Mosegaard K., Nielsen L. Estimation of shear sonic logs in the heterogeneous and fractured Lower Cretaceous of the Danish North Sea using supervised learning. *Geophysical Prospecting*. 2022, vol. 70, no. 8, pp. 1410 – 1431. DOI: 10.1111/1365-2478.13252.
13. Gubaidullin A. A., Boldyreva O. Y., Dudko D. N. Velocity and attenuation of linear waves in porous media saturated with gas and its hydrate. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2022, vol. 63, no. 4, pp. 599 – 605. DOI: 10.1134/S002189442204006X.
14. Cai M., Li M., Zhu X., Luo H., Zhang Q. Comprehensive evaluation of rock mechanical properties and in-situ stress in tight sandstone oil reservoirs. *Frontiers in Earth Science*. 2022, vol. 10, article 911504. DOI: 10.3389/feart.2022.911504.
15. Lebedev A. V. A way to simplify calculations in acoustic logging. *Geophysics*. 2021, vol. 86, no. 5, pp. 1 – 22. DOI: 10.1190/geo2020-0893.1.
16. Kormnov A. A., Nikolenko P. V. Structural diagnostics of the roof of a mine working using ultrasonic noise correlation logging. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2016, no. 8, pp. 265 – 271. [In Russ].
17. Schuster K., Amann F., Yong S., Bossart P., Connolly P. High-resolution mini-seismic methods applied in the Mont Terri rock laboratory (Switzerland). *Swiss Journal of Geosciences*. 2017, vol. 110, no. 1, pp. 213 – 231. DOI: 10.1007/978-3-319-70458-6_11.
18. Winkler K. W., D'Angelo R. Ultrasonic borehole velocity imaging. *Geophysics*. 2006, vol. 71, no. 3, pp. F25 – F30. DOI: 10.1190/1.2194532.
19. Yuan R., Han D., Tang Y., Wei H., Mo T., Wang C. Fracture characterization in oil-based mud boreholes using image logs: example form tight sandstones of Lower Cretaceous Bashijike Formation of KS5 well area, Kuqa Depression, Tarim Basin, China. *Arabian Journal of Geosciences*. 2021, vol. 14, no. 6, article 435. DOI: 10.1007/s12517-021-06750-y.

20. Lei T., Zeroug S., Bose S., Prioul R., Donald A. Inversion of high-resolution high-quality sonic compressional and shear logs for unconventional reservoirs. *Petrophysics*. 2019, vol. 60, no. 6, pp. 697 – 711. DOI: 10.30632/PJV60N6-2019a1.

21. Enikeev V. N., Tashbulatov V. D., Gaifullin M. Ya., Guman O. M. Application of borehole acoustic methods for solving problems of developing solid mineral deposits. *Karotazhnik*. 2011, no. 5 (203), pp. 224 – 237. [In Russ].

22. Williams J., Carole D. Acoustic and optical borehole-wall imaging for fractured-rock aquifer studies. *Journal of Applied Geophysics*. 2004, vol. 55, no. 1 – 2, pp. 151 – 159. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2003.06.009.

23. Sait I., Joerg M. Fracture connectivity from fracture intersections in borehole image logs. *Computers & Geosciences*. 2003, vol. 29, no. 2, pp. 143 – 153. DOI: 10.1016/S0098-3004(02)00113-9.

24. Skvortsov V. Yu., Skobelev A. V. Deep television video system «argo-digital» on a logging cable. *Karotazhnik*. 2012, no. 1 (211), pp. 110 – 116. [In Russ].

25. Yuanming J. Infrared radiation with deformation of bolt and rock. *International symposium on photoelectronic detection and imaging 2009: advances in infrared imaging and applications*. 2009, vol. 7383. DOI: 10.1117/12.830941.

26. Weixing W., Fengping W., Xiaojun H., Junfang S. Rock fracture image acquisition using two kinds of lighting and fusion on a wavelet transform. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2016, vol. 75, no. 1, pp. 311 – 324. DOI: 10.1007/s10064-015-0747-4.

27. Nikolenko P. V., Zaitsev M. G. Surface roughness estimation and rock type identification by ultrasonic and optical techniques. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 3, pp. 5 – 15. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_3_0_5.

28. Nikolenko P. V., Zaitsev M. G., Chepur M. D. Method and equipment for the express-control of fracturing in adjacent rock mass by optical borehole logging. *Gornyi Zhurnal*. 2022, no. 3, pp. 8 – 12. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2022.03.02.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Николенко Петр Владимирович¹ – канд. техн. наук,
доцент, e-mail: p.nikolenko@misis.ru,

ORCID ID: 0000-0002-5126-6576,

Зайцев Михаил Геннадьевич¹ – аспирант,
e-mail: michailzaytsev1997@gmail.com,

ORCID ID: 0000-0001-9015-9346,

¹ НИТУ «МИСиС».

Для контактов: Николенко П.В., e-mail: p.nikolenko@misis.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

P.V. Nikolenko¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,

e-mail: p.nikolenko@misis.ru,

ORCID ID: 0000-0002-5126-6576,

M.G. Zaitsev¹, Graduate Student,

e-mail: michailzaytsev1997@gmail.com,

ORCID ID: 0000-0001-9015-9346,

¹ National University of Science and Technology «MISiS»,

119049, Moscow, Russia.

Corresponding author: P.V. Nikolenko, e-mail: p.nikolenko@misis.ru.

Получена редакцией 07.11.2022; получена после рецензии 05.12.2022; принята к печати 10.12.2022.

Received by the editors 07.11.2022; received after the review 05.12.2022; accepted for printing 10.12.2022.