

## ОЦЕНКА ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТИПА ГОРНЫХ ПОРОД УЛЬТРАЗВУКОВЫМИ И ОПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

П.В. Николенко<sup>1</sup>, М.Г. Зайцев<sup>1</sup>

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

**Аннотация:** В современной практике геоконтроля изучение структуры и состояния приконтурного массива производится с применением различных геофизических методов, в частности методов ультразвукового прозвучивания и каротажа. Особенностью таких измерений является неизбежная необходимость использования сухого контакта на границе «преобразователь-массив», что значительно снижает надежность получаемой информации. Расширение возможностей акустических скважинных методов исследования приконтурного массива возможно на основе их комплексирования с результатами бесконтактного оптического сканирования стенок скважин. Представлены результаты экспериментальных исследований различных типов пород, проведенных специально разработанными оптическими электронными модулями. Показано, что шероховатость поверхности породы можно определять на основе анализа интенсивности отраженного света, при этом в качестве основных информативных параметров могут выступать коэффициент вариации и коэффициент корреляции сигналов, зарегистрированных вдоль одного профиля двумя фоточувствительными элементами. Также экспериментально продемонстрировано влияние шероховатости поверхности на параметры ультразвуковых импульсов, заключающееся в снижении энергии и сужении спектра сигналов. Доказано, что энергией импульсов можно управлять, изменяя усилие прижима преобразователя в диапазоне давлений от 0 до 2,5 атм. Также продемонстрирована возможность атрибутирования типа породы на основе анализа интенсивности отраженного света на различных длинах волн, что может быть использовано для повышения надежности ультразвукового каротажа приконтурного массива, сложенного породами со схожими акустическими свойствами.

**Ключевые слова:** горные породы, контроль, оптические измерения, ультразвук, комплексирование, строение, состояние.

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

**Для цитирования:** 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.

### Surface roughness estimation and rock type identification by ultrasonic and optical techniques

P.V. Nikolenko<sup>1</sup>, M.G. Zaitsev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russia, e-mail: p.nikolenko@misis.ru

---

**Abstract:** In the present-day practice of geocontrol, the structure and behavior of rock masses are estimated using various geophysical methods, in particular, ultrasonic sounding and logging. Such measurement techniques require dry contact at the rock–transducer interface, which essentially reduces reliability of the information obtained. Enhancement of the acoustic approaches to the adjacent rock mass analysis is possible via their complexing with the contactless optical scanning of well walls. This article describes the experimental observation of various rock types using the dedicated optical electronic modules. It is shown that surface roughness of rocks can be determined from the analysis of the reflected light intensity, and the main message-bearing parameters in this case can be the coefficient of variation and coefficient of correlation of signals recorded along the same profile by two photosensors. Furthermore, it is experimentally proved that surface roughness has influence on ultrasonic pulses, which consists in reduction in energy and in spectrum of signals. It is proved that the energy of the pulses can be adjusted by changing the pressing force of the transducer in the pressure range from 0 to 2.5 atm. It is also possible to identify rock types from the analysis of the reflected light intensity at different wave lengths, which can be used to improve reliability of ultrasonic logging of adjacent rock mass composed of rocks having similar acoustic properties.

**Key words:** rocks, control, optical measurements, ultrasound, complexing, structure, behavior.

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

**For citation:** Nikolenko P. V., Zaitsev M. G. Surface roughness estimation and rock type identification by ultrasonic and optical techniques. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(3):5-15. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_3\_0\_5.

---

## Введение

Изучение строения приконтурного массива на сегодняшний день осуществляется в первую очередь на основании анализа керна, отобранного из скважин. Подобные исследования позволяют получить представление о литологическом строении массива вблизи выработок, а также приблизительно оценить степень его исходной нарушенности [1–3]. Однако анализ керна не позволяет наблюдать за развитием деструктивных процессов в приконтурном массиве в режиме мониторинга. Кроме того, колонковое бурение, как правило, является относительно дорогостоящим. Для непрерывного контроля состояния массива используются различные пассивные и активные геофизические методы, основанные на применении полей различной физической природы.

Одним из наиболее перспективных методов анализа строения и степени нарушенности массива можно считать активные акустические измерения в ультразвуковом (УЗ) диапазоне частот, производимые по схемам межскважинного прозвучивания или каротажа [4–6]. Особенностью УЗ измерений в приконтурном массиве является то, что в отличие от каротажа геологических скважин, заполняемых водой или буровым раствором [7, 8], измерительные скважины, пробуренные из выработок, редко оказываются водонаполненными. В этом случае неизбежно приходится сталкиваться с проблемой обеспечения контактных условий на границе «преобразователь-массив». В работах [9, 10] подробно обсуждается негативное влияние отсутствия контактной среды на указанной границе на параметры излучаемого

и принимаемого УЗ импульса. В работах [11, 12] описывается опыт применения сухого контакта при скважинных ультразвуковых измерениях. Однако невозможность учета качества внутренней поверхности скважины приводит к тому, что метод предлагается использовать лишь в качестве источника информации о локальных упругих свойствах массива. В [13, 14] описывается опыт применения ультразвукового каротажа в скважинах кровли выработки с использованием сухого контакта. Трудоемкость подобных методов крайне велика, измерения в одной скважине могут занимать несколько часов.

Повысить надежность и информативность УЗ измерений в скважинах могло бы наличие информации о качестве внутренней поверхности скважины — степени ее шероховатости, цвете, наличие видимых трещин и т.п. Частично такая задача может быть решена с использованием телевизионных методов контроля, позволяющих производить дистанционное высокочастотное УЗ сканирование стенок скважины [15–17]. Однако реальное применение таких методов существенно ограничено их низкой разрешающей способностью [18].

Другим подходом к изучению внутренней поверхности необводненных скважин можно считать использование целого набора оптических методов. В основном такие методы подразумевают видео- и фотосъемку поверхности скважины, освещаемой светом в видимом [19–21] и, реже, в инфракрасном [22] и ультрафиолетовом [23] диапазонах длин волн. Основным недостатком таких методов можно считать сложность интерпретации результатов измерений, которая носит субъективный характер и часто зависит от квалификации и опыта оператора. Подобные методы принципиально не позволяют определять степень шероховатости поверхности сква-

жины, учет которой может значительно расширить возможности УЗ прозвучивания за счет использования динамических информативных параметров.

В настоящей работе решается задача создания аппаратных решений для оптического определения цвета и степени шероховатости поверхности горных пород, а также экспериментального определения их чувствительности и подбора основных информативных параметров. Кроме того, на основе лабораторных исследований показывается влияние шероховатости поверхности породы на параметры УЗ импульсов при реализации модельных каротажных измерений.

## Методы

Оптическое определение уровня шероховатости поверхности горных пород основано на измерении интенсивности ИР рассеянного на неровностях света с помощью фоточувствительных элементов. Принцип действия метода поясняется рис. 1, а. Первый этап экспериментальных исследований заключался в оценке степени чувствительности предлагаемого оптического метода. Для этого использовались образцы в виде параллелепипедов размером 40×40×80 мм, изготовленные из следующих горных пород: оникс кальцитовый (группа «О»), серпентинит Лабинского месторождения (группа «С»), гипс Новомосковского месторождения (группа «Г»), доломит Мелеховского месторождения (группа «Д1»), гранит Токовского месторождения (группа «Гр1»), долерит Хребтового месторождения (группа «Дт»), железистый кварцит КМА (группа «ЖК»), гранит Мансуровского месторождения (группа «Гр2»), а также гранит месторождения Возрождение (группа «Гр3»). На каждой из боковых граней образца была нанесена фактурная поверхность, имитирующая различные типы обработки стенки скважины. Шероховатость по-

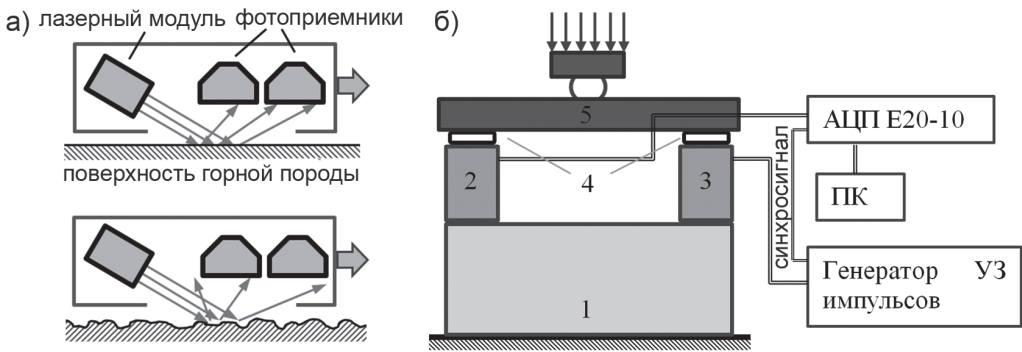


Рис. 1. Схемы оптического измерения уровня шероховатости поверхности (а) и ультразвукового прозвучивания на образцах горных пород (б): 1 – образец; 2, 3 – приемный и излучающий преобразователи; 4 – акустические развязки; 5 – стальная пластина

Fig. 1. Flowcharts of optical measurement of surface roughness (a) and ultrasonic sounding of rock samples (b): 1 – sample; 2 and 3 – receiving and transmitting transducers; 4 – acoustic couplings; 5 – steel plate

верхности определялась через параметр  $R_a$  (среднее арифметическое из абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины в соответствии с ГОСТ 2789-73 [22]). Для четырех граней образцов значения шероховатости составляли  $R_a = 10, 50, 100$  и  $200$  мкм.

Измерения производились специально разработанным электронным модулем, подключаемым к персональному компьютеру. В качестве источника света использовался лазерный модуль DSP6505-0415 с длиной волны  $\lambda = 650$  нм. В качестве фоточувствительного элемента выступали два фоторезистора PGM5516, подключаемые в качестве составной части делителя напряжений к АЦП ADS1115 разрядностью 16 бит. Предварительные тесты показали, что наибольшая чувствительность метода достигается при углах падения лазерного луча к поверхности сканирования  $10 \div 15^\circ$ . Сканирование поверхности образцов производилось по точкам вдоль профиля с шагом  $0,5$  мм. Значения IP сохранялись на жесткий диск персонального компьютера отдельно для каналов № 1 и № 2. Для каждого образца и типа поверхности было проведено не менее 50 измерений.

С целью определения особенностей влияния шероховатости поверхности горных пород на параметры ультразвуковых сигналов в рамках лабораторных исследований производилось поверхностное ультразвуковое прозвучивание подготовленных образцов по схеме, приведенной на рис. 1, б. К боковой грани образца с помощью пресса (на рисунке не показан) прижимались излучающий и приемный преобразователи с резонансной частотой  $f_{рез} = 200$  кГц. Тем самым имитировалось проведение каротажных исследований в необходимых скважинах. Для предотвращения распространения сигнала через стальную прижимную пластину использовались акустические развязки, изготовленные из войлока. Регистрация принятого сигнала производилась с помощью подключенного к персональному компьютеру АЦП E20-10 с частотой дискретизации  $10$  МГц. В практике каротажных измерений прижим преобразователей к стенке скважины осуществляется с помощью пневматических устройств. Поэтому для удобства дальнейшего использования полученных зависимостей усилие прижима, создаваемое прессом в лабораторных условиях, с учетом площади

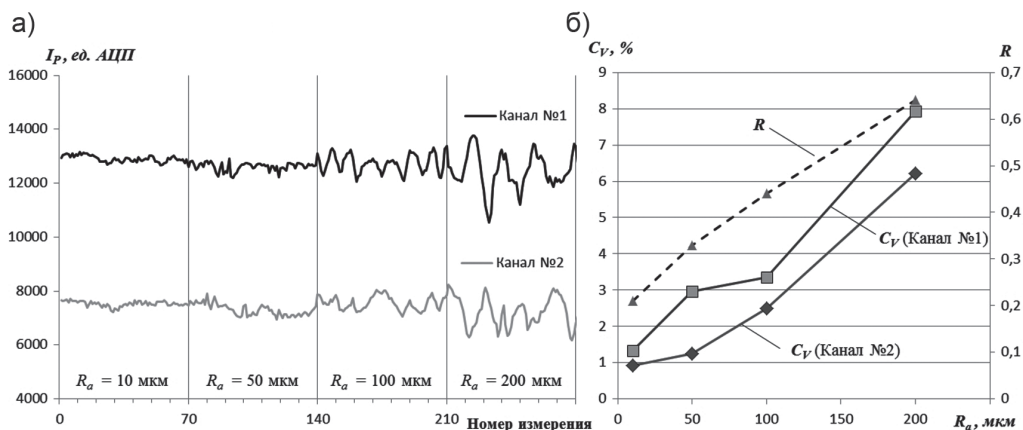


Рис. 2. Результаты оптического сканирования на примере образца группы «Д1» (а) и результаты расчета значений  $C_V$  и  $\rho$  (б)

Fig. 2. Optical scanning results of D1 group sample (a) and calculated  $C_V$  and  $\rho$  (b)

протекторов преобразователей пересчитывалось в давление  $P$ , измеряемое в атмосферах. В рамках исследований указанное давление изменялось в диапазоне от 0 до 2,5 атм с шагом 0,5 атм.

Результатом оптического сканирования каждого из образцов являлся профиль значений  $IP$ , состоящий из 4 отрезков, соответствующих разным уровням шероховатости поверхности. Пример профиля, полученного на образце группы «Д1», приведен на рис. 2, а.

### Анализ результатов экспериментов

Из рис. 1 видно, что амплитуда колебаний  $IP$  увеличивается с ростом  $R_a$ . Для оценки амплитуды колебаний использовался коэффициент вариации, рассчитываемый для выборки значений, соответствующих одному уровню шероховатости

$$C_V = \frac{\sigma}{\mu}, \quad (1)$$

где  $\sigma$  — стандартное отклонение,  $\mu$  — математическое ожидание.

Кроме оценки изменения амплитуды колебаний интерес также представляет анализ совместного изменения  $IP$ ,

зарегистрированных 1 и 2 каналами. Оценка степени такого изменения производилась на основе коэффициента корреляции [24]

$$\rho = \frac{B_{xy}(0)}{\sqrt{B_{xx}(0) \cdot B_{yy}(0)}}, \quad (2)$$

где  $B_{xy}(0)$  — значение взаимной корреляционной функции сигналов с 1 и 2 каналов при значении временного лага  $\tau = 0$ ,  $B_{xx}(0)$ ,  $B_{yy}(0)$  — значения автокорреляционных функций с 1 и 2 каналов соответственно при  $\tau = 0$ . Для компенсации расстояния между фотоприемниками при вычислении  $\rho$  вводилась задержка сигнала первого канала относительно второго, равная 10 отсчетам (расстояние между фоторезисторами равно 5 мм).

Вычисленные значения  $C_V$  и  $\rho$  представлены на рис. 2, б. Из рис. 2, б видно, что с увеличением степени шероховатости наблюдается практически линейный рост  $C_V$  на обоих каналах. Кроме того, значения  $\rho$  также демонстрируют линейное возрастание. Это связано с тем, что при малых значениях  $R_a$  изменения  $IP$  носят хаотичный характер, что отражается в виде низких значений  $\rho$ . С ростом  $R_a$  отдельные неровности проявляются

более отчетливо, заставляя IP изменяться волнообразно. При этом наблюдается рост корреляции сигналов, снятых вдоль одного профиля. Зависимости, приведенные на рис. 2, б характерны и для других пород, участвовавших в исследовании.

При обработке результатов УЗ измерений в качестве основных информативных параметров выступали энергия сигналов  $E$  и эффективная ширина спектра  $\Delta\omega_{эфф}$

$$E = \sum_{i=1}^n A_i^2 \quad (3)$$

$$\Delta\omega_{эфф} = \frac{1}{F_{\max}} \int_0^{\infty} F(\omega) d\omega \quad (4)$$

где  $A$  — амплитуда сигнала,  $F_{\max}$  — максимум спектра сигнала  $F(\omega)$ .

Пример определения  $E$  и  $\Delta\omega_{эфф}$  приведен на рис. 3, для удобства значения  $E$  нормированы по максимальному значению.

Из рис. 3 видно, что увеличение шероховатости поверхности горной породы приводит к снижению энергии УЗ сигналов, а также сужению спектра. Это, очевидно, связано с уменьшением общей площади контакта на границе «преобразователь-порода» и увеличением

воздушной прослойки. Увеличение давления прижима снижает потери энергии УЗ импульсов. Так, при низких значениях  $R_a$  рост давления прижима до  $P = 2,5$  атм приводит к двукратному повышению энергии, что может быть объяснено частичным разрушением вершин неровностей и увеличением площади контакта преобразователя с породой. Увеличение параметра  $R_a$  не только приводит к потерям энергии, но и снижает роль прижимного давления, величины которого оказывается недостаточно для «смятия» неровностей. Таким образом, влияние шероховатости на энергию УЗ импульсов можно до определенной степени нивелировать с помощью управления силой прижима преобразователей. Это позволит в будущем при проведении каротажных измерений использовать динамические информативные параметры, гораздо более чувствительные к сомкнутым трещинам, чем традиционно используемые скорости продольных волн. Изменение давления прижима преобразователей не оказывало существенного влияния на ширину спектра УЗ импульсов.

Определение цвета породы производилось на основе измерения интенсив-

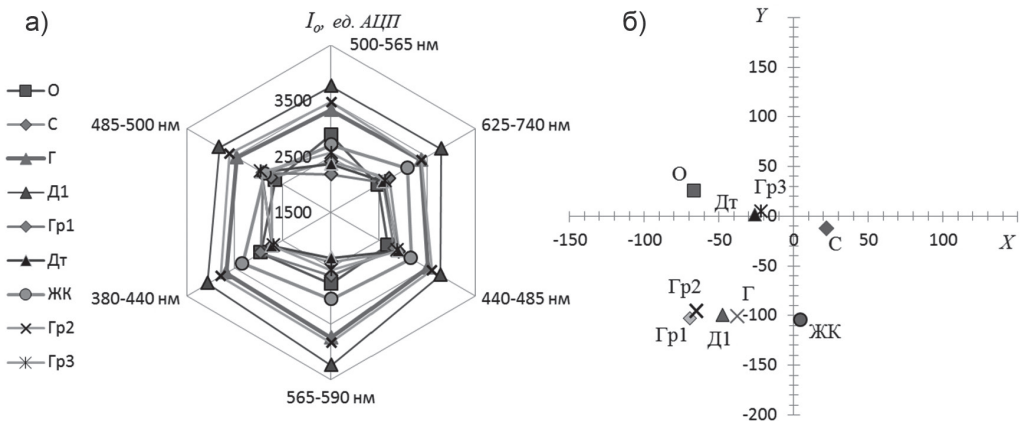


Рис. 3. Значения  $E$  (а) и  $\Delta\omega_{эфф}$  (б) для образца группы «Гр1»

Fig. 3. Values of  $E$  (a) and  $\Delta\omega_{эфф}$  (b) for Gr1 group sample



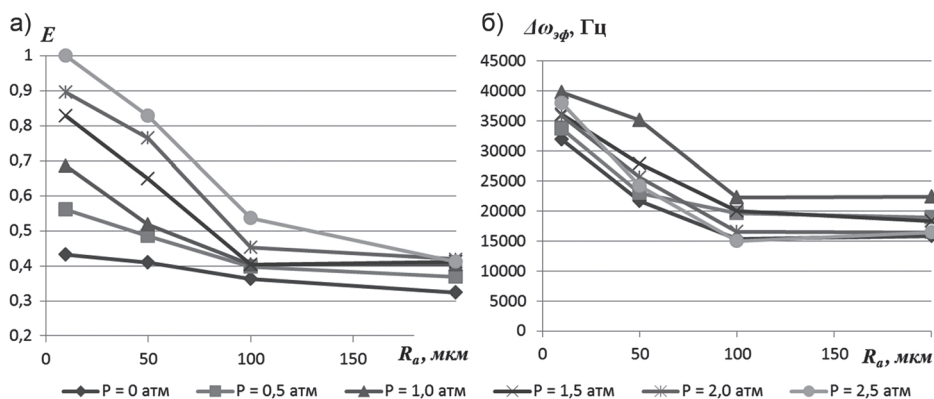


Рис. 4. Пример полученных полярных диаграмм распределения  $I_0$  (а) и результаты расчета барицентров для всех групп образцов (б)

Fig. 4. Illustration of resultant polar plots of  $I_0$  (a) and calculated barycenters for all groups of samples (b)

### Результаты экспериментов Experimental results

Группа	$C_v$				$R$				$E (P = 2,5 \text{ атм})$			
	$R_a, \text{ мкм}$				$R_a, \text{ мкм}$				$R_a, \text{ мкм}$			
	20	50	100	200	20	50	100	200	20	50	100	200
«О»	0,9	1,6	2,1	5,2	0,2	0,2	0,4	0,7	1	0,7	0,6	0,6
«С»	1,2	2,0	2,5	7,1	0,3	0,4	0,6	0,6	1	0,8	0,7	0,5
«Г»	1,1	1,8	2,2	6,4	0,4	0,4	0,6	0,8	1	0,9	0,7	0,7
«Д1»	0,9	1,8	2,5	6,2	0,2	0,3	0,4	0,6	1	0,8	0,5	0,4
«Гр1»	1,2	2,1	4,4	7,4	0,4	0,5	0,6	0,8	1	0,9	0,7	0,5
«Дт»	0,9	1,7	3,3	8,1	0,3	0,5	0,8	0,9	1	0,8	0,6	0,5
«ЖК»	1,3	2,4	5,5	7,2	0,4	0,5	0,6	0,7	1	0,9	0,8	0,7
«Гр2»	1,1	2,1	4,5	7,1	0,4	0,6	0,6	0,8	1	0,9	0,7	0,5
«Гр3»	1,2	2,2	4,6	7,2	0,4	0,5	0,5	0,7	1	0,8	0,7	0,6

Группа	$\Delta\omega_{эф}, \text{ кГц} (P = 2,5 \text{ атм})$				$X_6$	$Y_6$	$V_p, \text{ м/с}$
	$R_a, \text{ мкм}$						
	20	50	100	200			
«О»	35	31	27	22	-66,6	25,7	4195
«С»	38	32	28	20	21,9	-12,1	4420
«Г»	35	30	21	15	-37,8	-100,3	3840
«Д1»	38	24	15	16	-47,6	-99,1	2468
«Гр1»	40	32	26	20	-69,4	-102,6	4265
«Дт»	36	30	20	18	-25,9	1,6	5540
«ЖК»	36	27	20	14	4,4	-104,2	4115
«Гр2»	38	34	26	21	-65,2	-95,1	3465
«Гр3»	39	34	25	19	-22,0	4,9	4517

ности света  $I_0$ , отраженного от поверхности, последовательно освещаемой различными цветами:

красным,  $\lambda = 625 - 740$  нм;

зеленым,  $\lambda = 550 - 565$  нм;

синим,  $\lambda = 450 - 480$  нм;

голубым,  $\lambda = 480 - 510$  нм;

лиловым,  $\lambda = 380 - 440$  нм;

желтым,  $\lambda = 565 - 590$  нм.

Результат измерения  $I_0$  на различных длинах волн представлен на рис. 4, а в виде полярных диаграмм. Подобные полярные диаграммы представляют собой шестиугольники, каждый из которых характеризует цвет поверхности горной породы. Для удобства сравнения пород различных генотипов для каждой из полярных диаграмм были рассчитаны координаты центров масс (барицентров)  $X_6$  и  $Y_6$ . Результат расчетов приведен на рис. 4, б.

Из рис. 4, б видно, что с помощью оптического сканирования оказывается возможным разделить различных типов пород. Слабо разделяются породы «серых» оттенков (группы «Гр1»-«Гр2» и «Дт»-«Гр3»). Повысить различимость таких пород можно путем дополнительного учета площади полярной диаграммы (что эквивалентно оценке отражающей способности поверхности по отношению к белому свету).

Таблица содержит сводные результаты измерения параметров поверхности горных пород оптическими методами, а также результаты ультразвуковых исследований. В дополнение к энергетическим и спектральным параметрам УЗ колебаний приведены результаты опре-

деления скоростей продольных волн  $V_p$  в образцах.

Из таблицы видно, что в исследовании участвовали породы с близкими значениями  $V_p$  (группы «О», «Гр1», «ЖК»). При использовании для исследования строения приконтурного массива УЗ каротажа, литологическое расчленение было бы затруднено. С другой стороны, дополнительная информация о цвете пород (координаты барицентров указанных групп существенно различаются, см. рис. 4 и таблицу) позволяет однозначно разделять подобные породы.

### Заключение

Показано, что уровень шероховатости поверхности породы, который может быть определен оптически, существенно влияет на параметры сигналов при ультразвуковом прозвучивании пород.

Повышение шероховатости сужает спектр сигнала и снижает его энергию. Последнее до определенной степени оказалось возможным компенсировать за счет управления силой прижима преобразователя, что позволит в будущем обоснованно применять динамические информативные параметры контроля.

Кроме того, показана возможность атрибутирования типа породы на основе анализа интенсивности отраженного света на разных длинах волн. Это может повысить надежность ультразвуковых каротажных измерений в тех случаях, когда приконтурный массив сложен различными породами со схожими акустическими свойствами.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бакин В. А. Трещиноватость пород и влияние ее на устойчивость пород в горных выработках // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 537. — С. 21 — 30. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-11-37-21-30.

2. Дунаев А. В. Характер изменения трещиноватости пород ковдорского апатит-магнетитового месторождения с глубиной // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2010. — № 3. — С. 130 — 136.



3. *Сосновская Е. Л., Авдеев А. Н.* Прогноз устойчивости массива горных пород на основе анализа кернового материала разведочных скважин // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 3-1. — С. 216–223. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-208-215.

4. *Rasolofosaon P. N. J., Rabbel W., Siegesmund S., Vollbrecht A.* Characterization of crack distribution: Fabric analysis versus ultrasonic inversion // *Geophysical Journal International*. 2000, vol. 141, no. 2. pp. 413–424.

5. *Kobayashi R.* Studies on crack distribution and sonic velocity change in rocks // *Journal of the Japan Institute of Metals and Materials*. 1974, vol. 90, no. 1031, pp. 21–26.

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.

7. *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. DOI: 10.1142/S0218348X20500498.

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. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.106433.

9. *Taghizadeh S., Dwyer-Joyce R. S.* Linear and nonlinear normal interface stiffness in dry rough surface contact measured using longitudinal ultrasonic waves // *Applied Sciences (Switzerland)*. 2021, vol. 11, no. 12. DOI: 10.3390/app11125720.

10. *Tohmyoh H., Saka M.* Dry-contact technique for high-resolution ultrasonic imaging // *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 2003, vol. 50, no. 6, pp. 661–667.

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. DOI: 10.1155/2020/8881800.

12. *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.

13. *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.

14. *Шкуратник В. Л., Николенко П. В., Кормнов А. А.* Изменение корреляционных характеристик шумового акустического сигнала при прозвучивании горных пород в условиях одноосного механического нагружения // *Горный журнал*. — 2016. — № 6. — С. 60–63. DOI: 10.17580/gzh.2016.06.03.


15. *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 K55 well area, Kuqa Depression, Tarim Basin, China // *Arabian Journal of Geosciences*. 2021, vol. 14, no. 6, Art. 435.

16. *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.

17. *Winkler K. W., D'Angelo R.* Ultrasonic borehole velocity imaging // *Geophysics*. 2006, vol. 71, no. 3, pp. F25–F30.

18. *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.

19. *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.

20. Скворцов В. Ю., Скобелев А. В. Глубинная телевизионная видеосистема «аргоцифра» на каротажном кабеле // Каротажник. — 2012. — № 1 (211). — С. 110–116.
21. Sait I., Joerg M. Fracture connectivity from fracture intersections in borehole image logs // Computers & Geosciences. 2003, vol. 29, no. 2. pp. 143–153.
22. 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, article 77315.
23. 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.
24. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. — М.: Мир, 1974. — 403 с. 

## REFERENCES

1. Bakin V. A. Fracturing of rocks and its influence on the stability of rocks in mine workings. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. S37, pp. 21–30. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-11-37-21-30.
2. Dunaev A. V. The nature of the change in the fracturing of rocks of the Kovdor apatite-magnetite deposit with depth. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2010, no. 3, pp. 130–136. [In Russ].
3. Sosnovskaya E. L., Avdeev A. N. Forecast of the stability of the array of gold ore deposits based on the analysis of core material from exploration core drilling wells. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 3-1, pp. 216–223. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-208-215.
4. Rasolofosaon P. N. J., Rabbel W., Siegesmund S., Vollbrecht A. Characterization of crack distribution: Fabric analysis versus ultrasonic inversion. *Geophysical Journal International.* 2000, vol. 141, no. 2. pp. 413–424.
5. Kobayashi R. Studies on crack distribution and sonic velocity change in rocks. *Journal of the Japan Institute of Metals and Materials.* 1974, vol. 90, no. 1031, pp. 21–26.
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.
7. 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. DOI: 10.1142/S0218348X20500498.
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. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.106433.
9. Taghizadeh S., Dwyer-Joyce R. S. Linear and nonlinear normal interface stiffness in dry rough surface contact measured using longitudinal ultrasonic waves. *Applied Sciences (Switzerland).* 2021, vol. 11, no. 12. DOI: 10.3390/app11125720.
10. Tohmyoh H., Saka M. Dry-contact technique for high-resolution ultrasonic imaging. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control.* 2003, vol. 50, no. 6, pp. 661–667.
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. DOI: 10.1155/2020/8881800.
12. 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.

13. 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].

14. Shkuratnik V. L., Nikolenko P. V., Kormnov A. A. Estimation of ultrasonic correlation logging sensitivity in crack detection in excavation roof. *Gornyi Zhurnal.* 2016, no. 6, pp. 60–63. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2016.06.03.

15. 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 Bashijiqike Formation of KS5 well area, Kuqa Depression, Tarim Basin, China. *Arabian Journal of Geosciences.* 2021, vol. 14, no. 6, Art. 435.

16. 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.

17. Winkler K. W., D'Angelo R. Ultrasonic borehole velocity imaging. *Geophysics.* 2006, vol. 71, no. 3, pp. F25–F30.

18. 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].

19. 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, P. 151–159.

20. 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].

21. Sait I., Joerg M. Fracture connectivity from fracture intersections in borehole image logs. *Computers & Geosciences.* 2003, vol. 29, no. 2, pp. 143–153.

22. 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, article 77315.

23. 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.

24. Bendat Dzh., Pirsol A. *Izmerenie i analiz sluchaynykh protsessov* [Measurement and analysis of stochastic processes], Moscow, Mir, 1974, 403 p.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Николенко Петр Владимирович<sup>1</sup> — канд. техн. наук,

доцент, e-mail: p.nikolenko@misis.ru,

Зайцев Михаил Геннадьевич<sup>1</sup> — аспирант,

<sup>1</sup> НИТУ «МИСиС».

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

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

P.V. Nikolenko<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,

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

M.G. Zaitsev<sup>1</sup>, Graduate Student,

<sup>1</sup> National University of Science and Technology «MISIS»,

119049, Moscow, Russia.

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

Получена редакцией 16.11.2021; получена после рецензии 23.12.2021; принята к печати 10.02.2022.

Received by the editors 16.11.2021; received after the review 23.12.2021; accepted for printing 10.02.2022.