

НОВЫЙ МЕТОД ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗА ПАРАМЕТРОВ ТРЕЩИНОВАТОСТИ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД

П.В. Николенко¹, В.А. Винников¹, П.А. Гуляев¹

¹ НИТУ МИСИС, Москва, Россия, e-mail: p.nikolenko@misis.ru

Аннотация: Представлен метод экспресс-определения геометрических параметров трещиноватости горного массива, в частности угла падения (α) и азимута простирания (β) трещин. Знание этих параметров критично для задач инженерной геологии и горнодобывающей промышленности, поскольку ориентация трещин влияет на устойчивость выработок, миграцию флюидов, напряженно-деформированное состояние и эффективность разработки месторождений. В отличие от дорогостоящих оптических и ультразвуковых телевьюеров, предлагаемый метод основан на анализе изображений, полученных с недорогих серийных эндоскопов с боковыми камерами. Метод опирается на гипотезу плоской геометрии трещины, пересекающей скважину, при которой ее проекция на развертке стенки может быть описана гармонической функцией. На основе двух изображений противоположных стенок скважины определяются углы наклона касательных к линии трещины в произвольных точках. Далее, с применением тригонометрических преобразований вычисляются параметры гармонической функции и, в конечном итоге, геометрические характеристики трещины. Описана реализация метода в виде программного обеспечения Dip-Strike Imager, обеспечивающего автоматизированный расчет по введенным изображениям. Интерфейс программы позволяет пользователю вручную задать точки измерения и получить значения углов. Проведены испытания на физической модели скважины с заданной трещиной. Результаты подтвердили точность метода: погрешность определения угла падения составила $\pm 2^\circ$, азимута простирания – $\pm 3^\circ$. Также подробно рассмотрена методика тарировки зонда с применением объект-микрометра.

Ключевые слова: трещиноватость, контроль, оптический метод, экспресс-анализ, угол падения, азимут простирания, скважина, горная порода.

Для цитирования: Николенко П. В., Винников В. А., Гуляев П. А. Новый метод экспресс-анализа параметров трещиноватости массива горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 4. – С. 5–15. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_4_0_5.

A new method of rapid test of rock mass jointing parameters

P.V. Nikolenko¹, V.A. Vinnikov¹, P.A. Gulyaev¹

¹ NUST MISIS, Moscow, Russia, e-mail: p.nikolenko@misis.ru

Abstract: The article presents a rapid test method to determine geometrical parameters of jointing in rock masses, in particular, the angle (α) and azimuth (β) of joints. It is critical to know these parameters for solving problems in engineering geology and in mining as the orientation of joints can have an effect on mine roadway stability, fluid flows, stress-strain behavior of

rock mass and efficiency of mining. Unlike expensive optical and ultrasonic viewers, the proposed method is based on the analysis of images from inexpensive series-produced endoscopes equipped with side cameras. The method rests upon the hypothesis of planar geometry of a crack intersecting a hole, and the crack projection on the well wall development can be described by a harmonic function. Using two images of the opposite walls of the well, the slopes of the tangent lines to the line of the crack are determined at arbitrary points. Then, using trigonometric transformation, the parameters of the harmonic function are calculated and, finally, the geometrical characteristics of the crack are determined. The implementation of the method in Dip-Strike Imager, which allows automated calculation using the input images, is described. The software lets a user to set the measurement points manually and to obtain the values of the slopes. The method was tested on a physical model of a well with a preset crack. The results proved the method precision: the slope angle error was $\pm 2^\circ$ and the azimuth error was $\pm 3^\circ$. The article also gives details of the procedure of probe calibration using a stage micrometer.

Key words: jointing, control, optical method, rapid analysis, slope angle, azimuth, well, rock.

For citation: Nikolenko P. V., Vinnikov V. A., Gulyaev P. A. A new method of rapid test of rock mass jointing parameters. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(4):5-15. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_4_0_5.

Введение

Определение геометрических параметров трещиноватости горного массива — в первую очередь угла падения (dip angle) α и азимута простирания (strike angle) β отдельных трещин или их систем является важной задачей инженерной геологии и прикладной геофизики. Графическое представление указанных углов для плоской магистральной трещины, пересекающей измерительную скважину, приведена на рис. 1. Знание точной ориентации трещин позволяет решать широкий спектр задач, от оптимизации разработки месторождений до обеспечения безопасности горных работ и прогнозирования миграции подземных флюидов. При разведке и эксплуатации нефтегазовых и водных горизонтов ориентация трещин определяет пути миграции флюидов [1, 2]. Точное картирование трещин помогает оптимизировать расположение нагнетательных и добычных скважин, минимизировать нецелевые перетоки флюидов между пластами и регулировать обводненность продуктивных интервалов [3, 4]. В гор-

ном деле и тоннелестроении геометрия трещиноватого массива напрямую влияет на устойчивость выработок. Неправильная оценка угла падения системы трещин может привести к неправильному расчету параметров крепи, что повышает риск обрушений горных выработок [5–7]. Знание азимута простирания позволяет заранее определить возможные зоны обнажения или отрывов блоков горной породы при выемке и сформировать схемы зонального закрепления выработок [8–12]. Направление трещин также важно при оценке напряженно-деформированного состояния массива. Плоскости трещин часто являются местом концентрации напряжений [13–17].

Также следует отметить, что современные геофизические методы исследования, в частности микросейсмические и акустические методы, все больше полагаются на точные данные о геометрии трещин для калибровки моделей распространения волн и сейсмических откликов [18–20].

На сегодняшний день наиболее точную оценку геометрии трещин получают

по результатам каротажа с применением оптических [21 – 23] или ультразвуковых телевьюеров [24, 25]. Подобное оборудование позволяет получать высококачественные развертки стенок скважин даже в условиях заполнения их жидкостью. Однако такое оборудование отличается высокой стоимостью и большими габаритами и редко приспособлено для проведения измерений в восстающих скважинах. С другой стороны, на рудниках и шахтах актуальной является задача обеспечения экспресс-контроля пространственных параметров систем трещин. Подобный контроль можно осуществить силами геотехнических или маркшейдерских подразделений с применением относительно недорогого серийно выпускаемого оборудования.

Методы

В настоящей статье рассматривается метод определения углов α и β , основанный на анализе изображений стенки скважины, которые можно получить недорогоми серийно выпускаемыми эндоскопами. Для реализации предлагаемых

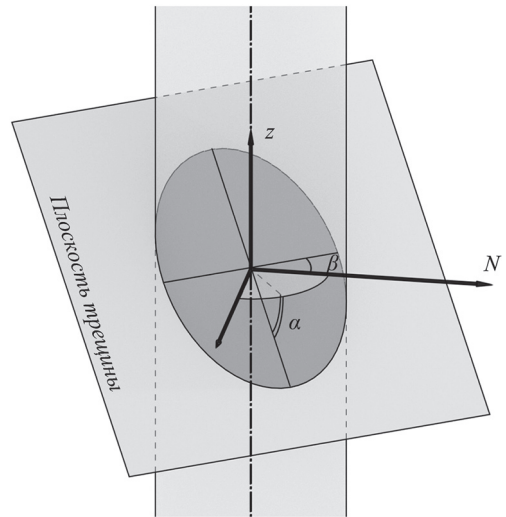


Рис. 1. Графическое представление угла падения α и азимута простираия β трещины, пересекающей измерительную скважину (N – направление на север)

Fig. 1. Graphical representation of the dip angle (α) and strike azimuth (β) of a fracture intersecting a borehole (N indicates True North)

подходов необходимо получить изображения противоположных стенок скважины в местах их пересечения магистральной трещиной, как это показано

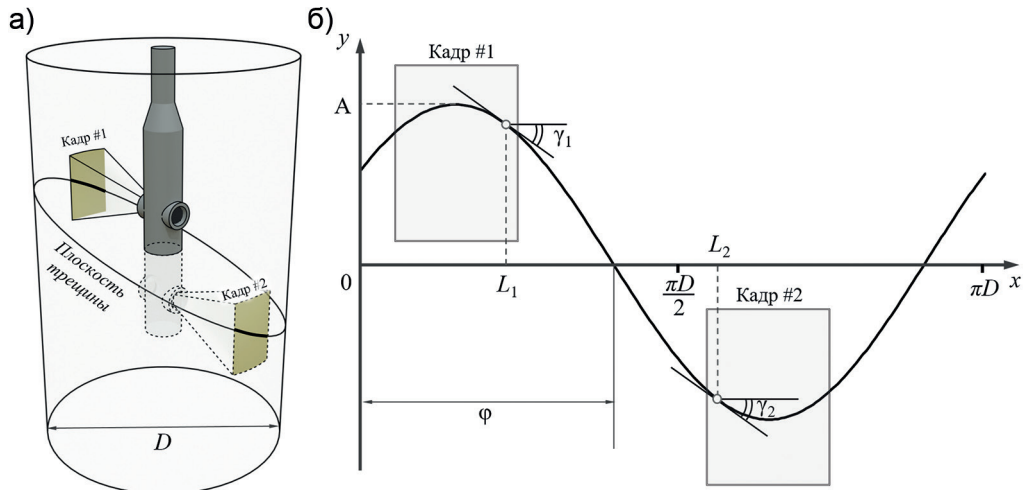


Рис. 2. Схема получения изображений стенок скважины эндоскопом (а) и развертка внутренней поверхности скважины (б)

Fig. 2. Scheme for obtaining borehole wall images with an endoscope (a) and unwrapping of the borehole's internal surface (b)

на рис. 2, а. При этом точная координата эндоскопа вдоль оси скважины не имеет принципиального значения. Определение углов α и β основывается на допущении, что магистральная трещина, пересекающая измерительную скважину, является плоской. Тогда на развертке стенки скважины линия трещины может быть представлена в виде гармонической функции со случайной фазой и амплитудой, а также периодом, равным πD , где D – диаметр скважины. Схема развертки скважины представлена на рис. 2, б.

Кадры с камер эндоскопа представляют собой области Кадр #1 и Кадр #2, расположенные на развертке. Их вертикальное и горизонтальное положение является произвольным, так как глубина эндоскопа в скважине точно не отслеживается, а азимут трещины заранее не известен. Однако известно, что расстояние между центрами этих областей по горизонтали всегда равно $\pi D/2$ (камеры расположены на одной оси), а внутри области возможно измерить углы γ_1 и γ_2 наклона касательных к линии трещины в произвольных точках L_1 и L_2 , расстояние между которыми $L = L_2 - L_1$.

Введем гармоническую функцию общего вида:

$$y(x) = A \sin(\omega x + \varphi), \quad (1)$$

где A – амплитуда; ω – круговая частота; φ – фаза.

Период T и частота этой функции равны

$$T = \pi D, \quad (2)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2}{D}. \quad (3)$$

Угол наклона γ касательной к гармонической функции можно рассматривать как производную в этой точке:

$$tg(\gamma) = y'(x). \quad (4)$$

Тогда

$$y'(x) = A\omega \cos(\omega x + \varphi). \quad (5)$$

Введем вспомогательные величины θ_1 и θ_2 :

$$\theta_1 = \omega L_1 + \varphi, \quad \theta_2 = \omega L_2 + \varphi. \quad (6)$$

В точках L_1 и L_2 выражение (4) принимает вид

$$A\omega \cos(\theta_1) = tg(\gamma_1), \quad (7)$$

$$A\omega \cos(\theta_2) = tg(\gamma_2). \quad (8)$$

Разделим (8) на (7), тогда

$$\frac{\cos(\theta_2)}{\cos(\theta_1)} = \frac{tg(\gamma_2)}{tg(\gamma_1)}. \quad (9)$$

Так как $L_2 = L_1 + L$, то

$$\theta_2 = \theta_1 + \omega L. \quad (10)$$

Введем $\delta = \omega L = 2L/D$ тогда, с учетом известной формулы, для косинуса суммы получим

$$\begin{aligned} \cos(\theta_2) &= \cos(\theta_1 + \delta) = \\ &= \cos(\theta_1)\cos(\delta) - \sin(\theta_1)\sin(\delta) \end{aligned} \quad (11)$$

Подставим (11) в (9):

$$\begin{aligned} \frac{\cos(\theta_1)\cos(\delta) - \sin(\theta_1)\sin(\delta)}{\cos(\theta_1)} &= \\ &= \frac{tg(\gamma_2)}{tg(\gamma_1)} \end{aligned} \quad (12)$$

Упростим, разделив числитель и знаменатель на $\cos(\theta_1)$:

$$\cos(\delta) - tg(\theta_1)\sin(\delta) = \frac{tg(\gamma_2)}{tg(\gamma_1)}. \quad (13)$$

Отсюда найдем $tg(\theta_1)$:

$$tg(\theta) = \frac{\cos(\delta) - \frac{tg(\gamma_2)}{tg(\gamma_1)}}{\sin(\delta)} \quad (14)$$

Таким образом, величину θ_1 можно найти из выражения

$$\theta_1 = \arctg \left(\frac{\cos(\delta) - \frac{tg(\gamma_2)}{tg(\gamma_1)}}{\sin(\delta)} \right) + k\pi \quad (15)$$

где слагаемое $k\pi$ зависит от физического контекста задачи. В данном случае слагаемое $k\pi$ можно приравнять к 0 исходя из ограничения длины развертки (рис. 2, б), которая не может быть больше πD .

Найдем выражение для φ с учетом ранее введенного соотношения (6):

$$\begin{aligned} \varphi &= \theta_1 - \omega L_1 = \\ &= \arctg \left(\frac{\cos(\delta) - \frac{tg(\gamma_2)}{tg(\gamma_1)}}{\sin(\delta)} \right) - \frac{2L_1}{D} \quad (16) \end{aligned}$$

Из уравнения (7) определим A :

$$A = \frac{tg(\gamma_1)}{\omega \cos(\theta_1)} = \frac{D}{2} \cdot \frac{tg(\gamma_1)}{\cos(\theta_1)}. \quad (17)$$

Для получения значения A при выборе точек L_1 и L_2 должно соблюдаться условие $L \neq \pi D/2$. Также, исходя из физических предпосылок задачи, следует учесть, что значения A всегда должны быть положительными, а значения φ должны изменяться в диапазоне от 0 до 360° . Для этого при вычислениях по формулам (16) и (17) следует вводить следующие поправки:

$$\begin{cases} \text{если } A < 0, \text{ то } A = |A|, \varphi = \varphi + \pi; \\ \text{если } \varphi < 0, \text{ то } \varphi = \varphi + 2\pi. \end{cases} \quad (18)$$

Угол падения α и азимут простираения β трещины можно определить из вычисленных значений A и φ , используя выражения

$$\alpha = \frac{180 \cdot \arctg \frac{2A}{D}}{\pi}; \quad (19)$$

$$\beta = \frac{180 \cdot \varphi}{\pi} - 90. \quad (20)$$

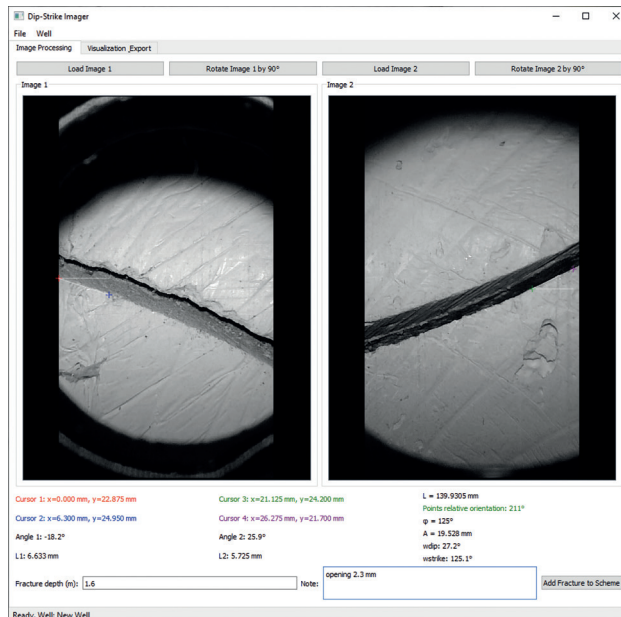


Рис. 3. Рабочее окно программы Dip-Strike Imager
Fig. 3. The main window of the Dip-Strike Imager software

В случае, если точкой отсчета азимутального угла (направлением на север) является оптическая ось первой камеры, для точного расчета β должно быть введено поправочное слагаемое, учитывающее абсолютную ширину кадра:

$$\beta = \frac{180 \cdot \varphi}{\pi} - 90 + \frac{180 \cdot N_{px}}{k_{px} \pi D}, \quad (21)$$

где N_{px} — горизонтальный размер изображения с камеры в пикселях, k_{px} — переводной коэффициент, пикс/мм.

Представленный выше принцип обработки изображений реализован в разработанном авторами программном обеспечении Dip-Strike Imager [26]. На рис. 3 представлено рабочее окно программы. Принцип работы программы следующий. В качестве исходных данных требуется ввести переводной коэффициент k_{px} , а также параметры скважины: глубину, диаметр и углы ее наклона. Также требуется загрузить два изображения стенок скважины, полученные с противо-

положных боковых камер эндоскопа. При необходимости можно изменить ориентацию изображений с шагом 90° . На следующем этапе необходимо выставить пары курсоров вдоль одного из берегов трещин на обоих изображениях. При этом следует размещать пары курсоров в противоположных частях изображений. Если между точками измерений будет величина, близкая к 180° (соответствует случаю $L = \pi D/2$), параметр points relative orientation будет подсвечен красным; производить измерения при такой конфигурации курсоров нельзя. После правильного расположения курсоров в правой части интерфейса будут выведены результаты расчета угла падения (w_{dip}) и азимута простирания (w_{strike}), рассчитанные в системе координат скважины. В качестве дополнения можно использовать параметры L_1 и L_2 (расстояния по прямой между соответствующими парами курсоров) для оценки раскрытия трещины, для чего

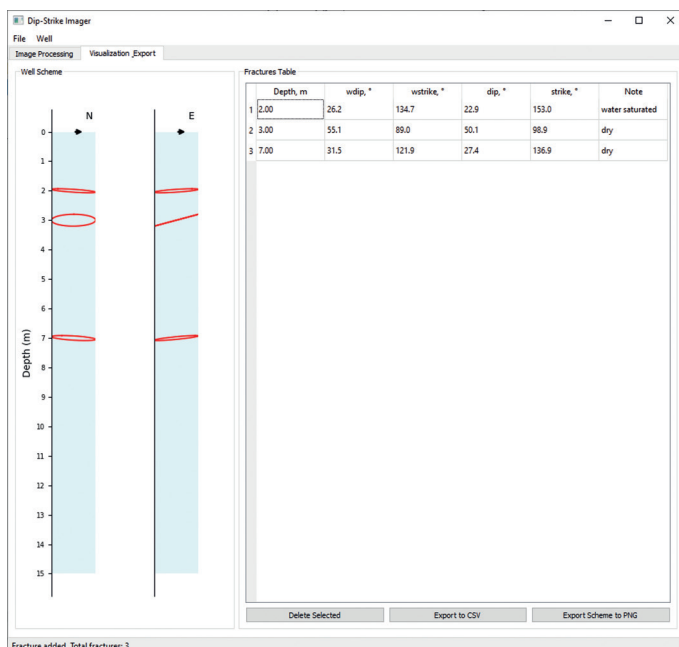


Рис. 4. Журнал скважины

Fig. 4. Borehole log

нужно выставить курсоры на верхнем и нижнем берегах трещины.

Результатом работы программы является журнал скважины, содержащий значения глубин и углов отдельных трещин в локальной (относительно скважины) и глобальной системах координат, а также визуализация трещин в виде двух проекций. Пример журнала приведен на рис. 4. При необходимости журнал можно экспортировать для дальнейшей обработки в другие программные пакеты.

Работоспособность программы была подтверждена измерениями на модели скважины, представляющей собой цилиндр из песчано-цементной смеси, пересеченной трещиной с изменяемым раскрытием.

Угол наклона трещины составлял 28° , диаметр скважины — 76 мм. В качестве скважинного зонда выступал серийно выпускаемый эндоскоп ZCF 4.3", позволяющий получать изображения с боковых камер с разрешением 1920×1080 пикселей. Для центровки камеры эндоскопа использовалось специальное приспособление, изготовленное с применением технологии 3D-печати из высокопрочного пластика PET-G. Общий вид модели скважины и использованного эндоскопа приведен на рис. 5.

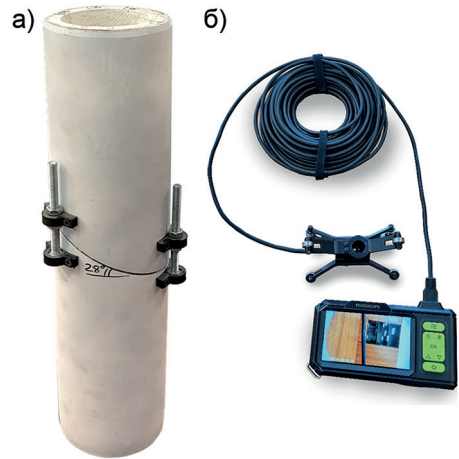


Рис. 5. Физическая модель скважины (а) и использованный для съемки эндоскоп с центрирующим устройством (б)

Fig. 5. Physical borehole model (a) and the endoscope with its centering device used for imaging (b)

Результаты и обсуждение

Результаты измерений на физической модели подтверждают работоспособность предложенного метода экспресс-анализа параметров трещин и разработанного для его реализации программно-аппаратного обеспечения. Абсолютная погрешность определения угла падения составила $\pm 2^\circ$, азимута простираения — $\pm 3^\circ$.

Определение значения переводного коэффициента k_{px} производилось на ос-

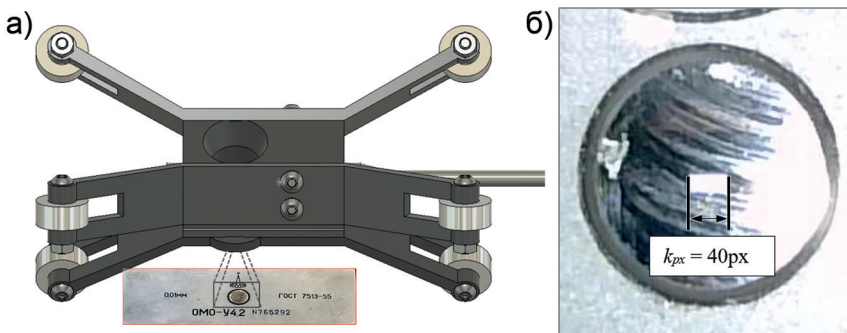


Рис. 6. Процессы калибровки видеозонда (а) и получения значения коэффициента k_{px} из изображения объект-микронметра (б)

Fig. 6. The video probe calibration process (a) and obtaining the k_{px} coefficient value from the image of the object-stage micrometer (b)

нове прямой тарировки по схеме, приведенной на рис. 6. Напротив боковой камеры располагался объект-микрометр ОМО-У4.2 (в соответствии с ГОСТ 7513-55. Объект-микрометры) с нанесенной на нем шкалой общей длиной 1 мм. На полученном изображении с помощью графических редакторов подсчитывалось количество пикселей, укладывающихся в 1 мм (рис. 6, б). Для повышения надежности определения k_{px} описанная операция повторялась 5 раз для различных положений объект-микрометра. Измеренные значения усреднялись и округлялись до ближайшего целого значения.

Заключение

Предложенный метод экспресс-контроля геометрии трещин на основе анализа эндоскопических изображений

подтвердил свою работоспособность в рамках лабораторных испытаний: погрешность определения угла падения не превышала $\pm 2^\circ$, азимута простираения — $\pm 3^\circ$. Использование серийного эндоскопа и разработанного авторами ПО Dip-Strike Imager обеспечивает оперативность и низкую стоимость измерений без серьезной потери точности, что важно для полевых условий. Предложенный способ и программное обеспечение могут быть рекомендованы геотехническим и маркшейдерским службам, участвующим в организации натурных измерений строения и состояния массива пород вблизи горных выработок.

Дальнейшее развитие метода планируется в направлении автоматизации учета отклонений формы трещины от идеальной плоскости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhang Y., Zeng L., Luo Q., Zhu R., Lyu W., Liu D., Dai Q., Pan S. Influence of natural fractures on tight oil migration and production: A case study of permian lucaogou formation in Jimsar Sag, Junggar Basin, NW China // Journal of Earth Science. 2021, vol. 32, no. 4, pp. 927 – 945. DOI: 10.1007/s12583-021-1442-y.
2. Fatehimarji M., Pashapour A. The effect of fracture orientation and coupled stress-fluid flow on permeability and productivity index of naturally fractured hydrocarbon reservoirs / 45th U.S. Rock Mechanics. Geomechanics Symposium. 2011.
3. Soomro N. A. Development of an improved numerical model for fracture propagation in hydraulic fracturing of low-permeability formations using FracproPT Software // Unconventional Resources. 2025, article 100193. DOI: 10.1016/j.unres.2025.100193.
4. Ren G., Ma X., Zhang S., Zou Y., Duan G., Xiong Q. Optimization of water injection strategy before re-stimulation considering fractures propagation // Processes. 2022, vol. 10, no. 8, article 1538. DOI: 10.3390/pr10081538.
5. Xie P., Huang B., Wu Y., Luo S., Jiao J., Tian C., Chen J. Stability analysis of rock fracture and support performance in steeply dipping ore deposits with massive mining stopes // Geomatics, Natural Hazards and Risk. 2023, vol. 14, no. 1. DOI: 10.1080/19475705.2023.2250529.
6. Wang K., Wang L., Ren B. Failure mechanism analysis and support technology for roadway tunnel in fault fracture zone: A case study // Energies. 2021, vol. 14, no. 13, article 3767. DOI: 10.3390/en14133767.
7. Dai Z., Yang L., Zhang X. On asymmetric failure characteristics of tunnels and surrounding rock control techniques under close-distance repeated coal mining // Advances in Civil Engineering. 2024, vol. 2024, no. 1. DOI: 10.1155/2024/8388259.
8. Hatzor Y., Feng X.-T., Li S., Yagoda-Biran G., Jiang Q., Hu L. Tunnel reinforcement in columnar jointed basalts: The role of rock mass anisotropy // Tunnelling and Underground Space Technology. 2015, vol. 46, pp. 1 – 11. DOI: 10.1016/j.tust.2014.10.008.
9. Barton N., Lien R., Lunde J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support // Rock Mechanics Felsmechanik Mecanique des Roches. 1974, vol. 6, no. 4, pp. 189 – 236. DOI: 10.1007/BF01239496/METRICS.

10. Palmstrom A., Broch E. Use and misuse of rock mass classification systems with particular reference to the Q-system // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2006, vol. 21, no. 6, pp. 575–593. DOI: 10.1016/j.tust.2005.10.005.
11. Жирнов А. А., Абдрахманов С. У., Шапошник Ю. Н., Конуринов А. И. Оценка устойчивости массива горных пород и выбор типа и параметров крепления выработок на Орловском полиметаллическом месторождении // *Горный журнал*. – 2018. – № 3. – С. 51–57. DOI: 10.17580/gzh.2018.03.08.
12. Еременко В. А., Айнбиндер И. И., Марысюк В. П., Наговицин Ю. Н. Разработка инструкции по выбору типа и параметров крепи выработок рудников Талнаха на основе количественной оценки состояния массива горных пород // *Горный журнал*. – 2018. – № 10. – С. 101–106.
13. Криницын Р. В. Напряженно-деформированное состояние массива горных пород при отработке месторождений Урала // *Горная промышленность*. – 2022. – № 5. – С. 79–82. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-5-79-82.
14. Токсаров В. Н., Асанов В. А., Бельтюков Н. Л., Ударцев А. А. Напряженное состояние и трещиноватость массива горных пород Сарбайского карьера // *Проблемы недропользования*. – 2018. – № 3(18). DOI: 10.25635/2313-1586.2018.03.054.
15. Lavoine E., Davy P., Darcel C., Mas Ivars D., Kasani H. A. Assessing stress variability in fractured rock masses with frictional properties and power law fracture size distributions // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2024, vol. 57, no. 4, pp. 2407–2420. DOI: 10.1007/s00603-023-03683-8.
16. Wu F., Deng Y., Wu J., Li B., Sha P., Guan S., Zhang K., He K., Liu H., Qiu S. Stress-strain relationship in elastic stage of fractured rock mass // *Engineering Geology*. 2020, vol. 268, article 105498. DOI: 10.1016/j.enggeo.2020.105498.
17. Cai Y., Wu J., Liu Y., Gao S. Advances in seismological methods for characterizing fault zone structure // *Earthquake Science*. 2024, vol. 37, no. 2, pp. 122–138. DOI: 10.1016/j.eqs.2024.01.019.
18. Vlastos S., Liu E., Main I.G., Schoenberg M., Narteau C., Li X. Y., Maillot B. Dual simulations of fluid flow and seismic wave propagation in a fractured network: effects of pore pressure on seismic signature // *Geophysical Journal International*. 2006, vol. 166, no. 2, pp. 825–838. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2006.03060.x.
19. Schoenberg M., Douma J. Elastic wave propagation in media with parallel fractures and aligned cracks // *Geophysical Prospecting*. 1988, vol. 36, no. 6, pp. 571–590. DOI: 10.1111/j.1365-2478.1988.tb02181.x.
20. Яскевич С. В., Гречка В. Ю., Дучков А. А. Обработка данных микросейсмического мониторинга геодинамических событий с учетом сейсмической анизотропии массива горных пород // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2014. – № 6. – С. 41–52.
21. Prenskey S. E. Advances in borehole imaging technology and applications // *Geological Society of London, Spec. Publ.* 1999, vol. 159, no. 1, pp. 1–43. DOI: 10.1144/GSL.SP.1999.159.01.01.
22. Гупало В. С., Печатников В. А., Шрамко И. В., Николенко П. В., Чумаков А. А., Неуважаев Г. Д. Отработка методов и оборудования, планируемых к применению в ходе выполнения исследований при проходке выработок подземной исследовательской лаборатории // *Радиоактивные отходы*. – 2025. – № 1 (30). – С. 88–97. DOI: 10.25283/2587-9707-2025-1-88-97.
23. 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.
24. Morin R. H., Descamps G. E., DeWayne Cecil L. Acoustic televiewer logging in glacier boreholes // *Journal of Glaciology*. 2000, vol. 46, no. 155, pp. 695–699. DOI: 10.3189/172756500781832684.
25. Williams J. H., Johnson C. D. Borehole-wall imaging with acoustic and optical televiwers for fractured-bedrock aquifer investigations. 2000.
26. Николенко П. В., Винников В. А., Гуляев П. А. DIP-STRIKE IMAGER: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 202566593. Заявка № 2025663745; зарег. 04.06.2025; опубл. 20.06.2025. **ПАТБ**

REFERENCES

1. Zhang Y., Zeng L., Luo Q., Zhu R., Lyu W., Liu D., Dai Q., Pan S. Influence of natural fractures on tight oil migration and production: A case study of permian lucaogou formation in Jimsar Sag, Jun-

ggar Basin, NW China. *Journal of Earth Science*. 2021, vol. 32, no. 4, pp. 927 – 945. DOI: 10.1007/s12583-021-1442-y.

2. Fatehimarji M., Pashapour A. The effect of fracture orientation and coupled stress-fluid flow on permeability and productivity index of naturally fractured hydrocarbon reservoirs. *45th U.S. Rock Mechanics. Geomechanics Symposium*. 2011.

3. Soomro N. A. Development of an improved numerical model for fracture propagation in hydraulic fracturing of low-permeability formations using FracproPT Software. *Unconventional Resources*. 2025, article 100193. DOI: 10.1016/j.unres.2025.100193.

4. Ren G., Ma X., Zhang S., Zou Y., Duan G., Xiong Q. Optimization of water injection strategy before re-stimulation considering fractures propagation. *Processes*. 2022, vol. 10, no. 8, article 1538. DOI: 10.3390/pr10081538.

5. Xie P., Huang B., Wu Y., Luo S., Jiao J., Tian C., Chen J. Stability analysis of rock fracture and support performance in steeply dipping ore deposits with massive mining stopes. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 2023, vol. 14, no. 1. DOI: 10.1080/19475705.2023.2250529.

6. Wang K., Wang L., Ren B. Failure mechanism analysis and support technology for roadway tunnel in fault fracture zone: A case study. *Energies*. 2021, vol. 14, no. 13, article 3767. DOI: 10.3390/en14133767.

7. Dai Z., Yang L., Zhang X. On asymmetric failure characteristics of tunnels and surrounding rock control techniques under close-distance repeated coal mining. *Advances in Civil Engineering*. 2024, vol. 2024, no. 1. DOI: 10.1155/2024/8388259.

8. Hatzor Y., Feng X.-T., Li S., Yagoda-Biran G., Jiang Q., Hu L. Tunnel reinforcement in columnar jointed basalts: The role of rock mass anisotropy. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2015, vol. 46, pp. 1 – 11. DOI: 10.1016/j.tust.2014.10.008.

9. Barton N., Lien R., Lunde J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics Felsmechanik Mecanique des Roches*. 1974, vol. 6, no. 4, pp. 189 – 236. DOI: 10.1007/BF01239496/METRICS.

10. Palmstrom A., Broch E. Use and misuse of rock mass classification systems with particular reference to the Q-system. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2006, vol. 21, no. 6, pp. 575 – 593. DOI: 10.1016/j.tust.2005.10.005.

11. Zhirnov A. A., Abdrakhmanov S. U., Shaposhnik Y. N., Konurin A. I. Rock mass stability estimation and selection of mine support design at Orlov complex ore deposit. *Gornyi Zhurnal*. 2018, no. 3, pp. 51 – 57. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2018.03.08.

12. Eremenko V. A., Ainbinder I. I., Marysyuk V. P., Nagovitsyn Y. N. Guidelines for selecting ground support system for the Talnakh operations based on the rock mass quality assessment. *Gornyi Zhurnal*. 2018, no. 10, pp. 101 – 106. [In Russ].

13. Krinitsyn R. V. Stress-and-strain state of the rock mass in mining deposits in the Urals. *Russian Mining Industry Journal*. 2022, no. 5, pp. 79 – 82. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-5-79-82.

14. Toksarov V. N., Asanov V. A., Beltyukov N. L., Udartsev A. A. Stress state and fracturing of the rock mass at the Sarbaysky quarry. *Problems of Subsoil Use*. 2018, no. 3(18). [In Russ]. DOI: 10.25635/2313-1586.2018.03.054.

15. Lavoine E., Davy P., Darcel C., Mas Ivars D., Kasani H. A. Assessing stress variability in fractured rock masses with frictional properties and power law fracture size distributions. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2024, vol. 57, no. 4, pp. 2407 – 2420. DOI: 10.1007/s00603-023-03683-8.

16. Wu F., Deng Y., Wu J., Li B., Sha P., Guan S., Zhang K., He K., Liu H., Qiu S. Stress-strain relationship in elastic stage of fractured rock mass. *Engineering Geology*. 2020, vol. 268, article 105498. DOI: 10.1016/j.enggeo.2020.105498.

17. Cai Y., Wu J., Liu Y., Gao S. Advances in seismological methods for characterizing fault zone structure. *Earthquake Science*. 2024, vol. 37, no. 2, pp. 122 – 138. DOI: 10.1016/j.eqs.2024.01.019.

18. Vlastos S., Liu E., Main I.G., Schoenberg M., Narteau C., Li X. Y., Maillot B. Dual simulations of fluid flow and seismic wave propagation in a fractured network: effects of pore pressure on seismic signature. *Geophysical Journal International*. 2006, vol. 166, no. 2, pp. 825 – 838. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2006.03060.x.

19. Schoenberg M., Douma J. Elastic wave propagation in media with parallel fractures and aligned cracks. *Geophysical Prospecting*. 1988, vol. 36, no. 6, pp. 571 – 590. DOI: 10.1111/j.1365-2478.1988.tb02181.x.

20. Yaskevich S. V., Grechka V. Yu., Duchkov A. A. Processing of microseismic monitoring data of geodynamic events taking into account seismic anisotropy of rock mass. *Journal of Mining Sciences*. 2014, no. 6, pp. 41 – 52. [In Russ].

21. Presnky S. E. Advances in borehole imaging technology and applications. *Geological Society of London, Spec. Publ.* 1999, vol. 159, no. 1, pp. 1 – 43. DOI: 10.1144/GSL.SP.1999.159.01.01.

22. Gupalo V. S., Pechatnikov V. A., Shramko I. V., Nikolenko P. V., Chumakov A. A., Neuvazhaev G. D. Refining the methods and equipment proposed for the research during the excavation of the underground research laboratory. *Radioactive waste*. 2025, no. 1 (30), pp. 88 – 97. [In Russ]. DOI: 10.25283/2587-9707-2025-1-88-97.

23. Nikolenko P. V., Zaitsev M. G. Integrated acoustic and optical logging in adjacent rock mass. Equipment and physical modeling. *МИАВ. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 1, pp. 95 – 106. [In Russ]. DOI: 10/25018/0236_1493_2023_1_0_95.

24. Morin R. H., Descamps G. E., DeWayne Cecil L. Acoustic televiewer logging in glacier boreholes. *Journal of Glaciology*. 2000, vol. 46, no. 155, pp. 695 – 699. DOI: 10.3189/172756500781832684.

25. Williams J. H., Johnson C. D. *Borehole-wall imaging with acoustic and optical televewers for fractured-bedrock aquifer investigations*. 2000.

26. Nikolenko P. V., Vinnikov V. A., Gulyaev P. A. *DIP-STRIKE IMAGER: certificate of state registration of computer program RU 2025665937*. 20.06.2025. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Николенко Петр Владимирович¹ — д-р техн. наук,
e-mail: p.nikolenko@misis.ru,

ORCID ID: 0000-0002-5126-6576,

Винников Владимир Александрович¹ — д-р физ.-мат. наук,

e-mail: vinnikovva@misis.ru,

ORCID ID: 0000-0002-3011-053X,

Гуляев Павел Александрович¹ — аспирант,

e-mail: pavelgulyaev722@gmail.com,

¹ НИТУ МИСИС.

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

P.V. Nikolenko¹, Dr. Sci. (Eng.),

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

ORCID ID: 0000-0002-5126-6576,

V.A. Vinnikov¹, Dr. Sci. (Phys. Mathem.),

e-mail: vinnikovva@misis.ru,

ORCID ID: 0000-0002-3011-053X,

P.A. Gulyaev¹, Graduate Student,

e-mail: pavelgulyaev722@gmail.com,

¹ NUST MISIS, 119049, Moscow, Russia.

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

Получена редакцией 21.11.2025; получена после рецензии 23.12.2025; принята к печати 10.03.2026.

Received by the editors 21.11.2025; received after the review 23.12.2025; accepted for printing 10.03.2026.

