



**ТЕХНОЛОГИЯ И ТЕХНИКА МОНИТОРИНГА
ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД В ПРОЦЕССЕ БУРЕНИЯ**

В. В. Нескоромных, А. Е. Головченко, Д. Р. Вяльшин

*Институт горного дела, геологии и геотехнологий, Сибирский федеральный университет,
E-mail: agolovchenko@sfu-kras.ru, пр. им. газеты “Красноярский рабочий” 95, г. Красноярск, Россия*

Рассмотрены вопросы осуществления мониторинга физико-механических свойств горных пород в процессе бурения как части проекта “Умный рудник” для построения системы рационального рудопотока. Представлены теоретические основы определения изменчивости физико-механических свойств горной породы в процессе бурения, главным образом, упругости, как параметра, характеризующего упругую реакцию горной породы на разрушение. Приведена принципиальная конструкция системы для реализации механизма с фиксацией изменчивости упругой реакции горных пород на разрушение по упругой деформации бурильной колонны и визуализации получаемых данных в режиме реального времени.

Бурение, горная порода, физико-механические свойства, разрушение горных пород, “Умный рудник”

**TECHNOLOGY AND EQUIPMENT FOR MONITORING PHYSICO-
MECHANICAL ROCK PROPERTIES DURING DRILLING**

V. V. Neskromnykh, A. E. Golovchenko, and D. R. Vyal'shin

*Institute of Mining, Geology and Geotechnology, Siberian Federal University,
E-mail: agolovchenko@sfu-kras.ru, pr. Krasnoyarsky rabochiy 95, Krasnoyarsk 660025, Russia*

The problems of monitoring physico-mechanical rock properties during drilling as part of the Smart Mine project to build a rational ore flow system are considered. The theoretical foundations of determining the variability of rock physico-mechanical properties during drilling, mainly elasticity, are presented as a parameter characterizing the elastic response of rock to failure. The basic design of the system for implementing the above mechanism with fixing the variability of the elastic reaction of rocks to failure by elastic strain of the drill string and visualization of the obtained data in real time is given.

Drilling, rock, physico-mechanical properties, rock failure, Smart Mine

Запасы железных руд в России – наибольшие в мире, но при этом среди них выделяется менее 10% богатых с относительным содержанием железа порядка 60%, тогда как в не столь сырьевых странах — Китае и Бразилии — данный показатель составляет порядка 70%. Не менее остро на сегодняшний день стоит проблема высокой степени отработки месторождений различных полезных ископаемых. По запасам медного сырья Россия занимает третье место в мире, но большинство из эксплуатируемых и эксплуатируемых месторождений меди уже либо выработаны, либо близки к этому [1–4].

Принимая во внимание обозначенный круг проблем, а также общемировую тенденцию к цифровизации и автоматизации процессов, в том числе в горнодобывающей отрасли, важным фактором является рациональная схема отработки месторождений на основе определения содержания в забое полезного компонента и вмещающих пород с применением автоматизированных систем и технологий. Это позволяет приблизиться к концепции “Умного рудника”, предполагающей передачу большей части управленческих решений от человека к искусственному интеллекту на базе получаемой в режиме реального времени информации о протекании процесса и

изменчивости вещественного состава руды, отделяемой от забоя. В настоящее время известны некоторые системы, позволяющие определять тип пород при проведении горных выработок, но все они представляют собой отдельную непроизводительную технологическую операцию, совершаемую после остановки углубления забоя, что приводит к дополнительному расходу времени и удорожанию производства работ [5–7]. Наиболее остро данный вопрос стоит при освоении месторождений полезных ископаемых подземным способом, где стоимость работ крайне высока. Ввиду этого перспективным направлением исследований является разработка метода, позволяющего на этапе углубления забоя эксплуатационной горной выработки оценить наличие полезного ископаемого в режиме реального времени [8–11]. Одним из решений этой задачи может стать система, основанная на мониторинге комплекса физико-механических свойств горных пород по упругой реакции породы на разрушение, регистрируемой посредством измерения упругой деформации бурильной колонны в процессе бурения шпуров или скважин при проведении буровзрывных работ.

Теоретические основы механизма мониторинга физико-механических свойств горных пород. Один из возможных методов определения наличия полезного ископаемого в забое — отслеживание изменения комплекса физико-механических свойств горных пород, главным образом упругости, в процессе бурения шпуров или скважин. Такое изменение можно оценить по упругой деформации бурильной колонны, вызванной упругой реакцией горной породы на разрушение в условиях ударно-вращательного бурения.

Буровое долото, воспринимающее ударную нагрузку от забойного механизма, преобразует ее в собственную кинетическую энергию разрушения горной породы U_d , расходуя ее на упругое деформирование буровой компоновки U_k и горной породы U_n [12]:

$$U_d = U_n + U_k.$$

Деформация буровой компоновки и породы определяется наличием динамической силы, вызванной процессом колебаний долота P_d при передаче ударного импульса.

Преобразование энергии в процессе разрушения горных пород, пренебрегая величиной кинетической энергии деформации пород, имеющей сравнительно крайне малую величину, можно определить как равенство кинетической энергии породоразрушающего инструмента \mathcal{E}_k и потенциальной энергии деформации породы Π_d

$$\mathcal{E}_k = \Pi_d = \frac{mv_0^2}{2} = \frac{P\delta}{2},$$

где m — масса ударника забойного ударного механизма, кг; v_0 — скорость породоразрушающего инструмента в момент соударения с породой, м/с; P — усилие взаимодействия инструмента с породой, Н; δ — деформация породы, м.

В соответствии с представленной зависимостью усилие P , которое вызывает деформирование породы и элементов колонны, передающих ударный импульс к забою скважины, равно

$$P = \frac{mv_0^2}{\delta}.$$

При нанесении ударного импульса породоразрушающим инструментом по горным породам, слагающим забой скважины, порода испытывает упругую $\Delta_{уп}$ и пластическую деформацию $\Delta_{пл}$. Кроме того, имеется упругая деформация бурильных труб Δl_T , определяемая как

$$\Delta l_T = \frac{Pl}{EF},$$

где l — длина трубы постоянного сечения площадью F , м; E — модуль упругости стали, Па.

В соответствии с изложенным деформация бурильных труб вычисляется следующим образом:

$$\Delta l_T = \frac{mv_0^2 l}{EF(\Delta_{уп} + \Delta_{пн} + \Delta l_T)},$$

$$\Delta l_T^2 + \Delta l_T(\Delta_{уп} + \Delta_{пн}) - \frac{mv_0^2 l}{EF} = 0,$$

$$\Delta l_T = 0.5 \left(\delta \pm \sqrt{\delta^2 + 4 \frac{mv_0^2 l}{EF}} \right),$$

где $\delta = \Delta_{уп} + \Delta_{пн}$.

Принимая во внимание, что упругая деформация в бурильной трубе будет меньше при более значительной деформации в породе (повышенная податливость породы), можно предположить, что выражение

$$\Delta l_T = 0.5 \left(\delta - \sqrt{\delta^2 + 4 \frac{mv_0^2 l}{EF}} \right)$$

будет верным ответом на взаимосвязь параметров, влияющих на упругую деформацию в бурильной трубе. В данном случае величина деформации противоположна по направлению деформированию горной породы и выражается зависимостью со знаком минус.

Следует отметить, что если в условиях вращательного бурения зависимость эффективности разрушения горных пород на забое скважины от конструктивных особенностей породоразрушающего инструмента и технологических параметров производства исследована довольно хорошо [13], то по отношению к ударно-вращательному способу — недостаточно. Это осложняет задачу создания универсальной системы мониторинга физико-механических свойств горных пород.

Необходимы эмпирические исследования по определению зависимости составляющих упругого и пластического деформирования породы как от их упруго-пластических свойств, так и технико-технологических параметров бурения — величины ударного импульса, типа вооружения и степени износа вооружения долота. Однако теоретически можно оценить значения упругого и пластического деформирования, задавшись формой торца бурового долота и породоразрушающих вставок, в частности, шарообразной формой инденторов, наиболее распространенной при изготовлении долот для бурения твердых горных пород (рис. 1). Это может быть долото с плоской торцевой частью и твердосплавным вооружением в виде сферических вставок равномерно расставленных по поверхности торца.

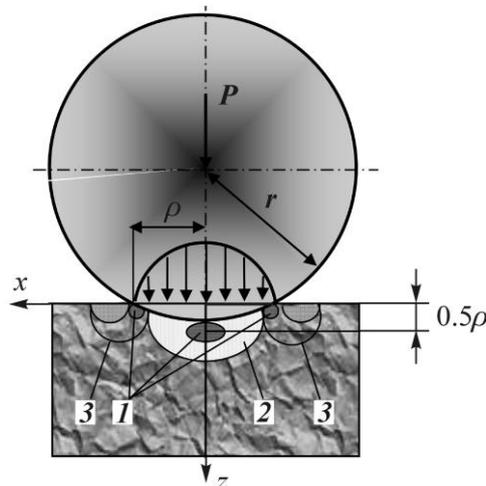


Рис. 1. Эпюра контактного давления и схема напряженного состояния и разрушения породы под торцом шарового индентора: 1 — очаги максимальных касательных напряжений; 2 — ядро сжатия; 3 — кольцевые трещины отрыва породы

Напряженное состояние горной породы наиболее характерно описывается теорией Г. Герца о сжатии соприкасающихся криволинейных тел. В ситуации соприкосновения сферы и поверхности без нагрузки контакт осуществляется в определенной точке. В то же время при приложении перпендикулярной поверхности нагрузки к сфере формируется круговая площадка контакта (рис. 1). Радиус поверхности давления при вдавливании сферы с усилием P рассчитывается по формуле

$$\rho = 1.144 \sqrt[3]{Pr \left[\frac{4(1-\mu_1^2)}{E_1} + \frac{4(1-\mu_2^2)}{E_2} \right]},$$

где μ_1, μ_2 — коэффициенты Пуассона для индентора и породы соответственно; E_1, E_2 — модули упругости для индентора и породы соответственно; r — радиус сферы индентора, м. Эта зависимость работоспособна в случае близости характеристик тел к характеристикам металлов.

Давление на поверхности контакта сферы с породой можно описать уравнением

$$P(x) = \frac{3P}{2\pi\rho^3} \sqrt{\rho^2 - x^2},$$

где x — расстояние, равное удалению точки от оси вдавливания z , м. При $x = 0$ давление $P(x)$ максимально и равно $3P/2\pi\rho^2$.

Наибольшая величина внедрения шарообразного индентора в породу при упругом взаимодействии будет в центре контакта:

$$\delta = \frac{3P(1-\mu^2)}{4E\rho}. \quad (1)$$

Анализ напряженного состояния горной породы под торцом шарового индентора Р. М. Эйгелеса [14] показал, что область всестороннего сжатия в данном случае меньше, чем при вдавливании плоского цилиндрического индентора. Максимальные касательные напряжения при вдавливании сферы отмечаются по оси симметрии на глубине от поверхности контакта на расстоянии около 0.5ρ , а также на контуре давления. Отсюда следует, что разрушение породы при вдавливании сферы начнется прежде всего на двух участках: на глубине 0.5ρ в точке, лежащей на оси симметрии и на поверхности образца по контуру контакта сферы с породой (рис. 1).

Если радиус поверхности давления при вдавливании сферы с усилием P определить по аналитической формуле, которая известна из геометрических решений $\rho = \sqrt{2hr - h^2}$ (h — глубина внедрения сферической вставки в породу, м; r — радиус сферы породоразрушающей вставки, м), то выражение (1) с учетом влияния сил внутреннего трения, направленных на снижение объема деформации горной породы, будет выглядеть так:

$$\delta = \frac{3P(1-\mu^2)}{4E\rho(1+\operatorname{tg}\varphi)\sqrt{2hr-h^2}}, \quad (2)$$

где $P = P_{oc}/N$ — силовая нагрузка на одну вставку; N — число породоразрушающих вставок на торце долота, P_{oc} — осевая нагрузка на породоразрушающий инструмент.

Из (2) следует, что увеличение радиуса сферы, внедряемого в породу индентора приводит к снижению величины упругой деформации породы. Это свидетельствует о негативном влиянии изнашивания вооружения в процессе эксплуатации породоразрушающего инструмента, так как в этом случае увеличивается радиус сферы породоразрушающего элемента.

Глубину внедрения породоразрушающей вставки сферической формы можно рассчитать по формуле [15]

$$h = r - \sqrt{r^2 - \frac{P}{\pi p_{ш}(1+\operatorname{tg}\varphi)}}.$$

где $p_{ш}$ — твердость горной породы, Па.

Эта зависимость одновременно позволяет определить величину пластической деформации, что следует из рис. 2, где 1 — часть резца, внедрившаяся в горную породу; 2 — область пластической деформации (ядро сжатия); 3 — область упругой деформации горной породы.

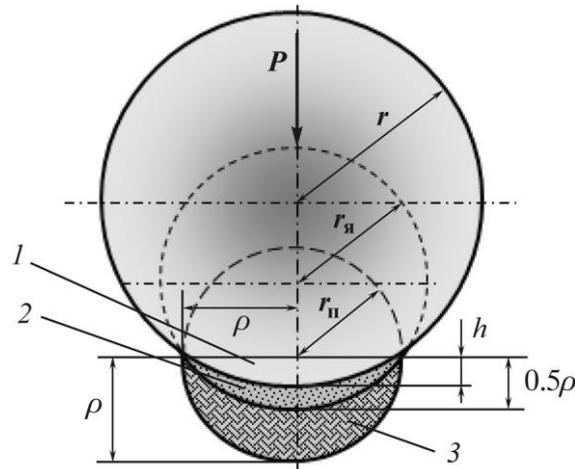


Рис. 2. Схема внедрения в породу шарообразной породоразрушающей вставки: $r_я$ — радиус ядра сжатия, м; $r_п$ — радиус зоны упругой деформации горной породы

Результаты исследования и обсуждение. Реализация механизма определения изменчивости физико-механических свойств горных пород непосредственно в процессе бурения возможна при использовании специального комплекса технических средств, сооруженного на базе станка ударно вращательного бурения 1 (рис. 3) с фиксацией в режиме реального времени деформации буровой трубы 2 в момент нанесения ударного импульса за счет пьезоэффекта [16].

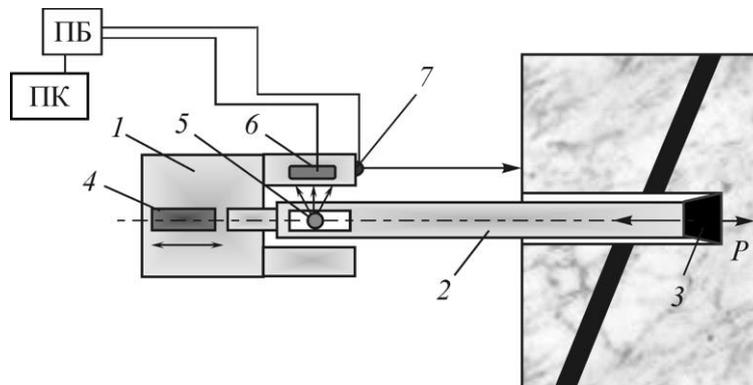


Рис. 3. Буровая установка для бурения шпуров и скважин с системой интерактивного определения пластов горных пород и включений различных физико-механических свойств: 1 — буровой агрегат; 2 — бурильная труба; 3 — долото; 4 — ударник механизма ударного действия; 5 — пьезодатчик и передающая часть оптофона; 6 — принимающая часть оптофона; 7 — лазерный дальномер

В качестве пьезодатчика может использоваться кварцевый или иной датчик 5. Сжатие кристалла кварца в пьезодатчике 5 преобразуется в электрический сигнал оптофона, а электрический сигнал — в свечение светодиода определенной интенсивности светового потока. Световой поток, воспринимаемый приемником-преобразователем светового сигнала 6, вновь преобразуется в электрический сигнал фототиристорным преобразователем, что позволяет создать возможность бесконтактной передачи сигнала от вращающейся при бурении трубы к корпусу буровой машины и далее в приемное электронное устройство и компьютер.

Одним из вариантов измерения скорости проходки при бурении можно использовать лазерный дальномер 7, который в процессе углубления шпура или скважины будет передавать информацию о расстоянии от датчика до забоя горной выработки синхронно со счетчиком времени,

что в результате позволяет определить интервал проходки, время и скорость бурения, а также интервалы расположения выявленных пластов горных пород, отличающихся физико-механическими свойствами. Таким образом, на компьютер в режиме реального времени будет поступать сигнал, показывающий величину деформации в бурильной колонне, как результат реакции со стороны разрушаемой в данный момент породы и в зависимости от типа долота, его технического состояния (изношенности), энергии ударного импульса со стороны ударного механизма.

ВЫВОДЫ

Предложена система, позволяющая в режиме реального времени определять изменчивость горных пород, в частности, их физико-механических свойств, и формирующая новое представление о рациональном управлении рудопотоком на горнодобывающих предприятиях. Для ее реализации на этапе организации работ необходимо тестовое определение уровней отклика системы буровое долото – горная порода с учетом применяемой техники, бурового инструмента и их технического состояния. Тестовые параметры уровней деформации бурильных труб будут служить отправной точкой для распознавания типа горной породы, ее состояния, наличия рудной зоны, содержания в руде полезного компонента, и использованы при настройке логистической системы доставки руды в пункты отгрузки на предприятия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Larchenko L. V., Kolyshkin A. V., and Yakovleva T. V.** The reproduction of the mineral resource base as the basis for the sustainable development of the resource-producing regions of the north and the arctic. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, vol. 753(6), pp. 1–5. [**Ларченко Л. В., Колышкин А. В., Яковлева Т. В.** Воспроизводство минерально-сырьевой базы как основа устойчивого развития ресурсодобывающих регионов Севера и Арктики // Серия конференций IOP: Наука о Земле и окружающей. — 2020. — Т. 753. — № 6. — С. 1–5.]
2. **Goosen E. V., Kagan E. S., and Nikitenko S. M.** Development of scientific framework to prepare resource regions in Russia for integrated subsoil use: Quantitative assessment, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, vol. 262, pp. 1–5. [**Гусен Е. В., Каган Е. С., Никитенко С. М.** Разработка научной основы подготовки ресурсных регионов России к комплексному недропользованию: количественная оценка // Серия конференций IOP: Наука о Земле и окружающей. — 2019. — Т. 262. — С. 1–5.]
3. **Sidorova G. P., Yakimov A. A., and Ovcharenko N. V.** Content of Microelements in Brown Coals of Transbaikal Region, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 272, pp. 1–6 [**Сидорова Г. П., Якимов А. А., Овчаренко Н. В.** Содержание микроэлементов в бурых углях Забайкалья // Серия конференций IOP: Наука о Земле и окружающей. — 2019. — Т. 272. — С. 1–6.]
- 4 **Tarashev A. M., Vasilev J. A., Turygina V. F., Kravchuk S. V., and Strelchuk A. E.** Methods for predicting the production of natural resources, AIP Conference Proceedings, 2019, vol. 2186, pp. 1–7 [**Тарасhev А. М., Васильев Ю. А., Турыгина В. Ф., Кравчук С. В., Стрельчук А. Е.** Методы прогнозирования добычи природных ресурсов // Материалы конференции AIP. — 2019. — Т. 2186. — С. 1–7.]
5. **Kosolapov A. I.** Modern Methods and Tools for Determining Drillability and Blastability of Rocks, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, vol. 459(2), pp. 1–6. [**Косолапов А. И.** Современные методы и инструменты для определения буримости и взрываемости горных пород // Серия конференций IOP: Наука о Земле и окружающей. — 2020. — Т. 459. — № 2. — С. 1–6.]
6. **Tao W., Tang H., Wang Y., and Ma J.** Evaluation of methods for determining rock brittleness under compression, Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2020, vol. 78, pp. 1–16. [**Тао В., Танг Х., Ванг Ю., Ма Ж.** Способ оценки хрупкости горных пород на основе рассеяния энергии // Журнал науки и техники в области природного газа. — 2020. — Т. 78. — С. 1–16.]

7. **Namidinovna Y. K., Vladimirovich M. D., and Ivanovich C. V.** Estimation of rock mass by the ultrasonic method for determining the degree of inhomogeneity, *Test Engineering and Management*, vol. 83, 2020, pp. 6792–6796. [**Намидинова Ю. К., Владимирович М. Д., Иванович С. В.** Оценка массива породы ультразвуковым методом определения степени неоднородности // *Test Engineering and Management*. — 2020. — Т. 83. — С. 6792–6796.]
8. **Kelessidis V. C.** Rock drillability prediction from in situ determined unconfined compressive strength of rock. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurg*, 2011, vol. 111(6), pp. 429–436. [**Клесседис В. С.** Прогноз буримости горных пород по данным натурального определения неограниченной прочности горных пород на сжатие // *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurg*. — 2011. — Т. 111. — № 6. — С. 429–436.]
9. **Aalizad S. A. and Rashidinejad F.** Prediction of penetration rate of rotary-percussive drilling using artificial neural networks – a case study. *Archives of Mining Sciences*, 2012, vol. 57(3), pp. 715–728 [**Ализад С. А., Рашидинеджад Ф.** Прогнозирование скорости проникновения ударно-вращательного бурения с использованием искусственных нейронных сетей – пример из практики // *Archives of Mining Sciences*. — 2012. — Т. 57. — № 3. — С. 715–728.]
10. **Zharikov S. N., Shemenev V. G., and Kutuev V. A.** Ways to clarify the properties of rocks during drilling and blasting operations, *Sustainable Development of Mountain Territories*, 2017, vol. 9(1), pp. 74–80 [**Жариков С. Н., Шемениев В. Г., Кутуев В. А.** Способы уточнения свойств горных пород при проведении буровзрывных работ // *Устойчивое развитие горных территорий*. — 2017. — Т. 9. — № 1. — С. 74–80.]
11. **Capik M., Yilmaz A. O., and Yasar S.** Relationships between the drilling rate index and physicommechanical rock properties, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2017, 76(1), pp. 253–261 [**Капик М., Йилмаз А. О., Ясар С.** Взаимосвязь между индексом скорости бурения и физико-механическими свойствами горных пород // *Вестник инженерной геологии и окружающей среды*. — 2017. — Т. 76. — № 1. — С. 253–261.]
12. **Vjalshin D. R. and Rjabova A. A.** Development of hardware and technology for interactive drilling analysis as part of the Smart Mine system, *Proceedings of the XXIII International Symposium for Students and Young Scientists*, 2019, vol. 1, pp. 496–497. (in Russian) [**Вяльшин Д. Р., Рябова А. А.** Разработка технических средств и технологии интерактивного анализа бурения как части системы “Умный рудник” // *Проблемы геологии и освоения недр: труды XXIII Междунар. симп. студентов и молодых ученых*. — 2019. — Т. 1. — С. 496–497.]
13. **Tret’jak A. A.** The dependence of the mechanical speed of drilling rocks with crowns reinforced by ATP on the main technological parameters, *Mining informational and analytical bulletin*, 2011, no. 12, pp. 233–237. [**Третьяк А. А.** Зависимость механической скорости бурения горных пород коронками, армированными АТП, от основных технологических параметров // *ГИАБ*. — 2011. — № 12. — С. 233–237.]
14. **Neskoromnyh V. V.** Rock destruction during well drilling. Tutorial, Moscow, Infra-M, Krasnoyarsk, 367 pp. [**Нескоромных В. В.** Разрушение горных пород при бурении скважин: учеб. пособие. — Красноярск: СФУ. — 2015. — 367 с.]
15. **Neskoromnyh V. V., Popova M. S., Chihotkin A. V., and Golovchenko A. E.** Analysis of the influence of resistance forces on drilling efficiency with a PDC tool, *Petroleum engineer*, 2020, no. 1, pp. 16–23. (in Russian) [**Нескоромных В. В., Попова М. С., Чихоткин А. В., Головченко А. Е.** Анализ влияния сил сопротивления на эффективность бурения инструментом типа PDC // *Инженер-нефтяник*. — 2020. — № 1. — С. 16–23.]
16. **Pat. 2716631 RF.** Method for determining the strength of rocks and a device for its implementation V. V. Neskoromnyh, P. G. Petenev, A. E. Golovchenko, D. R. Vyal’shin, A. A. Ryabova, and I. A. Komarovskiy, *Vyull. Izobret.*, 2020, no. 8. [Пат. 2716631 РФ. Способ определения прочности горных пород и устройство для его реализации / В. В. Нескоромных, П. Г. Петенев, А. Е. Головченко, Д. Р. Вяльшин, А. А. Рябова, И. А. Комаровский // *Опубл. в БИ*. — 2020. — № 8.]