

**ANALYSIS OF FRACTION CONTENTS IN ROCK SCRATCH TESTS FOR ESTIMATING THE ANGLE OF INTERNAL FRICTION FOR THE SEDIMENTARY COVER OF THE KOVYKTA FIELD****K.V. Toropetsky** <sup>1</sup>, **G.A. Borisov**<sup>1</sup>, **A.S. Smirnov** <sup>2</sup>, **A.V. Nosikov**<sup>3</sup><sup>1</sup> NovosibirskNIPIneft LLC, 6-1 Lavrentiev Ave, Novosibirsk 630090, Russia<sup>2</sup> Gazprom Nedra LLC, 70 Herzen St, Tyumen 625000, Russia<sup>3</sup> Gazprom VNIIGAZ LLC, 2 Vorovsky St, Tyumen 625019, Russia

**ABSTRACT.** The article describes the possibility of using the granulometric analysis of rock cuttings formed in controlled core scratching tests to estimate the angle of internal friction.

The study object is the Kovykta gas-condensate field (GCF) that occupies a wide area in the southeastern part of the Irkutsk amphitheater of the Siberian platform. This uniquely complex geological structure holds significant reserves of hydrocarbons. Its sedimentary cover is composed of the Vendian – lower Paleozoic and partly Riphean formations. Their total thickness exceeds 6000 m, as estimated from the new seismic survey data [Vakhromeev et al., 2019].

The sedimentary cover of the Kovykta GCF has been studied by surface and borehole geophysical techniques, remote sensing and geostructural methods, in combination with the tectonophysical approach [Seminsky et al., 2018] based on drilling data, including standard and special core sampling data.

**KEYWORDS:** controlled core scratching; scratch test; granulometric analysis; geomechanical properties; angle of internal friction; correlation analysis; Kovykta field

**SHORT COMMUNICATION**

Received: December 5, 2020

Revised: August 18, 2021

Accepted: September 13, 2021

**Correspondence:** Konstantin V. Toropetsky, [ktoropetsky@gmail.com](mailto:ktoropetsky@gmail.com)

**FOR CITATION:** Toropetsky K.V., Borisov G.A., Smirnov A.S., Nosikov A.V., 2021. Analysis of fraction contents in rock scratch tests for estimating the angle of internal friction for the sedimentary cover of the Kovykta field. *Geodynamics & Tectonophysics* 12 (3s), 748–753. doi:10.5800/GT-2021-12-3s-0551

## ФРАКЦИОННЫЙ АНАЛИЗ СКРЕТЧ-ШЛАМА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ОСАДОЧНОГО ЧЕХЛА КОВЫКТИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

К.В. Торопецкий<sup>1</sup>, Г.А. Борисов<sup>1</sup>, А.С. Смирнов<sup>2</sup>, А.В. Носиков<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ООО «НовосибирскНИПИнефть», 630090, Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева, 6/1, Россия

<sup>2</sup> ООО «Газпром Недра», 625000, Тюмень, ул. Герцена, 70, Россия

<sup>3</sup> ООО «Газпром ВНИИГАЗ», 625019, Тюмень ул. Воровского, 2, Россия

**АННОТАЦИЯ.** В работе показана возможность использования гранулометрического анализа шлама, образующегося при контролируемом царапании горных пород, для прогноза угла внутреннего трения.

Объект исследования – Ковыктинское газоконденсатное месторождение (ГКМ), которое занимает значительную территорию, охватывающую юго-восточную часть Иркутского амфитеатра Сибирской платформы, и по особенностям геологического строения и значительному объему углеводородов является уникальным. Осадочный чехол рассматриваемого объекта сложен венд-нижнепалеозойскими и частично рифейскими образованиями, суммарная толщина которых более 6000 м по новым данным сейсморазведки [Vakhromeev et al., 2019].

Методы исследования осадочного чехла Ковыктинского ГКМ базируются на наземных и скважинных геофизических исследованиях, дистанционных и геолого-структурных способах в сочетании с тектонофизическим подходом [Seminsky et al., 2018], основу которого составляют данные бурения, в том числе стандартные и специальные исследования керна материала.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** метод контролируемого царапания; скретч-тест; гранулометрический анализ; геометрические свойства; угол внутреннего трения; корреляционный анализ; Ковыктинское месторождение

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Ранее авторами был разработан и успешно применен метод контролируемого царапания (скретч-тест) для профилирования физико-механических свойств горных пород с высокой детальностью [Verkhushin et al., 2017; Nosikov et al., 2018]. Основа метода контролируемого царапания (МКЦ) состоит в измерении силы сопротивления при царапании образца керна и, в зависимости от режимов, характеризует предел прочности при неограниченном одноосном сжатии (Unconfined Compressive Strength (UCS)) или коэффициент трещиностойкости материала [Lin, Zhou, 2013; Almenara et al., 1992; Suarez-Rivera et al., 2002; Richard, 1999; Jaime et al., 2010; Dagrain, 2001]. Успешное применение скретч-теста для профилирования физико-механических характеристик горных пород показано в работах [Richard et al., 2012; Germay et al., 2014, 2015; Khaksar et al., 2014].

В развитие метода была исследована возможность получения дополнительной информации по характеристикам шлама, образующегося при царапании горных пород в контролируемых условиях.

Теоретическая основа для подобного рода исследований состоит в следующем: разрушение материала резцом при царапании происходит за счет образования множественных трещин скола, которые возникают в зоне контакта с резцом под определенным углом к режущей плоскости в зависимости от угла внутреннего трения, и, как следствие, размеры и форма образующихся при царапании частиц должны находиться в прямой связи с углом внутреннего трения [Kovrizhnykh, 2005, 2009]. Согласно жесткопластической модели образования элемента скола при резании (обобщение решения Ли – Шеффера), размер  $a$ -частиц, образующихся

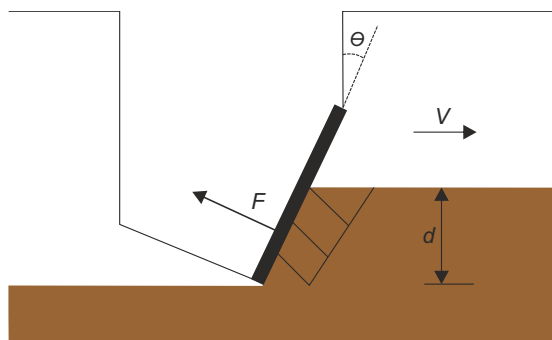
при резке, находится в строгом соответствии с глубиной  $d$  заглупления резца, углом внутреннего трения  $\varphi$  материала и углом атаки  $\theta$  резца:

$$\frac{a}{d} = \frac{\sin(\varphi)\cos\left(\frac{\theta - \varphi}{2}\right)}{\cos\left(\frac{\pi - \varphi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)\cos\left(\frac{\pi - \theta - \varphi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)\left[\frac{1 + \sin(\varphi)}{1 - \sin(\varphi)}\exp((\theta - \varphi)\operatorname{tg}(\varphi)) - 1\right]}.$$

Схема скретч-теста и образования шламовых частиц при скалывании поверхности изображена на рис. 1. Обращаем внимание, важно, чтобы частицы шлама были получены в строго контролируемых условиях (глубина заглупления и угол атаки режущей поверхности).

Процесс резки горных пород с помощью резца при различных глубинах и углах его установки, а также скоростях резки детально смоделирован авторами с помощью метода дискретного элемента (Discrete element method (DEM)) [Menezes et al., 2014; Menezes, 2016] и метода конечных элементов (Finite Element Method (FEM)) [Jaime et al., 2015]. Установлено, что существует граница между режимом разрушения в результате пластического течения, когда усилия на резце характеризуют предел прочности, и в результате образования трещин, когда усилия на резце характеризуют трещиностойкость материала [He et al., 2017]. Тип режима царапания (глубина и угол установки резца, скорость царапания) позволяет выбрать тот или иной режим разрушения и, соответственно, задать, какая из двух характеристик – предел прочности или трещиностойкость – будет измеряться в результате профилирования усилий.

Авторами был изучен вопрос связи фракционного состава, а также размера и формы зерен с механическими характеристиками применительно к гранулярным



**Рис. 1.** Схема скретч-теста и образования шламовых частиц при скалывании поверхности.

**Fig. 1.** Scheme of the scratch test procedure and the formation of rock cuttings in controlled core scratching tests.

сплошным средам (порошкам, грунтам и горным породам). В работе [Zorlu et al., 2008] рассмотрены корреляции предела прочности при одноосном сжатии с петрографическими характеристиками, такими как средний размер зерен, минералогический состав, типы зерен и контактов между зернами. В [Shinohara et al., 2000] – корреляции угла внутреннего трения с фактором формы зерен (вытянутость). В [Li, 2013] – корреляции предела прочности при сдвиге с размером и формой зерен (округлость, выпуклость, вытянутость) или долей частиц определенной фракции в кумулятивном распределении.

Угол внутреннего трения действительно в большей степени определяется размером и формой зерен (по сути от этого зависит, каким образом соотносятся контактные силы, действующие между зернами в условиях скольжения), поэтому аналогия с порошками и/или грунтами здесь вполне уместна, в свою очередь, наличие цемента в горных породах вносит некоторую поправку и обуславливает сцепление (когезию), которое практически отсутствует или минимально в порошках и грунтах.

Общепринятая методика определения угла внутреннего трения стандартизована в ГОСТ 21153.8-88 [Rocks..., 1988], который детально описывает процедуру построения паспорта прочности горных пород методом объемного сжатия на серии образцов. В результате строится зависимость предельных касательных напряжений, при которых наступает разрушение материала, от нормальных напряжений. Полученная зависимость линейно аппроксимируется с помощью двух параметров – угла внутреннего трения и когезии.

Формирование шламовых частиц при царапании происходит иначе при наличии слоистости или трещиноватости в горных породах, поскольку в объеме исследуемого образца появляются плоскости с ослабленными механическими характеристиками, по которым и будет происходить скалывание.

## 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В подтверждение теории нами был выполнен гранулометрический анализ шламовых частиц, собранных в результате скретч-теста горных пород, с помощью

лабораторного прибора Microtrac X100, с последующим квантильным анализом полученных кумулятивных распределений по размерам, включая расчет таких параметров, как сортированность, эксцесс и асимметрия распределения. Указанные параметры вычисляются следующим образом [Rukhin, 1947]:

1.  $S_0 = (\Phi_{75}/\Phi_{25})^{1/2}$  – параметр сортированности, где  $\Phi_{75}$  и  $\Phi_{25}$  – квантили 75 и 25 %.

2.  $K = (\Phi_{95} - \Phi_5) / 2.44(\Phi_{75} - \Phi_{25})$  – параметр эксцесса распределения, где  $\Phi_5, \Phi_{25}, \Phi_{75}, \Phi_{95}$  – размерности фракций, составляющих 5, 25, 75 и 95 %. Эксцесс характеризует остроту распределения в пике по сравнению со стандартным гауссовым.

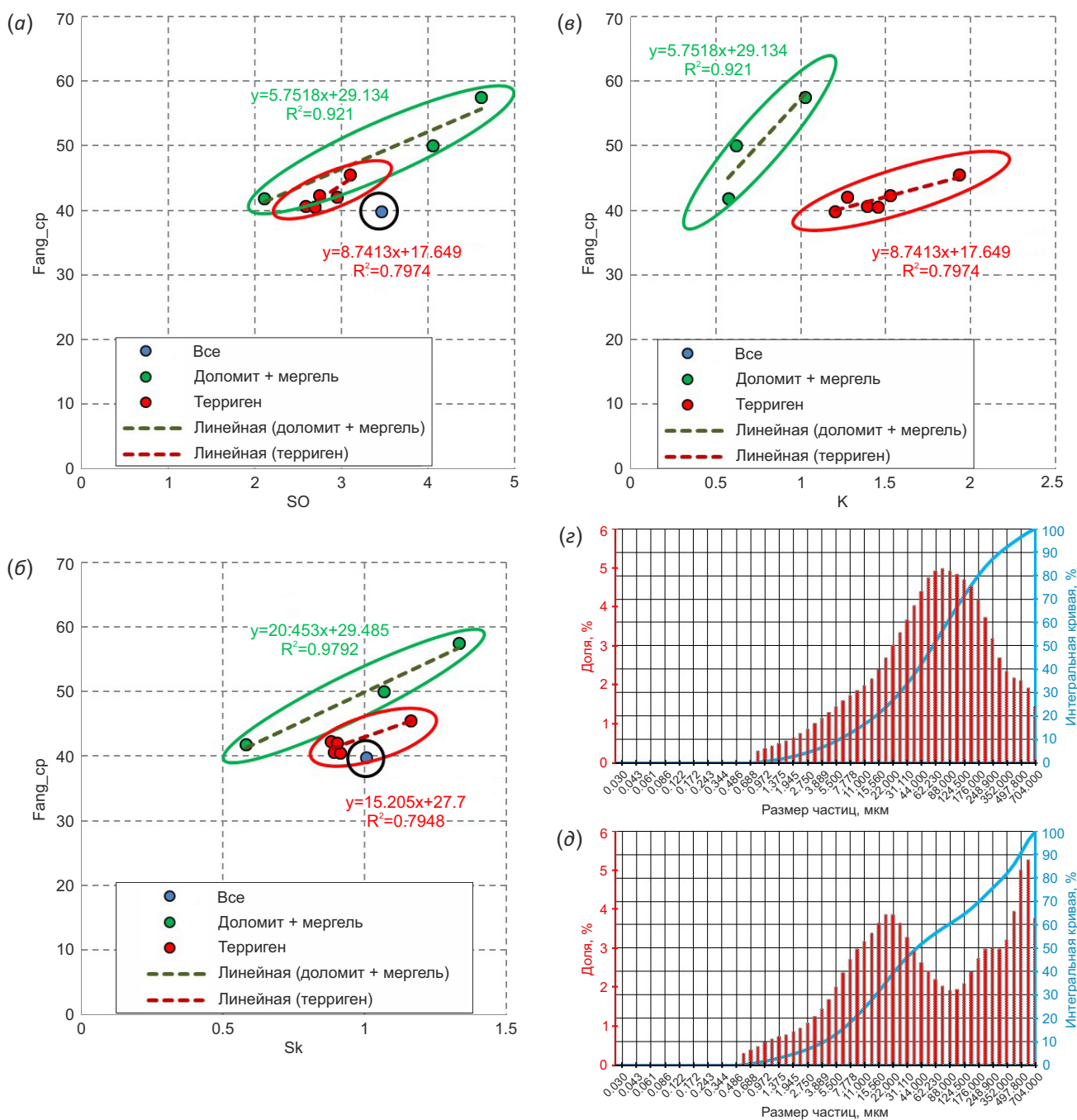
3.  $S_k = (\Phi_{25} \times \Phi_{75} / \Phi_{50}^2)^{1/2}$  – параметр асимметрии распределения, где  $\Phi_{25}, \Phi_{50}, \Phi_{75}$  – размерности фракций, составляющих 25, 50 и 75 %. Асимметрия показывает, насколько распределение несимметрично относительно пика.

Осредненные значения угла внутреннего трения, полученные при построении паспорта прочности по ГОСТ 21153.8-88 [Rocks..., 1988], были сопоставлены с результатами гранулометрического анализа шламовых частиц, отобранных при скретч-тестах соответствующих интервалов.

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2 приведены кросс-плоты осредненных значений угла внутреннего трения и характеристик фракционного состава скретч-шлама, а также типовые распределения размеров шламовых частиц для доломитов. Очевидно наличие трех трендов: породы терригенного комплекса (песчаники, алевролиты и аргиллиты), породы карбонатного комплекса (доломиты, мергели), а также засоленный известняк. Отметим, что при гранулометрии пробы вносятся в потоке воды и галит в составе засоленного доломита растворяется, что, очевидно, искажает получаемые закономерности для данного типа горной породы. Для пород терригенного и карбонатного комплексов, за исключением засоленных доломитов, устанавливаются зависимости высоким коэффициентом корреляции  $R^2$  (выше 0.75), приведенные в табл. 1.

Как было сказано выше, наличие слоистости или трещиноватости в горных породах меняет механизм



**Рис. 2.** Кросс-плоты осредненных значений угла внутреннего трения и характеристик фракционного состава скретч-шлама (а-в), а также типовые распределения размеров шламовых частиц для доломитов (z) и песчаников (d). Красная обводка – породы терригенного комплекса; зеленая – породы карбонатного комплекса; черная – засоленный известняк.

**Fig. 2.** Cross-plots of the averaged values of the angle of internal friction and the fraction compositions of rock cuttings formed in controlled core scratching tests (a–в), and typical distributions of the sizes of dolomite (z) and sandstone (d) cuttings. Lines: red – terrigenous rocks; green – carbonate rocks; black – salinized limestone.

**Таблица 1.** Свод установленных зависимостей угла внутреннего трения от характеристик фракционного состава шлама  
**Table 1.** Estimated relationships between the angle of internal friction and the fraction compositions of rock cuttings formed in controlled core scratching tests

Параметр	Терригенный комплекс	R <sup>2</sup>	Карбонатный комплекс	R <sup>2</sup>
Сортированность	$8.74 \cdot S_0 + 17.65$	0.79	$5.75 \cdot S_0 + 29.13$	0.92
Экссесс	$7.06 \cdot K + 31.50$	0.76	$28.51 \cdot K + 28.74$	0.81
Асимметрия	$15.21 \cdot S_k + 27.79$	0.80	$20.45 \cdot S_k + 29.49$	0.98

их разрушения, поэтому каждый указанный тип пород следует рассматривать отдельно, однако это выходит за рамки настоящей работы.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В результате исследования установлена взаимосвязь между характеристиками гранулометрического распределения шламовых частиц (сортированность, эксцесс, асимметрия распределения), полученных при скретч-тесте горных пород в контролируемых условиях, и углом внутреннего трения. Микроскопия шламовых частиц может дать дополнительную информацию, а именно характеристики формы частиц (форма, аспект, округлость, вытянутость и т.д.), что открывает новые возможности для получения информации из петрографических исследований (гранулометрия, сортированность, фактор формы шламовых частиц), сопровождающих скретч-тестирование, которые могут лечь в основу специальных исследований по изучению особенностей терригенной и галогенно-карбонатной части осадочного чехла Ковыктинского ГКМ.

Отметим, что угол внутреннего трения – это наименее точно прогнозируемая физико-механическая характеристика горных пород из тех, что необходимы для построения прикладных геомеханических моделей [Toropetsky et al., 2016a], поскольку из стандартных лабораторных исследований кернов, как правило, невозможно вывести кондиционные зависимости – т.е. зависимости с приемлемым коэффициентом корреляции  $R^2$  (выше 0.50), связывающие угол внутреннего трения с иными физическими характеристиками горных пород, такими как пористость, плотность, скорости упругих волн и т.д., которые могут быть получены в результате стандартных геофизических исследований. Имеющиеся в литературе зависимости для прогноза угла внутреннего трения также характеризуются небольшими коэффициентами корреляции [Toropetsky et al., 2016b]. Поэтому для построения высоко детальных геомеханических моделей необходимы прямые измерения физико-механических характеристик горных пород, которые способен обеспечить метод контролируемого царапания.

#### 5. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Almenara J.R., Detournay E., Hudson J.A., 1992. Cutting Experiments in Sandstones with Blunt PDC Cutters. In: Rock Characterization. Proceedings of the ISRM Symposium, Eurock '92 (September 14–17, 1992). Chester, UK, p. 215–220.

Dagrain F., 2001. Influence of the Cutter Geometry in Rock Cutting: An Experimental Approach. Thesis (Degree of Master of Science). Minneapolis, 90 p.

Germay C., Richard T., Mappanyompa E., Lindsay C., Kitching D., Khaksar A., 2014. The Continuous-Scratch Test: A High-Resolution Strength Log for Geomechanical and Petrophysical Characterization of Rocks. SPE Reservoir Evaluation & Engineering 18 (3), 432–440. <https://doi.org/10.2118/174086-PA>.

Germay C., Richard T., Mappanyompa E., Lindsay C., Kitching D., Khaksar A., 2015. The Continuous-Scratch Profile: A High-Resolution Strength Log for Geomechanical and Petrophysical Characterization of Rocks. SPE Reservoir Evaluation & Engineering 18 (3), 432–440. <https://doi.org/10.2118/174086-PA>.

He X., Xu C., Peng K., Huang G., 2017. On the Critical Failure Mode Transition Depth for Rock Cutting with Different Back Rake Angles. Tunnelling and Underground Space Technology 63, 95–105. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.12.012>.

Jaime M.C., Gamwo I.K., Lyons D.K., Lin J.S., 2010. Finite Element Modeling of Rock Cutting. Proceedings of the 44th U.S. Rock Mechanics Symposium and 5th U.S.-Canada Rock Mechanics Symposium (June 27–30, 2010). Salt Lake City, Utah, ARMA 10-231.

Jaime M.C., Zhou Y., Lin J.-S., Gamwo I.K., 2015. Finite Element Modeling of Rock Cutting and Its Fragmentation Process. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 80, 137–146. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.09.004>.

Khaksar A., Gui F., Taylor P.G., Younessi A., Rahman K., Richard T., 2014. Enhanced Rock Strength Modelling, Combining Triaxial Compressive Tests, Non-Destructive Index Testing and Well Logs. Proceedings of the SPE Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition (October 14–16, 2014). Adelaide, Australia. <https://doi.org/10.2118/171532-MS>.

Kovrizhnykh A.M., 2005. Rigid-Plastic Model of the Formation of Metal Shavings during Cutting of Metals. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics 46 (4), 179–186 (in Russian) [Коврижных А.М. Жесткопластическая модель образования стружки скалывания при резании металлов // Прикладная механика и техническая физика. 2005. Т. 46. № 4. С. 179–186].

Kovrizhnykh A.M., 2009. Determination of Shear Angle, Forces and Dimensions of Chipped Elements during Cutting of Metals. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics 50 (1), 177–186 (in Russian) [Коврижных А.М. Определение угла сдвига, усилий и размеров скалываемых элементов при резании металлов // Прикладная механика и техническая физика. 2009. Т. 50. № 1. С. 177–186].

Li Y., 2013. Effects of Particle Shape and Size Distribution on the Shear Strength Behavior of Composite Soils. Bulletin of Engineering Geology and the Environment 72, 371–381. <https://doi.org/10.1007/s10064-013-0482-7>.

Lin J.-S., Zhou Y., 2013. Can Scratch Tests Give Fracture Toughness? Engineering Fracture Mechanics 109, 161–168. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2013.06.002>.

Menezes P.L., 2016. Influence of Friction and Rake Angle on the Formation of Built-up Edge during the Rock Cutting Process. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 88, 175–182. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2016.07.013>.

Menezes P.L., Lovell M.R., Avdeev I.V., Higgs III C.F., 2014. Studies on the Formation of Discontinuous Rock Fragments during Cutting Operation. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 71, 131–142. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2014.03.019>.

Nosikov A.V., Toropetsky K.V., Mikhailov B.O., Chernysh P.S., Doroshenko A.A., Borisov G.A., 2018. Application of the Method of Controlled Scratching to Study the Mechanical Properties of Rocks. *Exposition Oil & Gas* 66 (6), 30–35 (in Russian) [Носиков А.В., Торопещкий К.В., Михайлов Б.О., Черныш П.С., Дорошенко А.А., Борисов Г.А. Применение метода контролируемого царапания для исследования механических свойств горных пород // Экспозиция нефть газ. 2018. Т. 66. № 6. С. 30–35].

Richard T., 1999. Determination of Rock Strength from Cutting Tests. University of Minnesota, 198 p.

Richard T., Dagrain F., Poyol E., Detournay E., 2012. Rock Strength Determination from Scratch Tests. *Engineering Geology* 147–148, 91–100. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.07.011>.

Rocks. Method for Determination of Triaxial Compressive Strength. State Standard of March 15, 1988, № 21153.8-88. Moscow, 16 p. (in Russian) [Породы горные. Методы определения предела прочности при объемном сжатии: ГОСТ 21153.8-88. М., 16 с.].

Rukhin L.B., 1947. Granulometric Method for Studying Sands. Leningrad Mining Institute, Leningrad, 213 p. (in Russian) [Рухин Л.Б. Гранулометрический метод изучения песков. Л.: Изд-во ЛГИ, 1947. 213 с.].

Seminsky K.Zh., Sankov V.A., Ogibenin V.V., Burzunova Yu.P., Miroshnichenko A.I., Gorbunova E.A., Gorlov I.V., Smirnov A.S. et al., 2018. Tectonophysical Approach to the Analysis of Geological and Geophysical Data on Gas-Condensate Deposits with the Complex Platform Cover. *Geodynamics & Tectonophysics* 9 (3), 587–627 (in Russian) [Семинский К.Ж., Саньков В.А., Огибенин В.В., Бурзунова Ю.П., Мирошниченко А.И., Горбунова Е.А., Горлов И.В., Смирнов А.С. и др. Тектонофизический подход к анализу геолого-геофизических данных на газоконденсатных месторождениях со сложным строением платформенного чехла // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 3. С. 587–627. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-3-0364>].

Shinohara K., Oida M., Golman B., 2000. Effect of Particle Shape on Angle of Internal Friction by Triaxial Compression Test. *Powder Technology* 107 (1–2), 131–136. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(99\)00179-5](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(99)00179-5).

Suarez-Rivera R., Stenebrataten J., Dagrain F., 2002. Continuous Scratch Testing on Core Allows Effective Calibration of Log-Derived Mechanical Properties for Use in Sanding Prediction Evaluation. *Proceedings of the SPE/ISRM Rock Mechanics Conference (October 20–23, 2002)*. Irving, Texas. <https://doi.org/10.2118/78157-MS>.

Toropetsky K.V., Kayurov N.K., Cheremisin A.N., Lushchev M.A., Samoilov M.I., Ulyanov V.N., Borisov G.A., 2016a.

Construction of 1D Physical-Mechanical Models and Solving the Problems of Stability of Wellbores and Near-Wellbore Zones. *Automation, Telemechanization and Communication in Oil Industry* 11, 29–41 (in Russian) [Торопещкий К.В., Каюров Н.К., Черемисин А.Н., Лушев М.А., Самойлов М.И., Ульянов В.Н., Борисов Г.А. Построение 1D физико-механических моделей и решение задач устойчивости ствола скважины и прискважинной зоны // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2016. № 11. С. 29–41].

Toropetsky K.V., Ulyanov V.N., Borisov G.A., Kurmangaliyev R.Z., Kayurov N.K., Arzhantsev V.S., 2016b. Review of Petrophysical Dependencies for Constructing One-Dimensional Geological-Geomechanical Models in Problems of Wellbore Stability during Drilling. *Automation, Telemechanization and Communication in Oil Industry* 12, 31–44 (in Russian) [Торопещкий К.В., Ульянов В.Н., Борисов Г.А., Курмангалиев Р.З., Каюров Н.К., Аржанцев В.С. Обзор петрофизических зависимостей для построения одномерных геолого-геомеханических моделей в задачах устойчивости ствола скважины при бурении // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2016. № 12. С.31–44].

Vakhromeev A.G., Smirnov A.S., Mazukabzov A.M., Gorlov I.V., Misyurkeeva N.V., Shutov G.Ya., Ogibenin V.V., 2019. The Upper Lena Shield Uplift – The Main Object for Preparation of the Hydrocarbon Resource Base in the Southern Part of the Siberian Platform. *Geology and Mineral Resources of Siberia* 3 (39), 38–56 (in Russian) [Вахромеев А.Г., Смирнов А.С., Мазукабзов А.М., Горлов И.В., Мисюркеева Н.В., Шутов Г.Я., Огибенин В.В. Верхнеленское сводовое поднятие – главный объект подготовки ресурсной базы УВ на юге Сибирской платформы // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2019. № 39 (3). С. 38–56].

Verkhushin I.A., Toropetsky K.V., Ulyanov V.N., Borisov G.A., 2017. Development of the Method for Studying the Strength Properties of Rocks by Full-Size Core Profiling. *Automation, Telemechanization and Communication in Oil Industry* 9, 12–16 (in Russian) [Верхушин И.А., Торопещкий К.В., Ульянов В.Н., Борисов Г.А. Развитие метода исследования прочностных свойств горных пород с помощью профилирования полноразмерного керна // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2017. Т. 9. С. 12–16].

Zorlu K., Gokceoglu C., Ocakoglu F., Nefeslioglu H.A., Acikalin S., 2008. Prediction of Uniaxial Compressive Strength of Sandstones Using Petrography-Based Models. *Engineering Geology* 96 (3–4), 141–158. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2007.10.009>.