

ВЛИЯНИЕ АНИЗОТРОПИИ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ НА УСТОЙЧИВОСТЬ СТВОЛА ПРИ БУРЕНИИ

А.М. Казанцева*, Д.О. Королев, М.Д. Субботин, С.С. Кузьмина, Н.А. Павлюков
000 «РН-Геология Исследования Разработка», РФ, Тюмень

© Коллектив авторов,
2025



Электронный адрес: AM_Kazantseva@rn-gir.rosneft.ru

Введение. Параметр UCS (unconfined compressive strength) — предел прочности породы при одноосном сжатии, который является значимым физическим параметром, используемым для описания прочностного состояния горных пород. Во время бурения происходит перераспределение нагрузки на ствол скважины в зависимости от зенитного угла. В рамках исследования введено понятие коэффициента анизотропии прочности — количественной характеристики, отражающей степень снижения прочности породы в зависимости от ориентации образцов в различных направлениях относительно приложенной нагрузки.

Цель. Рассмотрение анизотропии прочностных свойств и выявление ее влияния на устойчивость ствола скважины во время бурения.

Материалы и методы. Представлен обзор наиболее известных и практически значимых способов оценки значений UCS, которые описывают измерения одноосного сжатия пород в зависимости от упругих, акустических и других физико-механических свойств горных пород. Сделано сравнение влияния предела прочности, рассчитанного по разным методам, на градиент обрушений. По результатам интерпретации керновых данных построены зависимости предела прочности от выпиленных под разным углом (0°, 30°, 45°, 60°, 90°) образцов керна.

Результаты. Проведены исследования анизотропии прочностных свойств и выявлено влияние ее на устойчивость ствола скважины. Ориентация выпиленных образцов приведена на ориентацию зенитных углов при бурении. Продемонстрирован общий тренд изменения предела прочности в зависимости от зенитного угла бурения. Рассмотрена оценка градиента обрушений по методу Кулона — Мора с использованием кривой предела прочности для стандартных условий и с учётом анизотропии прочности пород.

Заключение. Результаты исследования позволяют уточнить риски при бурении скважин в интервалах нестабильности открытого ствола и оценить устойчивость наклонно направленных и горизонтальных скважин.

Ключевые слова: предел прочности, анизотропия, керновые исследования, геомеханическое моделирование

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Казанцева А.М., Королев Д.О., Субботин М.Д., Кузьмина С.С., Павлюков Н.А. Влияние анизотропии прочностных свойств на устойчивость ствола при бурении. PROНЕФТЬ. Профессионально о нефти. 2025;10(4):107–116. <https://doi.org/10.51890/2587-7399-2025-10-4-107-116>

Статья поступила в редакцию 04.08.2025

Принята к публикации 15.10.2025

Опубликована 26.12.2025

THE EFFECT OF ANISOTROPY OF STRENGTH PROPERTIES ON BOREHOLE STABILITY DURING DRILLING

**Agata M. Kazantseva*, Dmitry O. Korolev, Michael D. Subbotin, Svetalana S. Kuzmina,
Nikolay A. Pavlyukov**

RN-Geology Research Development, RF, Tyumen

E-mail: AM_Kazantseva@rn-gir.rosneft.ru

Introduction. The UCS (unconfined compressive strength) parameter is the unconfined compressive strength of rock, which is a significant physical parameter used to describe strength state of rocks. During drilling, load on wellbore is redistributed depending on the inclination angle. The research introduced the concept of anisotropy coefficient of strength, which is a quantitative characteristic that reflects the degree of reduction in rock strength depending on the orientation of the samples in different directions relative to the applied load.

Aim. The aim of the work is to consider the anisotropy of strength properties and identify its influence on the stability of the wellbore during drilling.

Materials and methods. This article presents a review of the most well-known and practically relevant methods for estimating UCS values, which describe measurements of uniaxial rock compression based on elastic, acoustic, and other physical and mechanical properties of rocks. The influence of ultimate strength calculated by different methods on failure gradients is compared. Based on the interpretation of core data, dependences of ultimate strength on core samples cut at different angles (0°, 30°, 45°, 60°, and 90°) are constructed.

Results. Anisotropy of strength properties was researched, and its impact on borehole stability was identified. The orientation of the sawn samples was adjusted to match the zenith angles during drilling. A general trend in tensile strength variation depending on the zenith angle of drilling was demonstrated. A collapse gradient assessment using the Mohr-Coulomb method, using the tensile strength curve for standard conditions and accounting for rock strength anisotropy, was considered.

Conclusion. The results of the research make it possible to clarify the risks associated with drilling wells in open-hole instability intervals and to assess the stability of directional and horizontal wells.

Keywords: compressive strength, anisotropy, core tests, geomechanical modeling

Conflict of interest: the authors declare that there is no conflict of interest.

For citation: Kazantseva A.M., Korolev D.O., Subbotin M.D., Kuzmina S.S., Pavlyukov N.A. The effect of anisotropy of strength properties on borehole stability during drilling. PRONEFT. Professionally about oil. 2025;10(4):107–116. <https://doi.org/10.51890/2587-7399-2025-10-4-107-116>

Manuscript received 04.08.2025

Accepted 15.10.2025

Published 26.12.2025

ВВЕДЕНИЕ

При моделировании устойчивости ствола скважины при бурении важными задачами являются сохранение стабильности горных пород и сокращение воздействия на прискважинную зону. Для решения задач необходимо исследование упруго-прочностных свойств и впоследствии моделирование напряженно-деформированного состояния ствола вдоль скважины. К упруго-прочностным свойствам, необходимым для расчета устойчивости ствола, относятся: модуль Юнга, коэффициент Пуассона, прочность на одноосное сжатие и растяжение, угол внутреннего трения, коэффициент Биотта.

В данной статье рассмотрен параметр предела прочности породы при одноосном сжатии, который описывает деформацию горной породы при воздействии на нее неограниченного сжимающего усилия вдоль опре-

с соотношением длины к диаметру 2:1 [1, 2, 3]. В работе рассматриваются значения керновых исследований, проводимых под разными углами выпиленного керна: 0°, 30°, 45°, 60°, 90° — относительно плоскости напластования. По результатам керновых данных получена зависимость предела прочности и коэффициента анизотропии прочности от угла выпиленного керна, пересчитанного в зенитный угол скважины. С учетом полученной зависимости рассчитана устойчивость ствола скважины. Представлено сравнение расчётных градиентов по стандартным методикам и с учетом анизотропии прочности от угла. Поскольку глины могут проявлять анизотропию прочности на сдвиг по отношению к напластованию, ориентация кернового образца является значительной. Образец, длинная ось которого ортогональна (перпендикулярна) плоскости напластования, определяется как ориентация 90°, тогда как образец с длинной осью, параллельной напластованию, определяется как ориентация 0° (рис. 1).

Целью данной работы является установление зависимостей предела прочности на одноосное сжатие от ориентации керновых образцов породы и оценка влияния на расчётный градиент обрушений, путем проведения специализированных лабораторных исследований керна и геомеханического моделирования с учётом анизотропии прочности пород.

ДЛЯ РАСЧЕТА ЦЕЛОСТНОСТИ ПРОДУКТИВНЫХ ИНТЕРВАЛОВ И УСТОЙЧИВОСТИ СТВОЛА СКВАЖИНЫ В ПРОЦЕССЕ БУРЕНИЯ ПРЕДЛОЖЕН СПОСОБ, ВКЛЮЧАЮЩИЙ ОЦЕНКУ ГРАДИЕНТА ОБРУШЕНИЙ ПО МЕТОДУ КУЛОНА — МОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КРИВОЙ ПРЕДЕЛА АНИЗОТРОПИИ ПРОЧНОСТИ (ПАРАМЕТР UCS) ДЛЯ СТАНДАРТНЫХ УСЛОВИЙ.

деленного направления. Основной целью при испытаниях предела прочности на сжатие образцов керна является определение прочностных свойств породы для расчета целостности продуктивных интервалов и устойчивости ствола скважины.

Испытания предела прочности на одноосное сжатие обычно проводятся на образцах, расположенных вертикально (перпендикулярно плоскости напластования)

АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ПРЕДЕЛА ПРОЧНОСТИ НА ОДНООСНОЕ СЖАТИЕ

В настоящее время существует большое количество корреляционных зависимостей, позволяющих выполнить расчет предела прочности на одноосное сжатие.

Наиболее распространенным методом является зависимость Plumb (Plumb, 1994) от статического модуля Юнга [4]. Корреляция была предложена Диком Пламбом на основе его данных, опубликованных в 1994 году, и изменена в 2002 году. Зависимость может использоваться как для пород с пористой структурой, так и для пород с глинистой основой, не подтверждена в карбонатах.

$$UCS = 4,242 * E_{sta} \quad (1)$$

где E_{sta} — статический модуль Юнга, ГПа. Другие собранные из литературы и справочников зависимости представлены в **табл. 1**.

ЛАБОРАТОРНЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ПРЕДЕЛА ПРОЧНОСТИ НА ОДНООСНОЕ СЖАТИЕ

В практике существует несколько методов измерения прочности сжатия. Базовая методика измерения прочности на одноосное сжатие состоит в эксперименте на специализированном оборудовании, которое исследует прочностные свойства образцов керна без создания термобарических условий. Оборудование представляет собой камеру, где располагается образец, со встроенной системой осевого нагружения с гидравлическим приводом, установка оснащена датчиками измерения деформации скорости упругих волн (рис. 2). Требования по проведению лабораторного испытания представлено в регламентирующем документе ГОСТ 21153.2-84 «Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии» [10].

Для испытания используются специально приготовленные донасыщенные флюидом (нефтью, керосином и т.д.) цилиндрические образцы керна (без экстракции) диаметром 30–90 мм, длина к диаметру равна соотношению 2 к 1.

По результатам каждого эксперимента рассчитывается предел прочности при одноосном сжатии по формуле:

$$UCS = K \cdot \frac{F}{S} \cdot 10, \quad (2)$$

где F — разрушающая сила, приложенная к образцу, в кН, S — площадь поперечного сечения образца в см^2 , K — поправочный коэффициент на размер образца.

Одной из возможных методик оценки предела прочности является проведение скретч-тестирования, основанного на контролируемом царапании, измерения усилия на резце при постоянной скорости и контролируемой

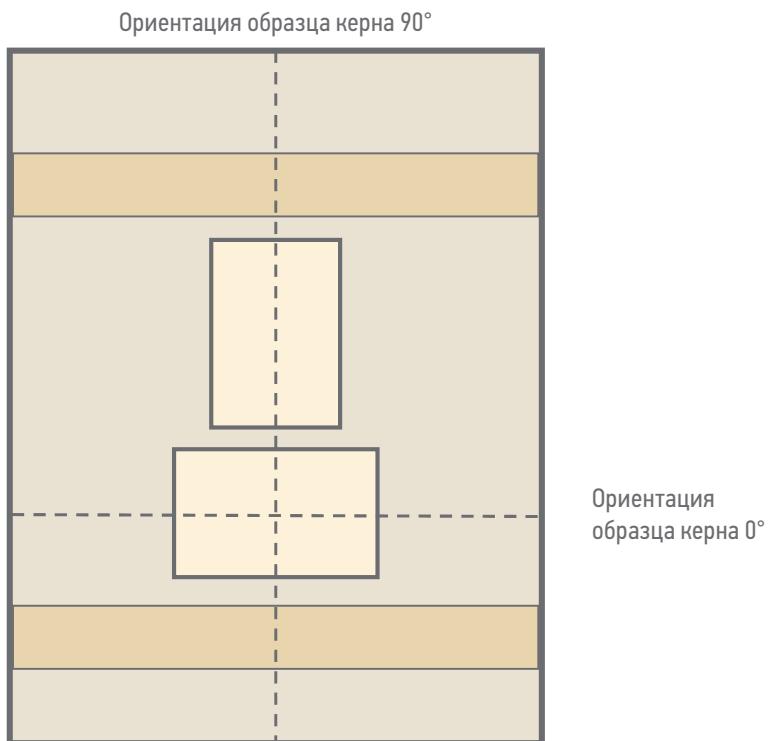


Рис. 1. Схематическое представление ориентации керновых образцов.
Составлено авторами

Fig. 1. Schematic representation of the orientation of core samples.
Prepared by the authors

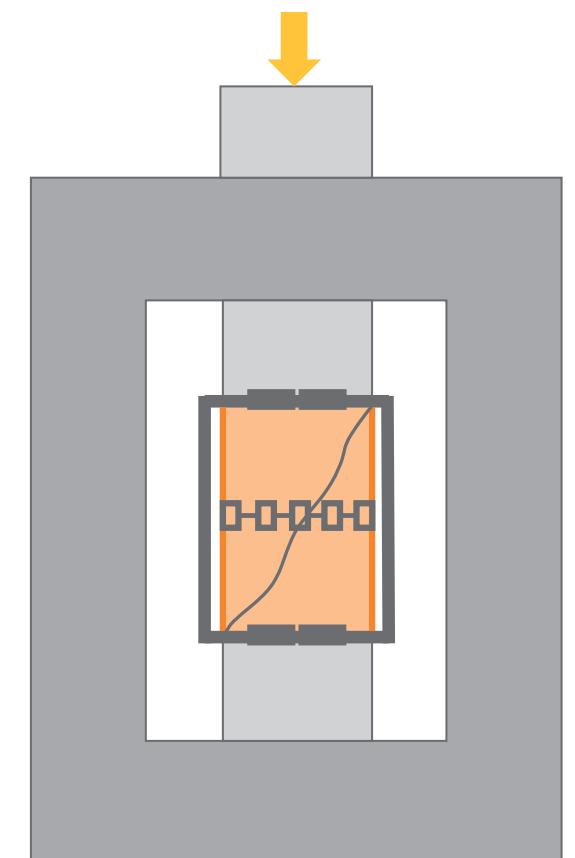


Рис. 2. Проведение лабораторных исследований по определению предела прочности на одноосное сжатие [3]

Fig. 2. Conducting laboratory tests to determine the ultimate strength of uniaxial compression [3]

Таблица 1. Наиболее распространенные корреляционные зависимости для оценки предела прочности при одноосном сжатии.
Составлено авторами

Table 1. The most common correlation dependencies for assessing the ultimate strength under uniaxial compression. Prepared by the authors

Название	Описание	Формула
Plumb Porosity Upper Bound Correlation [4]	Используется как кривая контроля качества верхней границы, для идентификации данных. Подходит для песчаников	$UCS = 437 \cdot (1 - 2,22 \cdot \phi)^{3,6756}$
Brie Shear Modulus	Корреляция прочности на основе динамического модуля сдвига породы и ее литологии. Подходит для глинистых пород и песчаников	Для песчаников: $UCS = 5,6 \cdot 10^{-6} \cdot G_{Ref_{Sand}} \cdot \frac{G_{dyn}}{G_{Ref_{Sand}}}$. Для глин: $UCS = 12 \cdot 10^{-6} \cdot G_{Ref_{Shale}} \cdot \frac{G_{dyn}}{G_{Ref_{Shale}}}$
Plumb Shear Modulus Correlation [4]	Основана на динамическом модуле сдвига, применяется в основном к песчаникам и алевролитам	$UCS = 0,12 \cdot (G_{dyn})^{2,3}$
Plumb Porosity Correlation [4]	Используется при отсутствии данных акустического каротажа. Не подтверждена в карбонатах	Для песчаников: $UCS = 243 \cdot (1 - 2,857 \cdot \phi)^2$ Для глин: $UCS = 70 \cdot (1 - 2,222 \cdot \phi)^2$
Plumb Sandstone Young Modulus Correlation [5]	Используется для песчаников	$UCS = 2,280 + 4,1089 \cdot E_{sta}$
Rzhevsky and Novick Carbonate Porosity Correlation [6]	Корреляция от пористости, используется в карбонатах	$UCS = 276 \cdot (1 - 3 \cdot P)^2$
Horsrud Correlation [7]	Для высокопористых мелкозернистых пород	$UCS = 0,77 \cdot \left(\frac{304,8}{DTCO} \right)^{2,93}$
McNally Correlation [8]	Для мелкозернистых песчаников с разной пористостью	$UCS = 1200 \cdot \exp^{-0,036 * DTCO}$
Lacey Correlation	Корреляция подходит для расчета различных типов пород	$UCS = 0,2787 \cdot E_{sta}^2 + 2,458 \cdot E_{sta}$
Farqhar Correlation	Используется для расчета карбонатов	$UCS = 174,8 \cdot e^{-9,3\phi}$
Ameen Correlation	Используется для расчета доломитов	$UCS = 62,567 \cdot e^{-2,03\phi}$
Ameen Correlation	Используется для расчета известняков	$UCS = 89,432 \cdot e^{-5,46\phi}$
Lashkaripour Correlation [9]	Используется для расчета глинистых сланцев	$UCS = 193,4 \cdot \phi^{-1,143}$

Примечание: ϕ — эффективная пористость, %; G_{dyn} — динамический модуль сдвига, Mpsi; E_{sta} — статический модуль Юнга, ГПа, G_{Ref} — справочный модуль сдвига; $G_{Ref_{Sand}}$ — справочный модуль сдвига для песчаника; $G_{Ref_{Shale}}$ — справочный модуль сдвига для глин; P — пористость, %; $DTCO$ — акустическая продольная волна, мс/м.

глубине резца (рис. 3) [11]. Усилие характеризует предел прочности при одноосном сжатии. Общая формула, выражающая предел прочности на сжатие, является следующей [11]:

$$UCS = k \cdot (Ft - \mu \cdot Fn) / (w \cdot (d - \alpha \cdot Fn)), \quad (3)$$

где Ft — продольный компонент усилия, Н; Fn — вертикальный компонент усилия, Н; μ — коэффициент трения резца по породе; w — ширина резца, мм; d — глубина заглубления, мм; α — вертикальная жесткость измерительной системы, Н/мм; k — константа пропорциональности.

Также существует еще один способ измерения прочности на одноосное сжатие с помощью прибора — молотка Шмидта. Метод измерения основан на определении ударного импульса, возникающего после приложения нагрузки. Прочность определяется по высоте отсюда бойка с помощью

установленных градуированных зависимостей [12].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОЦЕНКИ АНИЗОТРОПИИ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ НА УСТОЙЧИВОСТЬ СТВОЛА СКВАЖИНЫ

Распространение анизотропии связано с внутренней структурой породы, ее минералогическим составом, ориентацией внутренних включений и слоистостью, что приводит к различиям в механических свойствах по разным направлениям исследования. Эти различия могут проявляться в виде повышенной чувствительности к нагрузкам в определенных направлениях, что увеличивает риск возникновения локальных деформаций и обрушений стенок скважины. Лабораторные исследования выполнены на образцах керна с помощью испытания на одноосное сжатие, представленного выше

(рис. 2). Прочность на одноосное сжатие является ключевым параметром при оценке градиента обрушений, который также влияет на его величину. Одноосное испытание особенно важно для анализа устойчивости открытого ствола скважины и воздействия на породу во время бурения. Критерии прочности (например, Мора и Треска) основаны на данных одноосных испытаний, позволяющие оценить границы прочности породы под распределенными нагрузками по бокам скважины.

Образцы отобраны с интервалов пластов X, Y, Z рассматриваемого месторождения Красноярского края. Образцы керна представлены тремя типами литологии:

- алевролитами мелкозернистыми, глинистыми плотными, некоторые со слабокарбонатизированными слойками;
- песчаником, насыщенным углеводородами, средне-мелкозернистым, с карбонатно-глинистым цементом, неравномерно пористым;
- аргиллитами алевролитистыми, со стяжениями пирита, плотными.

Керновые образцы были разделены на группы по двум критериям: схожей литологией и геолого-физическими свойствами горных пород (пористости, проницаемости, плотности). В табл. 2 представлены исследуемые группы, их свойства и описание.

Для алевролитов получилось собрать шесть групп с разными углами исследования, для песчаников и аргиллитов — по одной группе, всего исследовано 36 образцов. В каждой из групп присутствуют образцы с разными направлениями исследования, включающие углы 0°, 30°, 45°, 60°, 90°.

Для наибольшего понимания в табл. 3 приведены сопоставления углов.

Для дальнейшего упрощения и сопоставления с зенитным углом углы тестирования

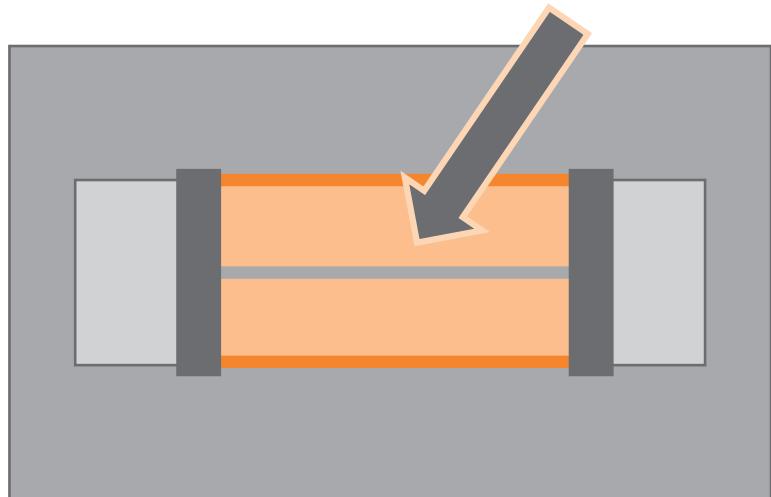


Рис. 3. Проведение лабораторных исследований по определению предела прочности на одноосное сжатие скретч-тестом. Составлено авторами

Fig. 3. Laboratory tests to determine the ultimate uniaxial compressive strength using a scratch test. Prepared by the authors

образцов керна были инвертированы и рассматривались далее относительно вертикали (рис. 4).

Выполнено построение корреляционных зависимостей по каждой литологической группе от угла направления исследований образцов керна (относительно вертикали), чтобы проанализировать полученные уравнения и тренды (рис. 5).

По построенному графику видно, что результаты лабораторных исследований описываются едиными трендами для всех представленных пород. Влияние угла ориентации образцов керна для рассматриваемых литотипов является значительным.

В результате анализа данных получен единый тренд для определения предела прочности при одноосном сжатии в зависимости от ориентации образцов при лабораторных исследованиях керна. Полученный

Таблица 2. Геолого-физические характеристики исследуемых групп образцов. Составлено авторами
Table 2. Geological and physical characteristics of researches sample groups. Prepared by the authors

№ группы	Пласт	Литотип	Кол-во образцов	Пористость	Проницаемость	Плотность мин.
				%	10^{-3} мкм^2	$\text{г}/\text{см}^3$
1	X	Алевролит	5	7,8	0,15	2,7
2	X	Алевролит	5	5,6	0,05	2,68
3	X	Алевролит	5	-	-	-
4	X	Алевролит	4	7	0,03	2,69
5	X	Алевролит	3	7	0,02	2,67
6	Y	Алевролит	4	8,1	0,07	2,7
7	Y	Песчаник	5	8,1	0,07	2,7
8	Z	Аргиллит	5	-	-	-

Таблица 3. Сопоставление углов ориентации образцов керна.

Составлено авторами

Table 3. Comparison of orientation angles of core samples. Prepared by the authors

Направление при лабораторных исследованиях образцов керна	Ориентация углов при бурении (сопоставление с зенитным углом при записи инклинометрии)
0 (параллельно напластованию)	90 (горизонтальный участок ствола скважины)
30	60
45	45
60	30
90 (перпендикулярно напластованию)	0 (вертикальный участок ствола скважины)

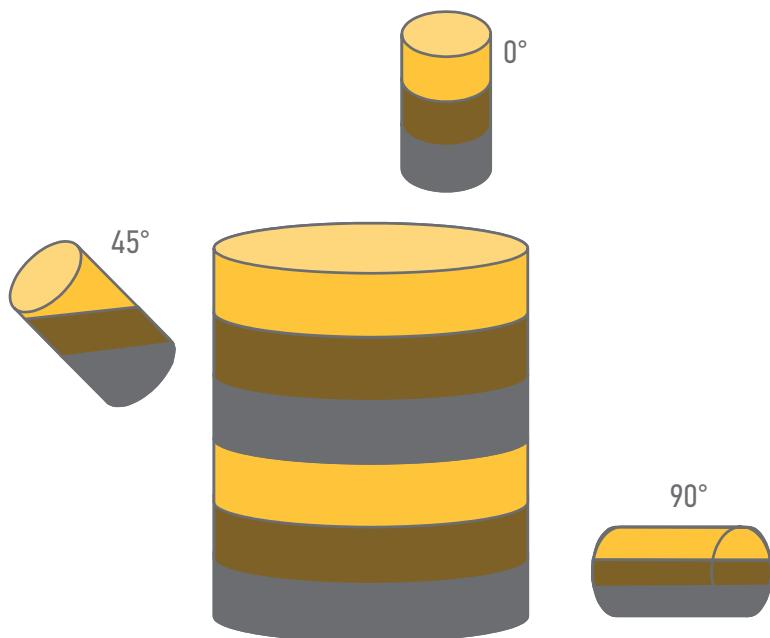


Рис. 4. Ориентация керновых образцов относительно вертикали.

Составлено авторами

Fig. 4. Orientation of core samples relative to the vertical. Prepared by the authors

тренд может быть использован для оценки градиента обрушений при бурении с учётом анизотропии прочности горных пород.

При проведении испытаний на одноосное сжатие важно учитывать, как направление приложения нагрузки влияет на результат. Если нагрузка приложена перпендикулярно плоскости напластования, предел прочности может быть максимальным. Однако если нагрузка направлена под углом, то это может привести к снижению прочности из-за возникновения дополнительных напряжений и деформаций.

Для расчета предела прочности на сжатие при изменении зенитного угла выведен коэффициент анизотропии прочности, который характеризует изменение прочности,

в зависимости от угла выпиловки образцов керна (рис. 6).

С помощью полученной зависимости выведен тренд коэффициента анизотропии прочности от зенитного угла. Получено три уравнения для интервалов: 0–15°, 15–75°, 75–90°. После посчитан предел прочности на сжатие с учетом полученных уравнений, что показывает изменения и влияние прочности по отношению к расположению породы от угла атаки при бурении.

Прочностные свойства горной породы имеют прямую зависимость на напряженно-деформируемое состояние горной породы. При геомеханическом моделировании устойчивости ствола скважины оцениваются безопасные границы бурения, которые представлены следующими градиентами: порового давления, обрушений, поглощения и авто-ГРП (авто-гидроразрыв пласта). Расчётные градиенты зависят от многих эмпирических параметров; так, градиент обрушений зависит от таких параметров, как модуль Юнга, коэффициент Пуассона, угол внутреннего трения, прочность на сжатие, поровое давление и т. д. В качестве примера рассмотрим влияние анизотропии прочностных свойств на напряженно-деформированное состояние горной породы на опорной скважине. Для сравнения представлен расчет устойчивости ствола скважины с изменением параметра предела прочности пород на сжатие без учета (1) и с учетом анизотропии прочности (2) (рис. 7).

Моделирование выполнялось в программе «РН-СИГМА», предназначенного для геомеханического моделирования [13, 14].

Результатом расчета на проектной наклонно направленной скважине с горизонтальным окончанием является определение безопасного окна при бурении. В результате расчёта получены градиенты обрушения, ГНВП (газонефтеводопроявления), поглощения и ГРП. На рис. 7 представлено сравнение расчётных градиентов обрушений с учётом анизотропии прочности пород (трек № 5) и без (трек № 4). Согласно полученным результатам отмечается, что учёт влияния анизотропии прочности пород в условиях высоких зенитных углов в значительной степени повышает градиент обрушений, что, в свою очередь, сужает безопасное окно допустимой эквивалентной статической плотности бурового раствора. Для рассмотрения влияния предела прочности на градиент обрушений построен график чувствительности от параметров, выявленных по разным методикам расчета предела прочности на сжатие, представленным в табл. 2. При этом прочие параметры, влияющие на оценку градиента обрушений, сохранились неизменными. На примере приведена

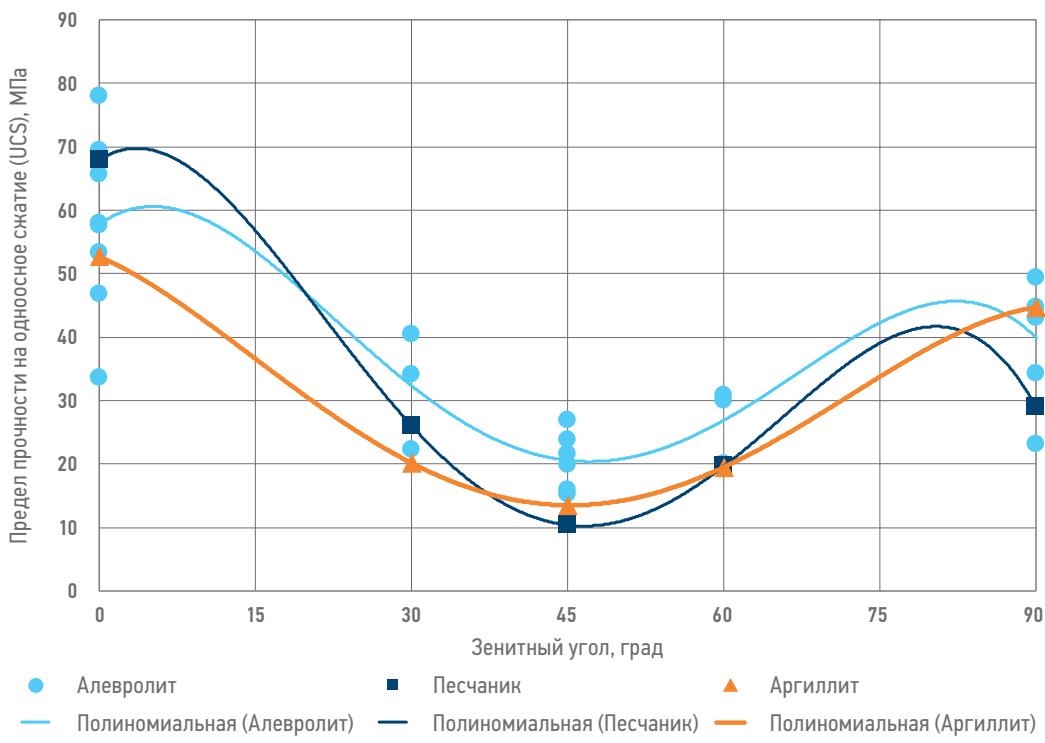


Рис. 5. Зависимость предела прочности на одноосное сжатие (UCS, MPa) от ориентации углов при бурении.
Составлено авторами

Fig. 5. Dependence of the compressive strength limit by lithotypes on the orientation of the angles during drilling.
Prepared by the authors

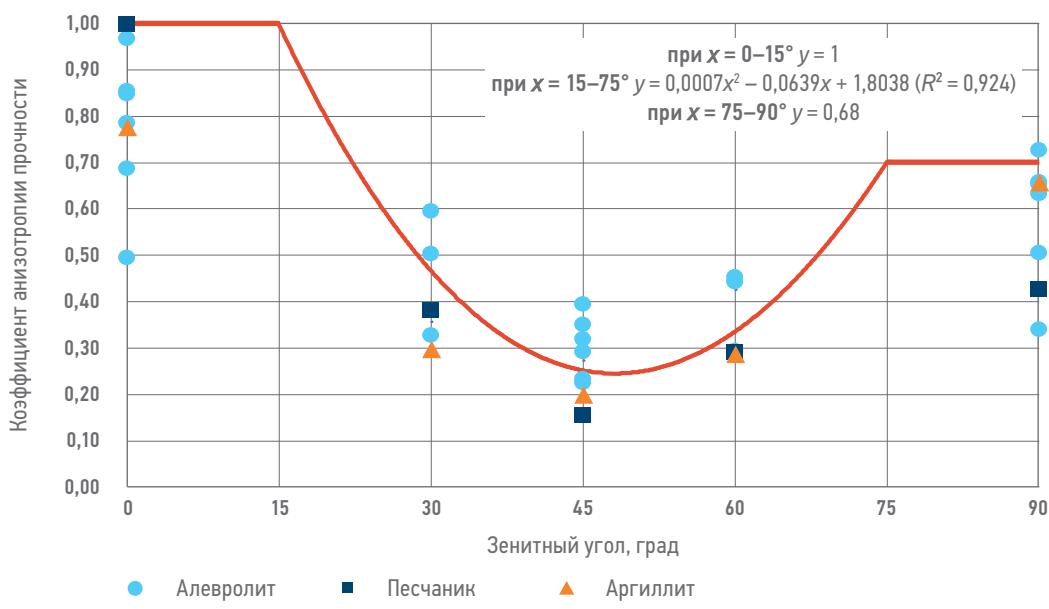


Рис. 6. Зависимость коэффициента анизотропии прочности от ориентации углов при бурении.
Составлено авторами

Fig. 6. Dependence of the strength anisotropy coefficient on the orientation of angles during drilling.
Prepared by the authors

наклонно направленная скважина с горизонтальным окончанием, в табл. 4 представлены входные данные, используемые при оценке чувствительности расчётного градиента обрушений.

Оранжевый блок показывает значение градиента обрушений, рассчитанного

от предела прочности, полученного на керне без учёта анизотропии прочности пород, синий блок — с применением коэффициента анизотропии прочности от зенитного угла, данная методика описана ниже (рис. 8). Серыми блоками отображен градиент обрушений при расчете предела прочности

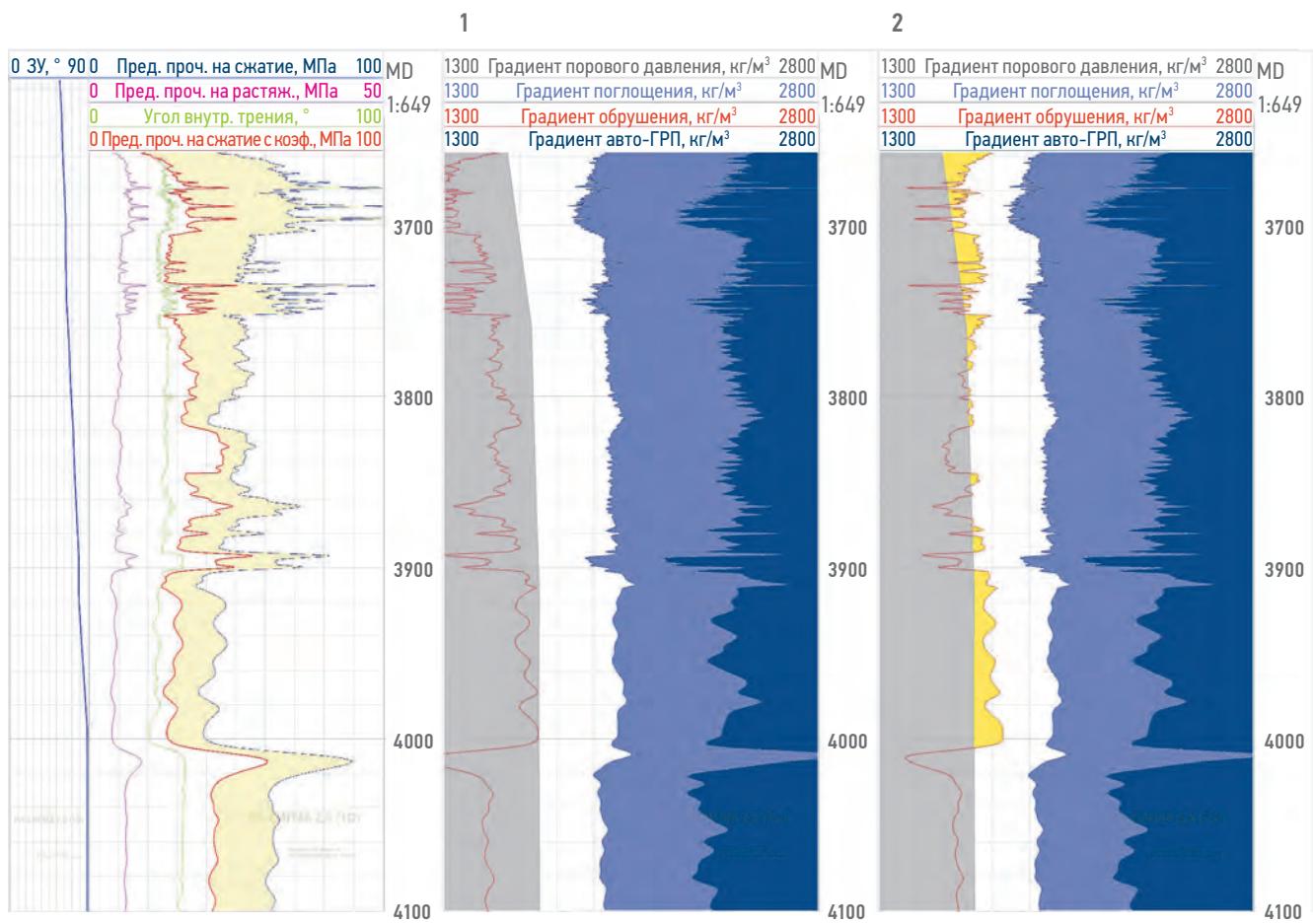


Рис. 7. Соотношение рассчитанных пределов прочности по разным способам на рассматриваемом интервале вскрытия пласта (1 (слева) — без учета анизотропии прочности, 2 (справа) — с учетом анизотропии прочности). Составлено авторами

Fig. 7. The ratio of the calculated ultimate strengths using different methods for the considered interval of formation opening (1 (left) — without taking into account the anisotropy of strength, 2 (right) — taking into account the anisotropy of strength). Prepared by the authors

на сжатие по зависимостям Plumb, Brie, Horsrud, McNally.

Из рис. 8 видно, что методика расчета предела прочности на сжатие оказывает значительное влияние на градиент обрушений, диапазон изменения для рассмотренного примера от 1,32 до 1,72 г/см³. Подобная неопределенность градиента обрушений при бурении является критической, особенно в условиях узкого безопасного окна бурения. Выбор неверного метода расчета может привести к недооценке градиента обрушений и, как следствие, к неверному подбору плотности бурового раствора. В этом случае возможно возникновение

следующих осложнений: осьпи, обвалы, карвенообразование. Перечисленные осложнения приводят к затяжкам и посадкам бурильной колонны, а также более серьезным последствиям: прихват и заклинка бурового инструмента, недоспуск компоновок заканчивания.

Для успешного прогнозирования стабильности ствола скважины в сложных геологических условиях необходимо корректное определение предела прочности на сжатие и всех параметров, влияющих на его расчет, в том числе коэффициента анизотропии прочности породы при воздействии на нее под разными углами атаки.

Таблица 4. Входные данные. Составлено авторами
Table 4. Input data. Prepared by the authors

Глубина	Зенитный угол	Азимут	Поровое давление	Вертикальное напряжение	Угол внутреннего трения	Коэффициент Био	Минимальное горизонтальное напряжение	Максимальное горизонтальное напряжение
М	град	град	атм	атм	град	-	атм	атм
3616	58	72	490	712	23,7	0,9	616	631

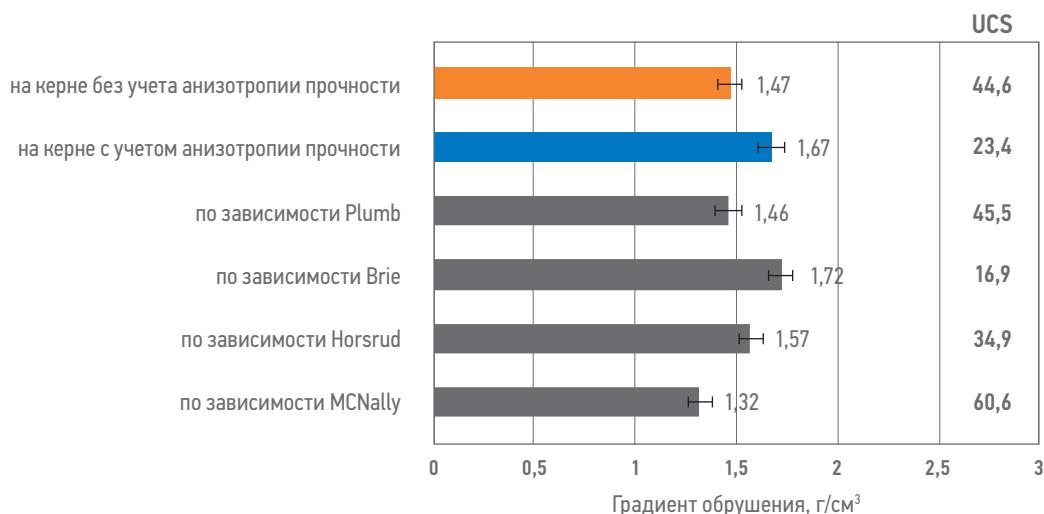


Рис. 8. График чувствительности градиента обрушений от предела прочности на сжатие, рассчитанного по различным корреляционным зависимостям. Составлено авторами

Fig. 8. Graph of the sensitivity of the collapse gradient to the compressive strength limit, calculated using various correlation dependencies. Prepared by the authors

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные лабораторные исследования керна, выпиленного под разным углом, на определение предела прочности на сжатие показывают значительную зависимость прочностных характеристик от анизотропии. Для рассмотрения влияния анизотропии прочности на корреляционных зависимостях введен новый параметр — коэффициент анизотропии прочности, который описывает изменение прочности породы от ориентации исследования.

Выявлено существенное влияние угла траектории скважины на прочность породы при рас-

четах градиента начала обрушений с учетом коэффициента анизотропии прочности. Прочность уменьшается к 45° , после возрастает, при угле 90° прочность ниже, чем при 0° . Применение приведенных корреляционных зависимостей позволяет более точно спрогнозировать градиент начала обрушений, что особенно критично для зон с неустойчивыми пачками глин, при решении задач бурения и вскрытия целевых пластов. Для обеспечения стабильности стенок скважины необходимо разрабатывать режимы бурения и укрепления стенок скважины с учетом анизотропных особенностей прочностных характеристик породы.

Список литературы

1. McPhee C, Reed J, Zubizarreta I. Core Analysis: a best practice guide. — 2015. — 840 p.
2. ГОСТ 21153.0-75. Породы горные. Отбор проб и общие требования к методам физических испытаний. — М.: Издательство стандартов, 1981. — 3 с.
3. Павлов В.А., Кулешов В.С., Королев Д.О. и др. Практическое руководство по геомеханическому моделированию для решения задач разработки месторождений нефти и газа // ООО «Тюменский нефтяной научный центр». — Тюмень: ИПЦ «Экспресс», 2023. — 440 с.
4. Plumb R.A. Influence of Composition and Texture on the Failure Properties of Clastic Rocks: Society of Petroleum Engineers // Rock Mechanics in Petroleum Engineering. — 1994. — Pp. 13–20. <https://doi.org/10.2118/28022-MS>
5. Bradford I.D.R. etc. Benefits of assessing the solids production elastoplastic modeling // SPIWSRM 47360, Jul 1998.
6. Chandong Chang, Mark D. Zoback, etc. Empirical relations between rock strength and physical properties in sedimentary rocks // Journal of Petroleum Science and Engineering. — 2006. — № 51. — Pp. 223–237.
7. Horsrud P. Estimating mechanical properties of shale from empirical correlations' // SPE Drill Complet. — 2001. — № 16. — Pp. 68–73.
8. McNally G.H. Estimation of coal measures rock strength using sonic and neutron logs // Geoexploration Amsterdam. — 1987. — Vol. 24, no. 4–5. — Pp. 381–395.
9. Lashkaripour G.R. Predicting Mechanical Properties of Mudrock from index parameters // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. — 2002. — № 61. — Pp. 73–77. <https://doi.org/10.1007/s100640100116>
10. ГОСТ 21153.2-84 «Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии». — 1986. — 8 с.
11. Торопецкий К.В., Борисов Г.А., Самойлов М.И., Ельцов И.Н. Расширенный метод контролируемого царапанья как источник геомеханических данных // Российская нефтегазовая техническая конференция SPE 12–14 октября 2020 г. Москва.
12. Харисов Т.Ф. Оценка предела прочности пород в образце с использованием молотка Шмидта // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. — 2020. — № 4. — С. 306–314.
13. Даалетова АР, Киреев В.В., Кнутова С.Р., Пестриков А.В., Федоров А.И. Разработка корпоративного геомеханического симулятора для моделирования устойчивости ствола скважины // Нефтяное хозяйство. — 2018. — № 6. — С. 88–92.
14. Ардисламова Д.Р., Даалетова А.Р., Закирзянов ШИ, Пестриков А.В., Судеев И.В., Федоров А.И., Шамсутдинова ЕР, Хакимов А.А., Абушаев Р.Н. Расчет напряженного состояния на участке Северо-Комсомольского месторождения с использованием нового корпоративного 3D-симулятора РН-СИГМА // Экспозиция Нефть Газ. — 2023. — № 3. — С. 38–43.

References

1. McPhee C., Reed J., Zubizarreta I. *Core Analysis: a best practice guide*. — 2015. — 840 p.
2. GOST 21153.0-75. Rocks. Sampling and general requirements for physical testing methods. Moscow: Publishing House of Standards, 1981. 3 p.
3. Pavlov V.A., Kuleshov V.S., Korolev D.O., et al. *Practical guide to geomechanical modeling for solving oil and gas field development problems*. Tyumen Oil Research Center, LLC. — Tyumen: IPC Express, 2023. — 440 p.
4. Plumb R.A. Influence of composition and texture on the failure properties of clastic rocks: society of petroleum engineers. *Rock Mechanics in Petroleum Engineering*. 1994, pp. 13–20. <https://doi.org/10.2118/28022-MS>
5. I.D.R. Bradford etc. Benefits of assessing the solids production elastoplastic modeling. *SPIE SPM 47360*, Jul 1998.
6. Chandong Chang, Mark D. Zoback, etc. Empirical relations between rock strength and physical properties in sedimentary rocks. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2006, no. 51, pp. 223–237.
7. Horsrud P. Estimating mechanical properties of shale from empirical correlations. *SPE Drill Complet*. 2001, no. 16, pp. 68–73.
8. McNally G.H. Estimation of coal measures rock strength using sonic and neutron logs. *Geoexploration Amsterdam*. 1987, vol. 24, no. 4–5, pp. 381–395.
9. Lashkaripour G.R. Predicting Mechanical Properties of Mudrock from index parameters. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2002, no. 61, pp. 73–77. <https://doi.org/10.1007/s100640100116>
10. GOST 21153.2-84. *Rocks. Methods for Determining the Ultimate Strength under Uniaxial Compression*. 1986. 8 p.
11. Toropetskiy K.V., Borisov G.A., Samoilov M.I., Yeltsov I.N. Advanced Controlled Scratching Method as a Source of Geomechanical Data. *Russian Petroleum Technology Conference SPE*, October 12–14, 2020, Moscow.
12. Kharisov T.F. Estimation of rock strength limit in a sample using a schmidt hammer // *Bulletin of Tula State University. Earth Sciences*. 2020, no. 4, pp. 306–314.
13. Davletova A.R., Kireev V.V., Knutova S.R., Pestrikov A.V., Fedorov A.I. Development of a Corporate Geomechanical Simulator for Modeling Wellbore Stability. *Oil Industry*. 2018, no. 6, pp. 88–92.
14. Ardislamova D.R., Davletova A.R., Zakiryanov Sh.I., Pestrikov A.V., Sudeev I.V., Fedorov A.I., Shamsutdinova E.R., Khakimov A.A., Abushaev R.N. Calculation of the stress state at the Severo-Komsomolskoye field site using the new corporate 3D simulator RN-SIGMA. *Exposure Oil Gas*. 2023, no. 3, pp. 38–43.

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

А.М. Казанцева — введение, интерпретация, анализ и обобщение результатов, основная часть, финальное редактирование.

Д.О. Королев — планирование исследований, основная часть, финальное редактирование.

М.Д. Субботин — проверка результатов, финальное редактирование.

С.С. Кузьмина — проверка результатов, финальное редактирование.

Н.А. Павлюков — заключение, финальное редактирование.

Agata M. Kazantseva — introduction, interpretation, analysis, and summary of results, main body, final editing.

Dmitry O. Korolev — research planning, main body, final editing.

Mikhail D. Subbotin — results review, final editing.

Svetlana S. Kuzmina — results review, final editing.

Nikolai A. Pavlyukov — conclusion, final editing.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Агата Михайловна Казанцева* — ведущий специалист отдела разработки проектов геомеханики, ООО «РН-Геология Исследования Разработка» 625002, Россия, г. Тюмень, ул. Осипенко, д. 79/1. e-mail: AM_Kazantseva@rn-gir.rosneft.ru

Agata M. Kazantseva* — Leading specialist, Geomechanics Project Development Department, RN-Geologia Research Development 79/1, Osipenko str., 625002, Tyumen, Russia. e-mail: AM_Kazantseva@rn-gir.rosneft.ru

Дмитрий Олегович Королев — руководитель группы отдела разработки проектов геомеханики, ООО «РН-Геология Исследования Разработка»

Dmitry O. Korolev — Team leader, Geomechanics Project Development Department, RN-Geologia Research Development

Михаил Дмитриевич Субботин — менеджер отдела разработки проектов геомеханики, ООО «РН-Геология Исследования Разработка»

Mikhail D. Subbotin — Manager, Geomechanics Project Development Department, RN-Geologia Research Development

Светлана Сергеевна Кузьмина — менеджер отдела разработки проектов геомеханики, ООО «РН-Геология Исследования Разработка»

Svetlana S. Kuzmina — Manager, Geomechanics Project Development Department, RN-Geologia Research Development

Николай Алексеевич Павлюков — начальник отдела разработки проектов геомеханики, ООО «РН-Геология Исследования Разработка»

Nikolay A. Pavlyukov — Head of Geomechanics Project Development Department, RN-Geologia Research Development

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author