



## ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ СДВИГУ СКАЛЬНЫХ ГРУНТОВ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И РАСЧЕТНЫЕ МЕТОДЫ

Поступила в редакцию: 8.12.2025

Принята к публикации 23.12.2025

Опубликована 30.01.2026

### ФРОЛОВА Ю.В.

Профессор кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, д. г.-м. н., доцент, г. Москва, Россия  
ju\_frolova@mail.ru

### БОЛЬШАКОВ И.Е.

Старший научный сотрудник кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, к. г.-м. н., г. Москва, Россия  
bolshakov.ilya.210@yandex.ru.

### ЗЕРКАЛЬ О.В.

Старший научный сотрудник кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, д. г.-м. н., г. Москва, Россия  
igzov@mail.ru

### АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрены основные методы определения параметров прочности на сдвиг скальных грунтов – удельного сцепления и угла внутреннего трения, которые необходимы при решении многих инженерно-геологических задач, например при расчетах устойчивости склонов различной природы, откосов и бортов карьеров, при проектировании гидротехнических сооружений и пр. В зависимости от решаемой задачи определение сдвиговых характеристик может быть проведено на образцах ненарушенной породы, по поверхностям ослабления или для скального массива.

Описаны три разных метода определения прочности на сдвиг и получения предельной огибающей для стандартных образцов скальных грунтов. На примере известняков Московского региона проведено сопоставление результатов использования разных методов. Рассмотрены основные методы определения сдвиговых характеристик по трещине и приведены результаты выполненных экспериментов на срез по трещине для метавулканитов одного из месторождений Дальневосточного региона. Показаны тенденции изменений сцепления и угла внутреннего трения в зависимости от величины нормального напряжения и, соответственно, от глубины отбора образца. Сравнение сдвиговых характеристик метавулканитов, полученных при испытаниях стандартных образцов и трещин, выявило различия в величинах сцепления на 2–3 порядка. Рассмотрены основные методы определения прочности на сдвиг для массивов скальных грунтов. Приведен пример получения предельной огибающей и расчета сцепления и угла внутреннего трения по модели Хоека – Брауна для массива метавулканитов. Показана зависимость сдвиговых характеристик скального массива от величины действующих напряжений.

### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

скальный грунт; прочность на сдвиг; удельное сцепление; угол внутреннего трения; предельная огибающая; трещина; методы определения прочности на сдвиг

### ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Фролова Ю.В., Большаков И.Е., Зеркаль О.В. Особенности определения параметров сопротивления сдвигу скальных грунтов. Экспериментальные и расчетные методы // Геоинфо. 2025. Т. 7. № 4. С. 22–31. DOI:10.58339/2949-0677-2025-7-4-22-31.

# SPECIFICS OF DETERMINING SHEAR STRENGTH PARAMETERS OF ROCKS. EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL METHODS

Received: 8.12.2025

Accepted for publication 23.12.2025

Published 30.01.2026

## FROLOVA Ju.V.

Professor at the Department of Engineering and Environmental Geology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, DSc, Associate Professor, Moscow, Russia  
ju\_frolova@mail.ru

## BOL'SHAKOV I.E.

Senior Researcher at the Department of Engineering and Environmental Geology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, PhD, Moscow, Russia  
bolshakov.ilya.210@yandex.ru

## ZERKAL' O.V.

Senior Researcher at the Department of Engineering and Environmental Geology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, DSc  
igzov@mail.ru

## ABSTRACT

The article discusses the key methods to determine the shear strength parameters of rocks such as cohesion and internal friction angle. These parameters are required for solving many engineering-geological problems such as stability analysis for various types of slopes, cut slopes, embankment slopes, quarry walls, as well as for the design of hydraulic engineering structures, etc. Depending on the problem being solved, the determination of shear characteristics can be performed for intact rock specimens, along discontinuity surfaces (joints), or for a rock mass as a whole.

We describe three different methods for determining shear strength and obtaining failure envelopes for standard rock specimens. Using limestones from the Moscow region as an example, the results obtained by these different methods are compared. The study considers the key methods for determining shear characteristics along rock joints and presents joint shear test results for metavolcanic rocks from the Far East region. The article demonstrates how cohesion and internal friction angle change with normal stress and, consequently, with depth. A comparison of the shear strength characteristics of metavolcanic rocks obtained by testing of intact specimens and rock joints revealed differences in cohesion by 2–3 orders of magnitude. The paper also discusses the key methods for determining shear strength of rock masses. We present an example of obtaining a failure envelope and calculating cohesion and internal friction angle using the Hoek-Brown model for a metavolcanic rock mass. The dependence of rock mass shear characteristics on the magnitude of the applied stresses is shown.

## KEYWORDS:

rock; shear strength; cohesion; internal friction angle; failure envelope; joint; shear strength determination methods.

## FOR CITATION:

Frolova Ju.V., Bol'shakov I.E., Zerkal' O.V. Osobennosti opredeleniya parametrov soprotivleniya sdvigu skal'nykh gruntov. Eksperimental'nye i raschetnye metody [Specifics of determining shear strength parameters of rocks. Experimental and analytical methods] // *GeoInfo*. 2025. T. 7. № 4. S. 22–31. DOI:10.58339/2949-0677-2025-7-4-22-31 (in Rus.).

## ВВЕДЕНИЕ ►

При решении многих инженерно-геологических задач, в частности для расчетов устойчивости склонов, откосов, бортов карьеров, необходимы параметры прочности на сдвиг – удельное сцепление ( $C$ ) и угол внутреннего трения ( $\varphi$ ) [1]. Традиционно они определяются по закону Кулона, который предполагает линейную зависимость между касательными и нормальными напряжениями:

$$\tau = \sigma_n \cdot \operatorname{tg} \varphi + C, \quad (1)$$

где  $\tau$  – касательное напряжение;  $\sigma_n$  – нормальное напряжение.

Однако линейная форма зависимости является лишь частным случаем, тогда как в общем случае данная зависимость имеет нелинейный характер. Соответственно, сдвиговые характеристики не являются константами, а зависят от величин напряжений, при которых они определяются: чем выше напряжения, тем больше сцепление и меньше угол внутреннего трения. Тенденции изменений параметров прочности на сдвиг в зависимости от нормальных напряжений наглядно показана на рисунке 1, заимствованном из работы Э. Хоека (Э. Хука) и Э.Т. Брауна [2].

Сложность определения сдвиговых характеристик скальных грунтов заключается не только в нелинейном характере предельной огибающей, но также и в том, что ее форма и степень нелинейности различны у разных типов грунтов. Другая проблема заключается в том, что массивы скальных грунтов находятся в напряженном состоянии вследствие воздействия гравитационных сил, которые на больших глубинах могут достигать значительных величин (например, при строительстве подземных сооружений – горных выработок, тоннелей, хранилищ и пр.), а также тектонических сил, характерных для гор-

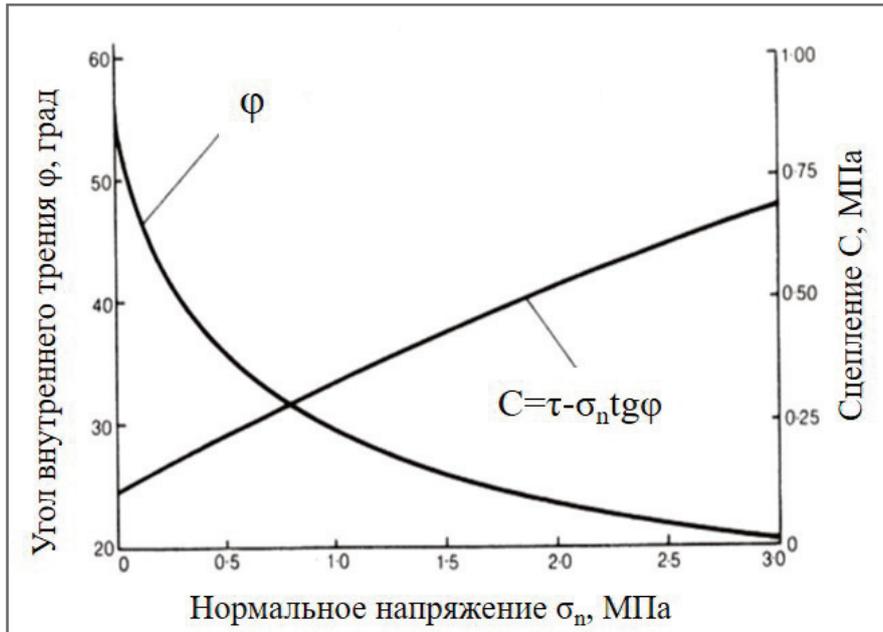


Рис. 1. Тенденции изменений сцепления  $C$  и угла внутреннего трения  $\varphi$  в зависимости от величины нормального напряжения [2]

но-складчатых областей. Соответственно, это необходимо учитывать при определении прочности на сдвиг.

В зависимости от решаемой задачи определить параметры прочности на сдвиг можно на образцах ненарушенной породы, по трещине или для скального массива.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЧНОСТИ НА СДВИГ НА ОБРАЗЦАХ СКАЛЬНЫХ ГРУНТОВ**

Есть три основных способа определения сдвиговых характеристик образцов скальных грунтов [3, 4]:

1. Построение паспорта прочности по данным прочности на одноосное сжатие и растяжение.
2. Срез со сжатием.
3. Объемное сжатие.

**Построение предельной огибающей по результатам определения прочности на одноосное сжатие ( $R_c$ ) и растяжение ( $R_p$ )** является наиболее простым и часто используемым методом. Он заключается в том, что в координатах «касательные напряжения ( $\tau$ ) – нормальные напряжения ( $\sigma_n$ )» строятся предельные круги Мора, соответствующие прочности на одноосное сжатие [5] и растяжение [6], и проводится их оги-

бающая – либо линейная в виде касательной к кругам, либо нелинейная, с использованием эмпирического уравнения, указанного в ГОСТ 21153.8-88 [3] (рис. 2). Преимуществом данного метода является то, что он не требует специального оборудования кроме пресса. Однако его можно применять для определения сдвиговых характеристик лишь при небольших давлениях, тогда как в области высоких напряжений можно ожидать большой погрешности и расхождения результатов с реальными величинами.

**Срез со сжатием**, являющийся еще одним способом получения предельной огибающей и определения сдвиговых характеристик, предполагает наличие специального устройства [7] (рис. 3). Авторы проводили испытания при помощи устройства, разработанного и сконструированного И.Е. Большаковым согласно ГОСТ 21153.5-88 [7]. Метод заключается в разрушении образца по заданной плоскости среза при приложении к нему вертикальной сжимающей нагрузки. В комплект испытательного устройства входит от трех до пяти пар разъемных матриц (пару составляют верхняя и нижняя матрицы) с вкладышами-обоймами для фиксирования образца. Зазор между верхней и нижней матрицами расположен под разными углами по отношению к вертикали (обычно 25, 35, 45, 55, 65 градусов). Нижняя матрица помещается на специальную подвижную платформу с шарнирным устройством. Собранный испытательный устройство с помещенным в него образцом скального грунта устанавливается в испытательную маши-



Рис. 2. Паспорт прочности скального грунта, построенный по результатам определения прочности на одноосное сжатие ( $R_c$ ) и растяжение ( $R_p$ )

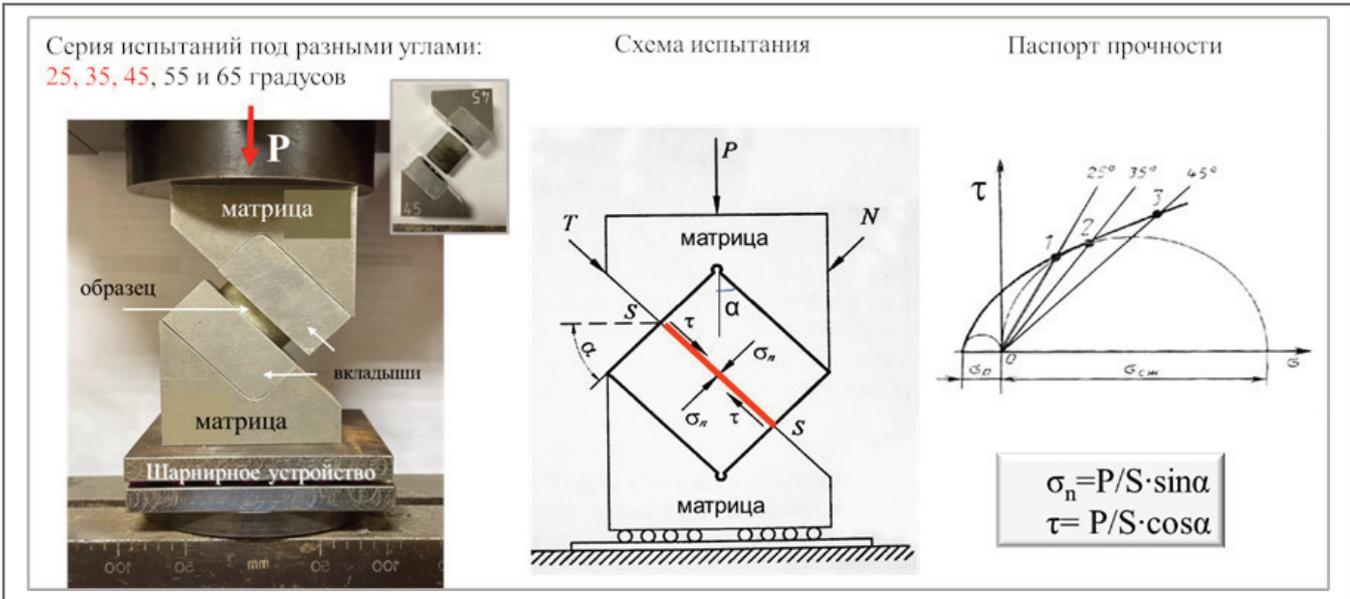


Рис. 3. Построение предельной огибающей по результатам среза со сжатием

ну (пресс), где через стальные плиты к нему прикладывается сжимающая нагрузка. При достижении критической величины нагрузки происходит срез образца по заданной плоскости между обоймами. По результатам испытания рассчитывают нормальное ( $\sigma_n$ ) и касательное ( $\tau$ ) напряжения, действующие в плоскости среза:

$$\sigma_n = P/S \cdot \cos \alpha, \quad (2)$$

$$\tau = P/S \cdot \sin \alpha, \quad (3)$$

где  $P$  – разрушающее усилие;  $S$  – площадь среза;  $\alpha$  – угол наклона плоскости среза к направлению внешнего усилия.

Проводят серию испытаний образца на срез под разными углами (минимум три теста). По результатам опытов строят предельную огибающую  $\tau=f(\sigma_n)$ , по которой определяют сцепление и угол внутреннего трения. Паспорт прочности, полученный по результатам среза со сжатием, можно дополнить кругами Мора, построенными по данным для  $R_c$  и  $R_p$  (см. рис. 3) [3].

**Объемное сжатие** является наиболее точным, но и наиболее трудоемким методом определения значений  $C$  и  $\phi$ . Он предполагает наличие специальной камеры для объемного сжатия [3, 4]. Его преимуществом является то, что он позволяет получить сдвиговые характеристики в условиях, максимально приближенных к естественным, в том числе и при высоких давлениях. Для получения предельной огибающей необходимо провести не менее трех испытаний в специальной камере для объемного сжатия при разных боковых давлениях по схеме

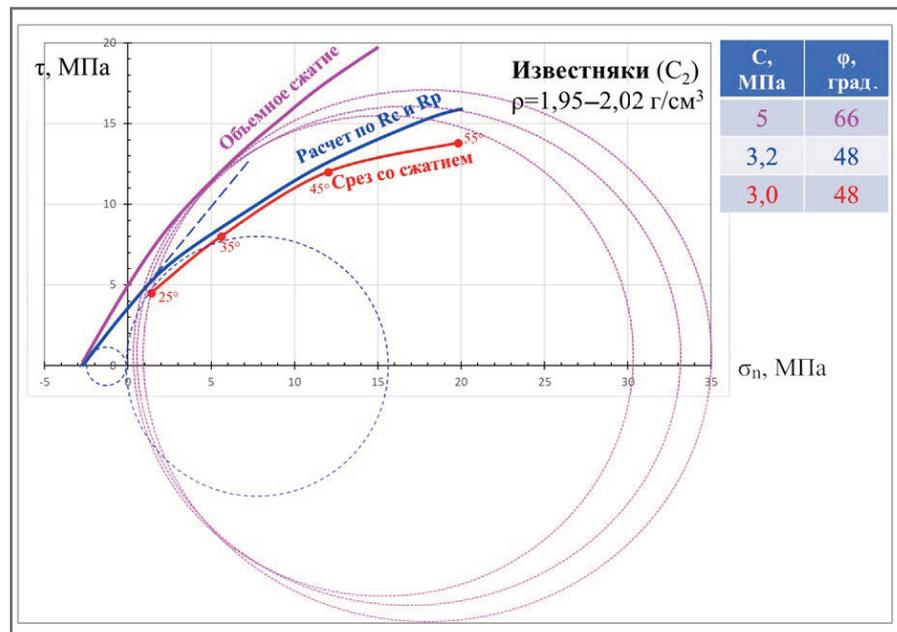


Рис. 4. Предельные огибающие, построенные по данным испытаний образцов известняка тремя разными методами

$\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ . По результатам нескольких испытаний в координатах « $\tau$ – $\sigma_n$ » строится серия предельных кругов Мора, к которым проводится огибающая. Полученный по результатам объемного сжатия паспорт прочности можно дополнить кругами Мора, построенными по данным одноосного сжатия и растяжения.

#### Сравнение результатов определения сдвиговых характеристик разными методами на примере известняков ►

Для известняков Московского региона ( $C_2$  мс) проведена серия испытаний

по определению сдвиговых характеристик с использованием трех вышеописанных методов. Известняки – без примесей, относительно однородные, мелкозернистые, тонкопористые, с плотностью 1,95–2,02 г/см<sup>3</sup> и пористостью 25–30%. На рисунке 4 представлен пример наиболее типичных результатов, полученных тремя разными методами.

Все испытания выполнены на образцах цилиндрической формы диаметром 38 мм. Значения показателей прочности на одноосное сжатие ( $R_c = 16$  МПа) и растяжение ( $R_p = 2,3$  МПа), использованные для построения предельной огибающей, получены как среднее

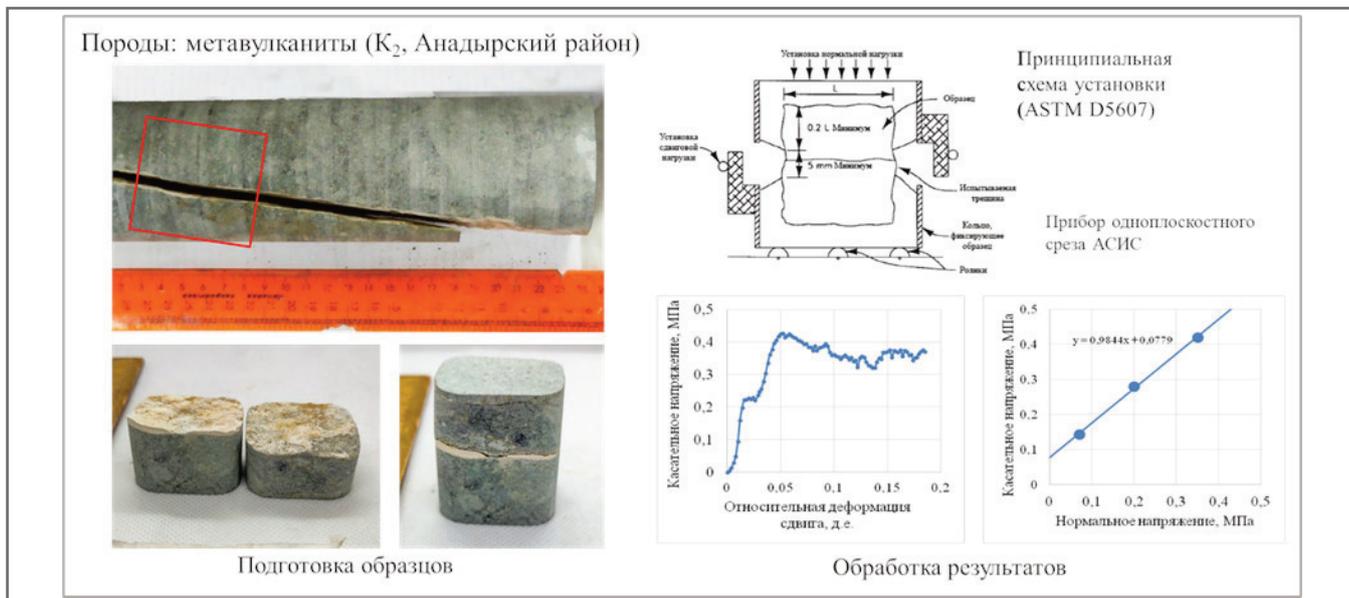


Рис. 5. Процедура проведения и обработки результатов испытания на срез по трещине

арифметическое по результатам шести определений на прессе ZDM-10. Трехосные испытания выполнены на прессе Controls-1500, оснащенный камерой Хоека. Испытания проведены по схеме нагружения Кармана, согласно которой на образец задается фиксированное боковое давление ( $\sigma_2 = \sigma_3$ ), а затем производится его нагружение по вертикали вплоть до разрушения ( $\sigma_{1max}$ ). Проведено три испытания при величинах бокового обжатия 0,5; 0,7 и 1 МПа. Срез со сжатием выполнен на прессе ZDM-10. Проведено 4 испытания с разными углами плоскости среза по отношению к вертикали (25, 35, 45 и 55 градусов).

Предельные огибающие, построенные по результатам первых двух методов, практически совпадают, тогда как огибающая, характеризующая объемное сжатие, проходит значительно выше и под большим углом. Чтобы объяснить выявленную закономерность, необходимо провести дополнительные эксперименты, в том числе при объемном сжатии с более высокими величинами бокового давления.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЧНОСТИ НА СДВИГ ПО ТРЕЩИАМ В СКАЛЬНЫХ ГРУНТАХ ►

Все массивы горных пород содержат неоднородности в виде поверхностей напластования, ослабленных зон контактов, трещин различной природы, разрывных нарушений с зеркалами скольжения и др., и в ряде случаев устойчивость склона определяется не

прочностью самих пород, а прочностью по поверхностям ослабления [1, 8]. К неблагоприятным сценариям относятся случаи, когда слои или трещины падают в направлении склона и поверхность скольжения может частично или полностью совпадать с поверхностью ослабления. В этих случаях при расчетах устойчивости склонов необходимо знать параметры прочности на сдвиг по трещине.

Методы определения сдвиговых характеристик по трещине делятся на экспериментальные (полевые и лабораторные) и расчетные эмпирические.

Среди *экспериментальных методов* используются:

1. крупномасштабные полевые опыты *in situ* по срезу больших цельков с трещиной в основании (уникальные, трудоемкие, дорогие);
2. лабораторные испытания образца с трещиной (естественной или модельной) в приборе плоскостного среза [8–10];
3. лабораторные трехосные испытания образца с трещиной [9].

Среди *расчетных методов* применяются различные эмпирические уравнения, позволяющие оценить прочность трещины на сдвиг с учетом морфологических особенностей поверхности, геометрических размеров, наличия и типа заполнителя, прочности стенок и иных факторов [8, 11–13]. Одним из наиболее известных является уравнение Н. Бартона [12]:

$$\tau_{тр} = \sigma_n \cdot \text{tg}[JRC \cdot \lg(JCS/\sigma_n) + \varphi_j], \quad (4)$$

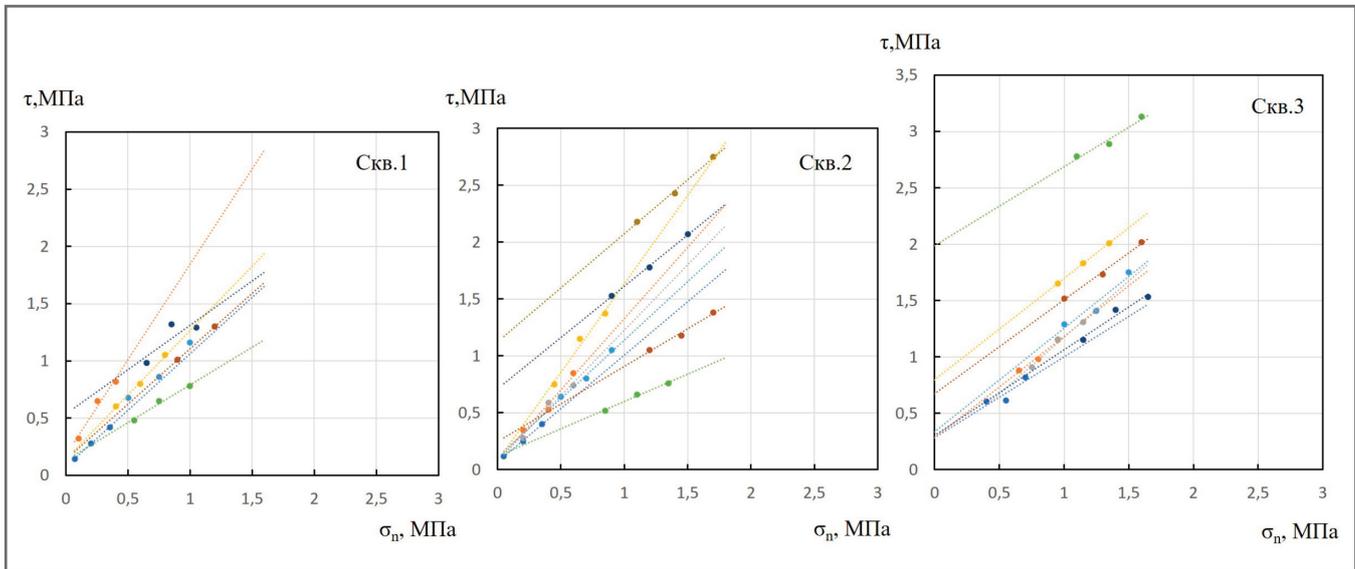
где JRC – коэффициент шероховатости

трещины (оценивается в баллах от нуля до 20); JCS – прочность на сжатие материала стенки трещины;  $\sigma_n$  – действующее нормальное напряжение;  $\varphi_j$  – угол трения по трещине ( $\approx \varphi_{ост}$ , где  $\varphi_{ост}$  – угол остаточной прочности, или остаточный угол трения); слагаемое  $JRC \cdot \lg(JCS/\sigma_n) = i$  характеризует угол наклона макровыступа.

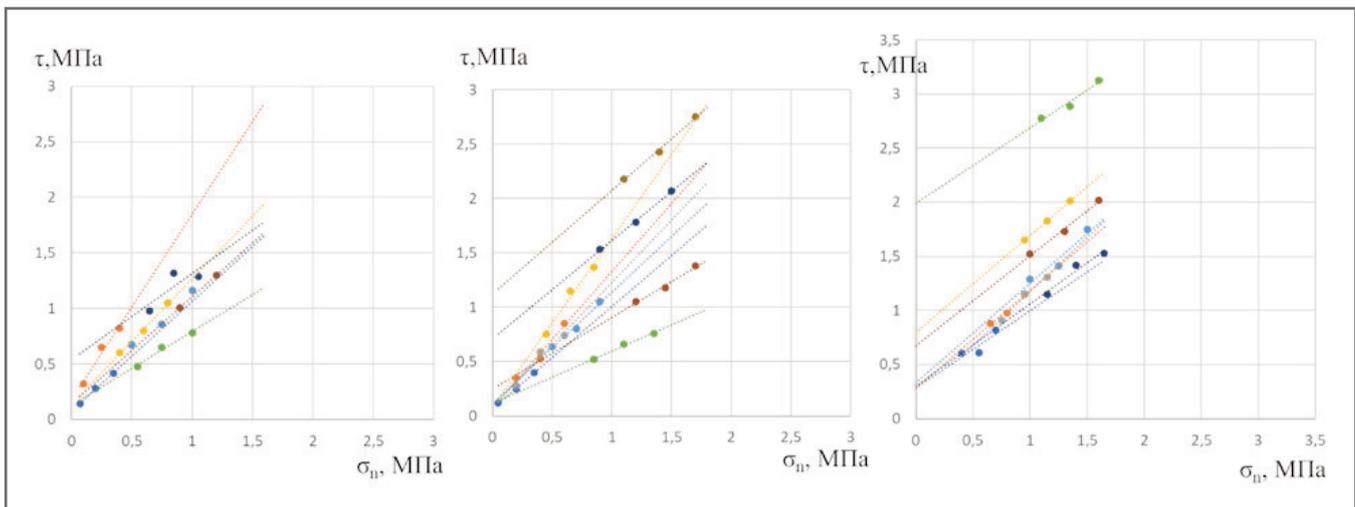
В настоящее время для моделирования сдвига по трещине и определения параметров прочности используют программный комплекс Particle Flow Code (PFC<sup>2D</sup>), в котором учитываются: прочность материала стенок трещины, геометрические размеры, различные параметры неровности и шероховатости поверхностей, размер частиц/кристаллов породы и прочность связей между ними в процессе сдвига [14]. Морфологические особенности поверхности трещины, используемые в расчетах, отражены на ее цифровой модели, получаемой с помощью оптического сканирования.

**Лабораторные испытания на срез по трещине** проведены на образцах метавулканитов ( $K_2$ ) Анадырского района в связи с проектированием карьера и расчетами устойчивости его бортов. Испытание производилось при помощи прибора одноплоскостного среза АСИС в соответствии с требованиями стандарта ASTM D5607 [10] (рис. 5).

Из керна производился отбор образцов с наиболее значимыми и потенциально опасными для устойчивости бортов карьера трещинами. Из каждого образца с трещиной при помощи камнерезного станка вырезалась призма, состоявшая из двух частей, разделенных



**Рис. 6.** Идеализированная модель среза по шероховатой трещине [9]: а – предельная огибающая; б – срез при низких величинах нормальной нагрузки по зубцам шероховатостей; в – срез при высоких величинах нормальной нагрузки с разрушением неровностей на поверхности трещины



**Рис. 7.** Графики зависимости касательных напряжений от нормальных напряжений, полученные по данным испытаний на срез по трещине для метавулканитов

трещиной (с плоскостью трещины, параллельной торцевым поверхностям призмы). Подготовленные образцы фиксировались в специальных кольцах (сконструированных И.Е. Большаковым, чтобы избежать использования цементирующих материалов) и помещались в сдвиговой прибор, где выполнялось испытание на срез по трещине при трех различных величинах нормальной нагрузки. В качестве первой ступени выбиралась бытовая нагрузка, определенная исходя из глубины залегания образца. Две последующие ступени принимались в соответствии с первой величиной нормальной нагрузки. Испытание завершалось при достижении относительной деформации, равной 15–20%. Всего было испытано 38 образцов с трещиной.

По итогам трех опытов при различных нормальных нагрузках были построены графики зависимости касательных напряжений от нормальных напряжений (рис. 6) в виде аппроксимирующей прямой, по которой вычислялись сцепление и угол внутреннего трения для трещины. На рисунке 7 представлены диаграммы сдвига для исследованных трещин.

Выполненные испытания на срез по трещине показали изменчивость значений  $C$  и  $\varphi$  в зависимости от величины нормальной нагрузки и, соответственно, от глубины отбора образца (рис. 8).

Величина сцепления в целом повышается с увеличением глубины, однако на кривой (см. рис. 8, а, в) выделяются два участка, что в целом соответствует идеализированной модели сдвига по трещине с регулярной макрошерохова-

той поверхностью пилообразного типа (см. рис. 6) [8, 15]. Первый участок пологий, он отражает минимальные значения сцепления при низких величинах нормального напряжения (см. рис. 8, а, в). На этом этапе происходит сдвиг по поверхности имеющихся макровыступов и неровностей, за счет чего угол внутреннего трения становится больше на величину, равную углу неровности (зубца) (см. рис. 6, б). При этом, если микрошероховатость отсутствует, то есть поверхности гладкие, то сцепления между ними практически нет. При увеличении нормальной нагрузки начинается сдвиг с разрушением и срезом зубцов, при этом угол внутреннего трения снижается, но появляется сцепление за счет сопротивления зубцов (см. рис. 6, в). Угол внутреннего трения сни-

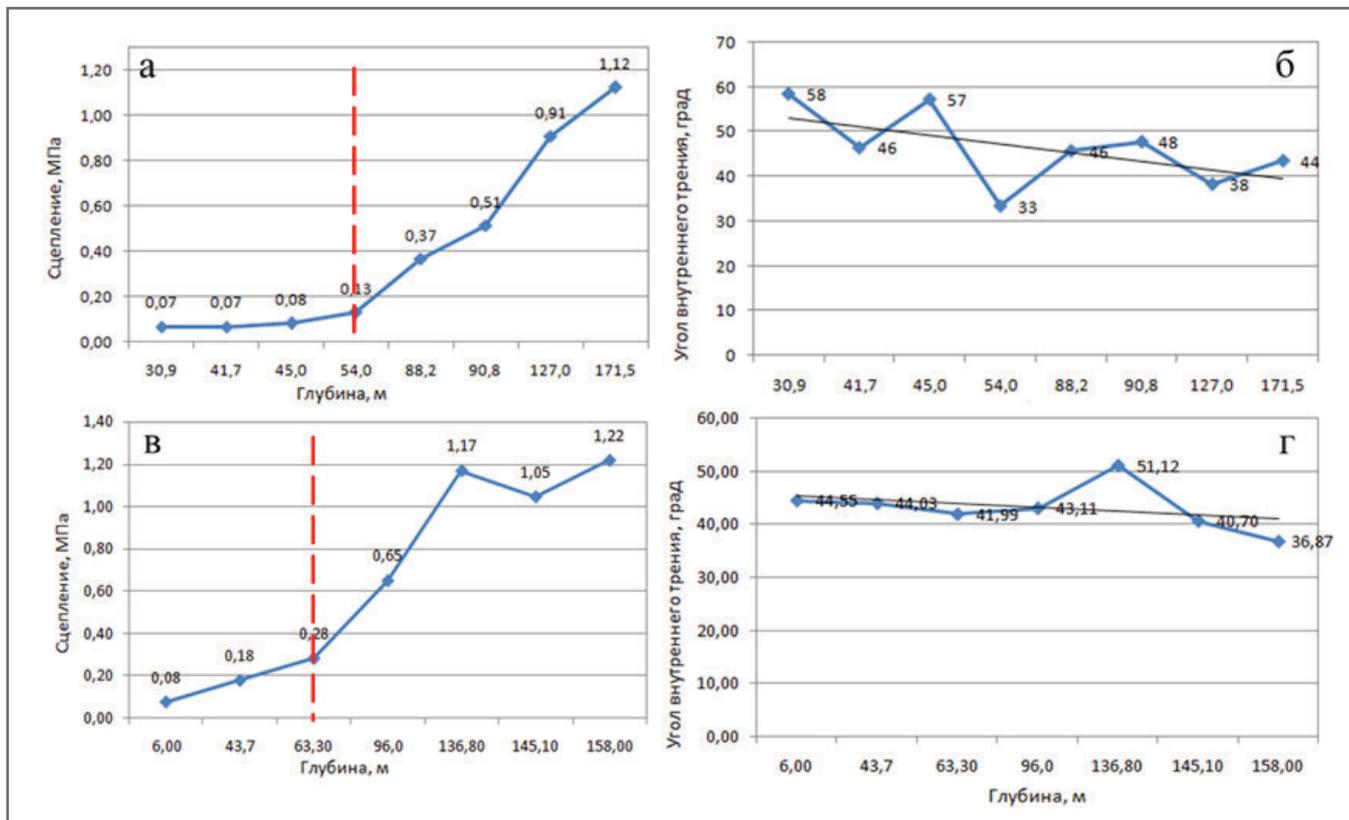


Рис. 8. Зависимость сцепления и угла внутреннего трения по поверхности трещины от глубины отбора образца: а, б – первая система трещин; в, г – вторая система трещин

жается с увеличением нормальной нагрузки (см. рис. 8, б, г).

Таким образом, при определении сдвиговых характеристик по трещине необходимо учитывать их зависимость от нормальной нагрузки и выбирать величины последней с учетом глубины интересующего интервала.

Сравнение сдвиговых характеристик, определенных для ненарушенных образцов и по трещинам, показали, что в первом случае сцепление выше на 2–3 порядка ( $C_{cp} = 11$  МПа у образцов;  $C_{cp} = 0,07 \div 0,28$  МПа по трещинам). Угол внутреннего трения также выше у образцов, но разница в этом случае не столь существенна ( $\varphi_{cp} = 53^\circ$  у образцов;  $\varphi_{cp} = 42 \div 50^\circ$  по трещинам). Следует отметить, что параметры прочности на сдвиг по трещинам зависят от многих факторов, в первую очередь от морфологии стенок, геометрических размеров, выветрелости, заполнителя, наличия воды. Влияние перечисленных факторов на сдвиговые характеристики требует отдельного анализа.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЧНОСТИ НА СДВИГ МАССИВА СКАЛЬНЫХ ГРУНТОВ ▶

В инженерной геологии во многих случаях при решении практических задач

требуются изучение и оценка горных пород в естественных условиях, для которых характерна изменчивость состава, строения и состояния, наличие различного рода неоднородностей (выветрелости, трещиноватости, сланцеватости и т.д.), а также анизотропия физико-механических свойств. При этом традиционный подход к изучению грунтов – разностороннее исследование отобранных образцов – не обеспечивает полноты оценки состояния и характеристик скальных массивов [16–18]. Вместе с тем оценка прочностных свойств скальных массивов является весьма сложной, неоднозначной и трудоемкой задачей. Традиционно применяются три группы методов:

1. полевые крупномасштабные испытания *in situ*;
2. косвенные методы, позволяющие осуществлять переход от свойств образца к свойствам массива на основе сочетания геологических, лабораторных инженерно-геологических и геофизических данных;
3. эмпирические геомеханические классификации и критерии прочности, основанные на учете свойств грунта и некоторых параметров массива, в наибольшей степени влияющих на его свойства (трещиноватость, обводненность, напряженно-деформированное состояние (НДС) и др.).

### Расчет сдвиговых характеристик массива метавулканитов с использованием эмпирического критерия прочности Хоека – Брауна ▶

В настоящее время для оценки свойств скальных массивов широко используется эмпирический критерий прочности, предложенный Э. Хоеком и Э. Брауном (Hoek-Brown failure criterion) [2, 19]. Он является развитием критерия прочности Кулона – Мора. Усовершенствование заключается в нелинейной форме предельной огибающей, которая в большей степени соответствует реальному деформированию скального грунта, особенно в области высоких напряжений. Предложенная методика оценки прочностных свойств скального массива основана на многолетнем анализе большого количества экспериментальных данных, полученных как при лабораторных испытаниях, так и при крупномасштабных полевых опытах. В модель Хоека – Брауна входят две группы параметров:

1. показатели, характеризующие прочностные свойства образца скального грунта, – прочность на одноосное сжатие образца ( $\sigma_c$ ) и эмпирический коэффициент, отражающий степень взаимного зацепления минеральных частиц ненарушенного скального грунта и влияю-

ший на степень нелинейности предельной огибающей Хоека – Брауна ( $m_i$ ); 2. параметры, характеризующие нарушенность скального массива, – геологический индекс прочности (GSI) и показатель техногенной нарушенности массива ( $D$ ) [2, 19].

Обобщенный критерий Хоека – Брауна для трещиноватых массивов имеет вид:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci}(m_b \sigma_1 / \sigma_{ci} + s)^a, \quad (5)$$

где  $\sigma_1, \sigma_3$  – главные нормальные напряжения (максимальное и минимальное соответственно);  $m_b, s, a$  – безразмерные эмпирические коэффициенты, влияющие на форму и степень нелинейности предельной огибающей Хоека. Они зависят от геологического индекса прочности GSI и коэффициента техногенной нарушенности  $D$ .

Геологический индекс прочности GSI представляет собой эмпирический показатель, позволяющий количественно (в баллах от нуля до 100) оценить состояние скального массива в зависимости от его трещиноватости и степени сохранности. По сути, это двухпараметровая рейтинговая эмпирическая классификация, в которую в качестве параметров входят блочность (степень нарушенности массива) и характер поверхности трещин. Существуют различные методики определения величины GSI [20]. В данной работе расчет GSI производился по керну скважин через показатель трещиноватости  $J_{\text{Cond89}}$  [21] и показатель качества керна RQD [22]:

$$\text{GSI} = 1,5J_{\text{Cond89}} + \text{RQD}/2. \quad (6)$$

Зная значения параметров GSI и  $D$ , рассчитывали эмпирические коэффициенты  $m_b, s, a$ , входящие в критерий Хоека – Брауна, а затем вычисляли показатели прочностных свойств скального массива, в том числе действующие угол внутреннего трения ( $\varphi'$ ) и удельное сцепление ( $C'$ ) [19]:

$$\varphi' = \sin^{-1} \left[ \frac{6am_b(s + m_b \sigma_{3n}')^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b(s + m_b \sigma_{3n}')^{a-1}} \right]; \quad (7)$$

$$c' = \frac{\sigma_{ci}[(1+2a)s + (1-a)m_b \sigma_{3n}']^{a-1} + m_b \sigma_{3n}'^{a-1}}{(1+a)(2+a)\sqrt{1 + (6am_b(s + m_b \sigma_{3n}')^{a-1}) / ((1+a)(2+a))}}. \quad (8)$$

Вычисления производились с помощью программного обеспечения RocLab (Rocscience Inc.).

На рисунке 9 представлена предельная огибающая, полученная для массива метавулканитов. В качестве входных параметров: использовано среднее значение

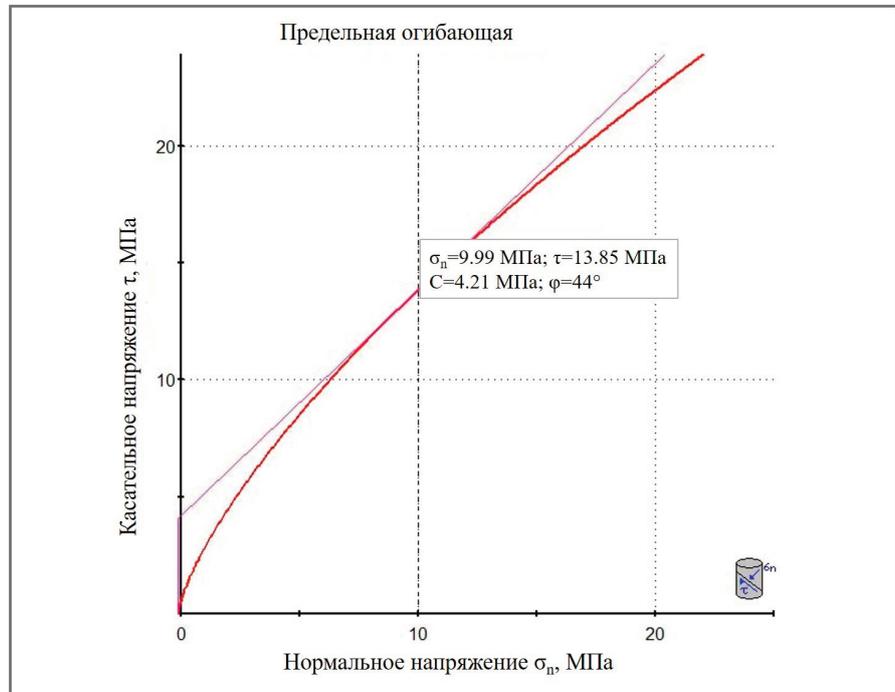


Рис. 9. Предельная огибающая Хоека – Брауна, полученная для массива метавулканитов

Таблица. Зависимость значений  $C$  и  $\varphi$  от величины нормального напряжения для массива метавулканитов

$\sigma_n$ , МПа	$C$ , МПа	$\varphi$ , °
1	1,05	61
3	1,9	54
5	2,6	50
7	3,3	47
10	4,2	44

показателя  $R_c=64$  МПа, определенное по результатам испытаний 43 образцов; выбрано наиболее характерное для дацитов значение коэффициента  $m_i=22$  (по табличным данным); рассчитано среднее значение геологического индекса прочности GSI=61. В таблице приведены полученные значения  $C$  и  $\varphi$  при различных величинах нормального напряжения. Так, при увеличении величины  $\sigma_n$  от 1 до 10 МПа сцепление увеличивается в 4 раза, а угол внутреннего трения снижается с 61 до 44 градусов.

Вычисленные для массива величины сцепления примерно на порядок меньше, чем сцепление, характерное для образцов ненарушенной породы ( $C_{cp}=11$  МПа).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обобщение научно-практической и методической литературы по вопросу сопротивления скальных грунтов сдвигу и проведенные эксперименты и рас-

четы для конкретных объектов позволили сделать следующие выводы.

1. В зависимости от особенностей исследуемого массива и решаемой задачи инженер-геолог должен четко представлять, для какого объекта следует определять параметры прочности на сдвиг – для образца, для поверхностей ослабления (трещин) или для скального массива.

2. Важным вопросом является рациональный выбор и научное обоснование методики определения показателей сопротивления сдвигу. Это могут быть как прямые испытания (полевые или лабораторные), так и расчетные способы и эмпирические уравнения – у каждого метода есть свои преимущества и недостатки.

3. При выборе значений сдвиговых характеристик ( $C, \varphi$ ), которые будут использоваться в расчетах, необходимо учитывать нелинейность предельной огибающей и, соответственно, их зависимость от интервала напряжений, для которого они определяются. **и**

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ ►**

1. Зеркаль О.В., Фоменко И.К. Оползни в скальных грунтах и оценка их устойчивости // Инженерная геология. 2016. № 4. С. 4–21.
2. Hoek E., Brown E.T. Empirical strength criterion for rock masses // J. Geotech. Engin. Div. ASCE, 1980. Vol. 106, № GT9. P. 1013–1035.
3. ГОСТ 21153.8-88. Породы горные. Методы определения предела прочности при объемном сжатии. М.: Изд-во стандартов, 1989.
4. Фролова Ю.В. Скальные грунты и методы их лабораторного изучения. М.: КДУ, 2015. 222 с.
5. ГОСТ 21153.2-84. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии. М.: Изд-во стандартов, 2001 (с изм. № 1 и № 2).
6. ГОСТ 21153.3-85. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном растяжении. М.: Изд-во стандартов, 1985.
7. ГОСТ 21153.5-88. Породы горные. Метод определения предела прочности при срезе со сжатием. М.: Изд-во стандартов, 1988.
8. Могилевская С.Е. Экспресс-метод определения параметров сопротивления сдвигу скальных пород по трещинам. Основные положения. Экспериментальное и теоретическое обоснование. СПб., 2011. 236 с.
9. Зерцалов М.Г. Механика грунтов (введение в механику скальных массивов). М.: Ассоциация строительных вузов, 2006.
10. ASTM D5607-16. Standard test method for performing laboratory direct shear strength tests of rock specimens under constant normal force. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2016.
11. Газиев Э.М. Устойчивость скальных массивов и методы их закрепления. М.: Стройиздат. 1977.
12. Barton N., Bandis S., Bakhtar K. Strength, deformation, and conductivity coupling of rock joints // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr. 1985. Vol. 22. № 3. P. 121–140.
13. Ladanyi B., Archambault G. Simulation of shear behavior of a jointed rock mass // Proceedings of the 11th US Symp. on Rock Mechanics (USRMS). American Rock Mechanics Association, 1969.
14. Rios-Bayona F., Johansson F., Mas-Ivars D., Sanchez-Juncal A., Bolin A. Using PFC2D to simulate the shear behavior of joints in hard crystalline rock // Bulletin of Engineering Geology. 2022. Vol. 81. Article 381. <https://doi.org/10.1007/s10064-022-02885-8>.
15. Patton F. Multiple modes of shear failure in rocks // Proceeding of the 1st Congress Int. Soc. Rock Mech., Lisboa. 1966. Vol. 1. P. 509–513.
16. Зеркаль О.В., Фоменко И.К., Фролова Ю.В. Классификация массивов скальных грунтов как инструмент изучения и оценки их поведения // Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. Сергеевские чтения «Массивы грунтов как жизнеобеспечивающий ресурс общества». М.: Геоинфо, 2025. № 26. С. 94–98.
17. Фролова Ю.В., Зеркаль О.В. Современные методы определения прочностных свойств скальных и полускальных грунтов при оценке устойчивости склонов // Труды Юбилейной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения профессора Г.С. Золотарева «Современные проблемы инженерной геодинамики». М.: Изд-во Моск. ун-та, 2014. С. 146–150.
18. Фролова Ю.В., Зеркаль О.В. Современные методы определения прочностных свойств скальных и полускальных грунтов // Материалы 3-й Региональной научно-практической конференции «Инженерная геология Северо-Западного Кавказа и Предкавказья: современное состояние и основные задачи», Краснодар, 24–25 ноября 2016 г. Краснодар: Изд-во Кубан. гос. ун-та, 2016. С. 273–277.
19. Hoek E., Brown E.T. The Hoek-Brown failure criterion and GSI – 2018 edition // J. of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2019. Vol. 11. P. 445–463.
20. Hoek E., Diederichs M.S. Quantification of the geological strength index chart // Proceedings of the 47th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, San Francisco, CA, USA, June 23–26, 2013.
21. Bieniawski Z.T. Engineering rock mass classifications. New York: Wiley, 1989. 251 p.
22. Deere D.U. Technical description of rock cores for engineering purposes // Rock. Mech and Eng. Geol. 1963. Vol. 1. № 1. P. 16–22.

**REFERENCES ►**

1. Zerkal' O.V., Fomenko I.K. Opolzni v skal'nykh gruntakh i otsenka ikh ustoichivosti [Landslides in rocks and assessment of their stability] // Inzhenernaya Geologiya. 2016. № 4. S. 4–21 (in Rus.).
2. Hoek E., Brown E.T. Empirical strength criterion for rock masses // J. Geotech. Engin. Div. ASCE, 1980. Vol. 106, № GT9. P. 1013–1035.
3. GOST 21153.8-88. Porody gornye. Metody opredeleniya predela prochnosti pri ob'emnom szhatii [Rocks and soils. Methods for determining the ultimate strength under triaxial compression]. M.: Izd-vo standartov, 1989 (in Rus.).
4. Frolova Yu.V. Skal'nye grunty i metody ikh laboratornogo izucheniya [Rocks and laboratory methods for their investigation]. M.: KDU, 2015. 222 s. (in Rus.).
5. GOST 21153.2-84. Porody gornye. Metody opredeleniya predela prochnosti pri odnoosnom szhatii [Rocks and soils. Methods for determining the ultimate uniaxial compressive strength]. M.: Izd-vo standartov, 2001 (s izm. № 1 i № 2) (in Rus.).
6. GOST 21153.3-85. Porody gornye. Metody opredeleniya predela prochnosti pri odnoosnom rastyazhenii [Rocks and soils. Methods for determining the ultimate uniaxial tensile strength]. M.: Izd-vo standartov, 1985 (in Rus.).

7. GOST 21153.5-88. Porody gornye. Metod opredeleniya predela prochnosti pri srezе so szhatiem [Rocks and soils. Method for determining the ultimate shear strength under compression]. M.: Izd-vo standartov, 1988 (in Rus.).
8. Mogilevskaya S.E. Ekspress-metod opredeleniya parametrov soprotivleniya sdvigu skal'nykh porod po treshchinam. Osnovnye polozeniya. Eksperimental'noe i teoreticheskoe obosnovanie [Express-method for determining shear strength parameters of rock joints. Fundamentals. Experimental and theoretical substantiation]. SPb., 2011. 236 s. (in Rus.).
9. Zertsalov M.G. Mekhanika gruntov (vvedenie v mekhaniku skal'nykh massivov) [Rock mechanics (introduction to rock mass mechanics)]. M.: Assotsiatsiya stroitel'nykh vuzov, 2006 (in Rus.).
10. ASTM D5607-16. Standard test method for performing laboratory direct shear strength tests of rock specimens under constant normal force. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2016.
11. Gaziev E.M. Ustoichivost' skal'nykh massivov i metody ikh zakrepleniya [Stability of rock masses and methods for their reinforcement]. M.: Stroizdat. 1977 (in Rus.).
12. Barton N., Bandis S., Bakhtar K. Strength, deformation, and conductivity coupling of rock joints // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr. 1985. Vol. 22. № 3. P. 121–140.
13. Ladanyi B., Archambault G. Simulation of shear behavior of a jointed rock mass // Proceedings of the 11th US Symp. on Rock Mechanics (USRMS). American Rock Mechanics Association, 1969.
14. Rios-Bayona F., Johansson F., Mas-Ivars D., Sanchez-Juncal A., Bolin A. Using PFC2D to simulate the shear behavior of joints in hard crystalline rock // Bulletin of Engineering Geology. 2022. Vol. 81. Article 381. <https://doi.org/10.1007/s10064-022-02885-8>.
15. Patton F. Multiple modes of shear failure in rocks // Proceeding of the 1st Congress Int. Soc. Rock Mech., Lisboa. 1966. Vol. 1. P. 509–513.
16. Zerkal' O.V., Fomenko I.K., Frolova Yu.V. Klassifikatsiya massivov skal'nykh gruntov kak instrument izucheniya i otsenki ikh povedeniya [Classification of rock masses as a tool for studying and evaluating their behavior] // Materialy godichnoi sessii Nauchnogo soveta RAN po problemam geoekologii, inzhenernoi geologii i gidrogeologii. Sergeevskie chteniya "Massivy gruntov kak zhizneobespechivayushchii resurs obshchestva". M.: Geoinfo, 2025. № 26. S. 94–98 (in Rus.).
17. Frolova Yu.V., Zerkal' O.V. Sovremennye metody opredeleniya prochnostnykh svoystv skal'nykh i poluskal'nykh gruntov pri otsenke ustoichivosti sklonov [Modern methods for determining strength properties of hard and soft rocks for slope stability assessment] // Trudy Yubileinoi konferentsii, posvyashchennoi 100-letiyu so dnya rozhdeniya professora G.S. Zolotareva "Sovremennye problemy inzhenernoi geodinamiki". M.: Izd-vo Mosk. un-ta, 2014. S. 146–150 (in Rus.).
18. Frolova Yu.V., Zerkal' O.V. Sovremennye metody opredeleniya prochnostnykh svoystv skal'nykh i poluskal'nykh gruntov [Modern methods for determining strength properties of hard and soft rocks] // Materialy 3-i Regional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Inzhenernaya geologiya Severo-Zapadnogo Kavkaza i Predkavkaz'ya: sovremennoe sostoyanie i osnovnye zadachi", Krasnodar, 24–25 noyabrya 2016 g. Krasnodar: Izd-vo Kuban. gos. un-ta, 2016. S. 273–277 (in Rus.).
19. Hoek E., Brown E.T. The Hoek-Brown failure criterion and GS – 2018 edition // J. of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2019. Vol. 11. P. 445–463.
20. Hoek E., Diederichs M.S. Quantification of the geological strength index chart // Proceedings of the 47th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, San Francisco, CA, USA, June 23–26, 2013.
21. Bieniawski Z.T. Engineering rock mass classifications. New York: Wiley, 1989. 251 p.
22. Deere D.U. Technical description of rock cores for engineering purposes // Rock. Mech and Eng. Geol. 1963. Vol. 1. № 1. P. 16–22.



Телеграм-канал журнала

Независимый электронный журнал

# ГеоИнфо

- Новости
- Статьи
- Обсуждения

<https://t.me/geoinfonews>