

DOI 10.53278/2306-9139-2025-1-24-36-42

УДК 624.131.43

ОЦЕНКА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАССИВА КАРБОНАТНЫХ ПОРОД С ПОМОЩЬЮ ЭМПИРИЧЕСКОГО КРИТЕРИЯ ПРОЧНОСТИ ХОЕКА-БРАУНА

ASSESSMENT OF THE PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF CARBONATE ROCK MASS USING HOEK-BROWN FAILURE CRITERION

© 2025 г. Ю. В. Фролова¹, В. А. Долгов², Е. В. Пиоро³
© 2025 Julia. V. Frolova¹, Vyacheslav A. Dolgov², Ekaterina V. Pioro³

¹Геологический факультет Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова,
Ленинские горы, д. 1, г. Москва, 119234, Россия

¹Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, bld. 1, Leninskie Gory, Moscow, 119234, Russia
ООО «Карбон», ул. Бутлерова, д. 17 Б, г. Москва, 117342, Россия

¹F²LTD «Carbon», Butlerova st., bld. 17B, Moscow, 117342, Russia

³ООО «ПЕТРОМОДЕЛИНГ ЛАБ», ул. Ивана Франко, д. 4, г. Москва, 121108, Россия

³LTD «PETROMODELING LAB», Ivan Franko st., bld.4, Moscow, 121108, Russia

ju_frolova@mail.ru¹, carbon1996@gmail.com², ekaterina.pioro@petromodeling.com³

Аннотация. В статье описывается процедура и приводятся результаты оценки физико-механических свойств массива карбонатных пород г. Москвы с помощью эмпирического критерия прочности Хоека-Брауна. Проводится сравнение показателей прочностных и деформационных свойств в массиве и образце, делается вывод об их существенном снижении при переходе от образца к массиву, что оценивается через коэффициенты структурного ослабления. Показано, что значения модуля деформации, рассчитанные по модели Хоека-Брауна, в целом сопоставимы с данными pressiометрии.

Abstract: The article describes the procedure and provides the results of evaluating the physico-mechanical properties of carbonate rock in Moscow mass using the Hoek-Brown failure criterion. A comparison of the strength and deformation properties of the rock mass and the sample specimens is carried out and a conclusion is made about their significant decrease during the transition from the sample to the rock mass, which is estimated through the coefficient of structural weakening. It is shown that the values of the deformation modulus calculated using the Hoek-Brown model are generally comparable with the pressiometry data.

Ключевые слова: карбонатные породы, физико-механические свойства, скальный массив, критерий прочности Хоека-Брауна, pressiометрия.

Keywords: carbonate rocks, physico-mechanical properties, rock mass, Hoek-Brown failure criterion, pressiometry.

Введение

Актуальность изучения скальных грунтов в настоящее время неуклонно возрастает. Прежде всего это обусловлено проектированием и строительством ответственных и уникальных инженерных сооружений, таких как высотные здания, подземные объекты различного назначения (горные выработки, тоннели, хранилища углеводородов и радиоактивных отходов и пр.), мосты, гидротехнические сооружения (плотины, тоннели, машинные залы и пр.), основанием или вмещающей средой которых являются скальные грунты.

Одной из важнейших задач при ведении строительства на скальных грунтах является изучение слагаемых ими массивов, включая определение физико-механических свойств и оценку деформирования под нагрузкой при взаимодействии с инженерным сооружением. Для этого недостаточно знаний о свойствах скальных грунтов, определяемых лабораторными методами на образцах. При оценке свойств скального массива необходимо учитывать целый ряд дополнительных факторов, среди которых особенности строения массива, трещиноватость,

неоднородность, анизотропность, обводненность, выветрелость, напряженно-деформированное состояние, время, температура и иные. Известно, что чем больше объем испытуемого грунта, тем больше в нем содержится различных неоднородностей и ослабленных зон, соответственно, тем меньше его прочность. Данная разница в показателях свойств массива и образца называется масштабным эффектом и характеризуется коэффициентом структурного ослабления. Последний рассчитывается как отношение величин какого-либо показателя физико-механических свойств (например, прочности на одноосное сжатие, сцепления, модуля упругости и др.), характеризующего массив и образец.

Оценка прочностных и деформационных свойств скального массива и установление объективного значения коэффициента структурного ослабления представляет собой весьма сложную и трудоемкую задачу, решению которой посвящены многочисленные аналитические и экспериментальные работы. Традиционно применяются три группы методов: (1) полевые крупномасштабные испытания *in situ* (очень трудоемкие, требующие значительных финансовых и временных затрат); (2) косвенные методы, позволяющие осуществлять переход от свойств образца к свойствам массива на основе сочетания лабораторных, геофизических и геологических данных; (3) эмпирические геомеханические классификации и критерии, основанные на учете свойств ненарушенного грунта (образца) и некоторых параметров массива, в наибольшей степени влияющих на его свойства (трещиноватость, обводненность, НДС и др.). В последнее время именно третья группа методов активно развивается и находит широкое применение в инженерной геологии, механике скальных грунтов и горных науках [8, 10].

Цель настоящего исследования — на примере одного из строительных объектов г. Москвы провести сопоставление физико-механических свойств скальных грунтов, определенных в лаборатории на образцах, и вычисленных для массива с использованием эмпирического критерия прочности Хоека-Брауна.

Эмпирический критерий прочности Хоека-Брауна

В настоящее время для оценки свойств трещиноватых скальных массивов широко используется эмпирический критерий прочности, предложенный Е. Хоеком и Е. Брауном [11, 13]. В отличие от критерия прочности Кулона-Мора, он предполагает нелинейную форму предельной огибающей, которая в большей степени соответствует реальному деформированию скального грунта, особенно в области высоких

напряжений. Данный критерий впервые был предложен в 1980 г. и описывал разрушение ненарушенных скальных грунтов [12]. В дальнейшем он был расширен и адаптирован для оценки свойств трещиноватых скальных массивов. Предложенная методика оценки прочностных и деформационных 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. *Первую группу* составляют показатели, определяющиеся на образцах и характеризующие физико-механические свойства ненарушенного скального грунта. Среди них прочность на одноосное сжатие σ_{ci} ; эмпирический коэффициент m_i , отражающий прочность контактов между минеральными частицами ненарушенного скального грунта; модуль упругости E_y (или модуль общей деформации E_o). *Вторую группу* образуют параметры, характеризующие нарушенность скального массива — геологический индекс прочности (GSI), отражающий природную трещиноватость, и показатель техногенной нарушенности массива (D).

Обобщенный критерий Хоека-Брауна для трещиноватого массива имеет вид [11]:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (1)$$

где σ_1 , σ_3 — главные нормальные напряжения (максимальное и минимальное); m_b , s , a — безразмерные эмпирические коэффициенты, влияющие на форму и степень нелинейности предельной огибающей Хоека. Они зависят от геологического индекса прочности GSI и от коэффициента техногенной нарушенности D:

$$m_b = m_i \exp \left[\frac{GSI - 100}{28 - 14D} \right] \quad (2)$$

$$s = \exp \left[\frac{GSI - 100}{9 - 3D} \right] \quad (3)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right) \quad (4)$$

где m_i — эмпирический коэффициент, отражающий прочность контактов между минеральными частицами ненарушенного скального грунта, GSI — геологический индекс прочности, D — параметр техногенной нарушенности.

Объект исследования

Район, для которого проводились исследования и расчеты, расположен в Западном административном

округе г. Москвы, в пределах района «Дорогомилово», вдоль набережной Тараса Шевченко р. Москвы. Здесь планируется строительство комплекса многоэтажных жилых зданий.

В строении геологического разреза, вскрытого бурением до глубины 70 м, принимают участие следующие отложения (снизу вверх):

- Известняки московского яруса мячковского горизонта среднего отдела каменноугольной системы.
- Известняки, мергели и аргиллитоподобные глины касимовского яруса верхнего отдела каменноугольной системы;
- Среднечетвертичные аллювиальные отложения II-й надпойменной террасы р. Москва (a2 IIIkl);
- Современные техногенные отложения (t H).

На основании возраста, литологического состава пород и их физико-механических свойств, определенных лабораторными методами, в разрезе были выделены 12 инженерно-геологических элементов (ИГЭ). Выделение ИГЭ проводилось по стандартной методике в соответствии с ГОСТ 20522–2012 [4].

Расчет свойств в массиве по модели Хоека-Брауна проведен для скальных грунтов касимовского (C_{3izm} , C_{3prh} , C_{3pvr} , C_{3rt} , C_{3sv}) и московского ярусов ($C_{2mč}$), представленных карбонатными породами, среди которых преобладают известняки, в меньшей степени присутствуют доломиты и мергели.

Входные параметры модели Хоека-Брауна и их определение

Общий алгоритм использования модели Хоека-Брауна для оценки свойств скального массива представлен на рисунке 1. В модель закладываются свойства образца (σ_{ci} , m_i , E_y) и характеристики нарушенности массива (GSI , D), на основе которых рассчитываются эмпирические коэффициенты, влияющие на степень нелинейности предельной огибающей Хоека-Брауна, и, в конечном итоге, вычисляются расчетные показатели, характеризующие скальный массив.

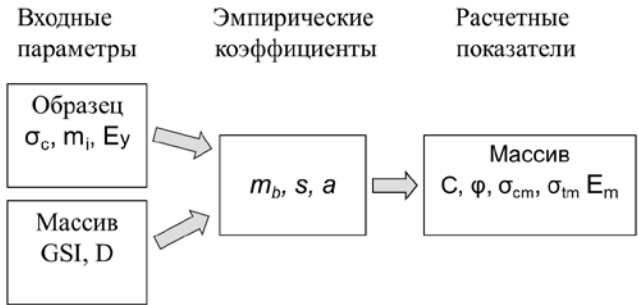


Рис. 1. Общий алгоритм использования модели Хоека-Брауна для оценки свойств скального массива

Определения прочностных (σ_{ci} , σ_t) и деформационных (E_y , E_o) свойств ненарушенных скальных грунтов проводились на образцах по стандартным методикам [1–3]. Литологическое описание пород и показатели свойств для каждого инженерно-геологического элемента представлены в таблице 1. В расчетах использовались показатели свойств в водонасыщенном состоянии, что в большей степени соответствует состоянию пород в массиве.

Эмпирический коэффициент m_i влияет на степень нелинейности предельной огибающей Хоека-Брауна. Он зависит от прочности контактов между минеральными частицами ненарушенного скального грунта. Существует три способа определения параметра m_i : (1) прямое определение при трехосных испытаниях; (2) расчет по корреляционным зависимостям; (3) использование имеющихся табличных данных для разных типов пород и структур. В данной работе для расчета параметра m_i использовалась корреляционная зависимость, полученная для осадочных пород и подробно описываемая в работе [7]:

$$m_i = e^{\left[1,3 \left(\frac{\sigma_{ci} - 2,5\sigma_t}{\sigma_t} \right)^{0,26} \right]} \quad (5)$$

$R^2=0,9884$,

где σ_{ci} — прочность на одноосное сжатие образца скального грунта; σ_t — прочность на разрыв образца скального грунта.

Геологический индекс прочности GSI представляет собой эмпирический показатель, позволяющий количественно 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. Геологический индекс прочности измеряется в баллах от 0 (разрушенный массив) до 100 (ненарушенный массив) (рис. 2). Существуют различные методики определения величины GSI [11, 16]. В данной работе расчет GSI производился по керну скважин через показатель трещиноватости J_{cond89} и показатель качества керна RQD [14]:

$$GSI = 1,5J_{cond89} + \frac{RQD}{2} \quad (6)$$

где J_{cond89} — показатель трещиноватости (по классификации Z. Т. Bieniawski, 1989) [9], RQD — показатель качества керна.

Коэффициент техногенной нарушенности массива (D) не зависит от типа, строения и физико-механических свойств исследуемого массива, а является

Таблица 1. Литологическое описание и свойства образцов карбонатных пород (в водонасыщенном состоянии)

ИГЭ	Индекс	Литологическое описание	Прочность на одноосное сжатие в вод. состоянии	Прочность на разрыв в вод. состоянии	Эмпирический коэффициент	Модуль общей деформации в вод. состоянии	Модуль упругости в вод. состоянии
			$\sigma_{сб}$ МПа	σ_b МПа	m , у. ед.	$E_{об}$ МПа	$E_{уб}$ МПа
3	C _{3izm}	Известняки доломитовые малопрочные, размягчаемые. В массиве раздроблены до мелких глыб, щебня и дресвы с известковой мукой, мощность 1,4–1,5 м	7	2.0	4	2398	4394
5	C _{3prh}	Известняки доломитовые средней прочности, неразмягчаемые, сильнотрещиноватые, мощность 10,5–12,0 м	30	2.8	10	3887	5677
6a	C _{3nvr}	Мергели малопрочные, размягчаемые, мощность 5,1–6,0 м	5	0.9	6	1543	3740
7	C _{3rt}	Известняки мелкозернистые средней прочности, неразмягчаемые, трещиноватые, мощность 4,7–5,1 м	35	4.9	7	6375	8734
9	C _{3sv}	Известняки доломитовые средней прочности, размягчаемые, трещиноватые, с подчиненными прослоями аргиллитоподобных глин, мощность 8,1–9,2 м	23	3.7	6	4423	7027
10	C _{2mč}	Известняки мелкодетритовые, малопрочные, размягчаемые, трещиноватые, вскрытая мощность 17,8–19,8 м	9	1.9	5	2515	4742

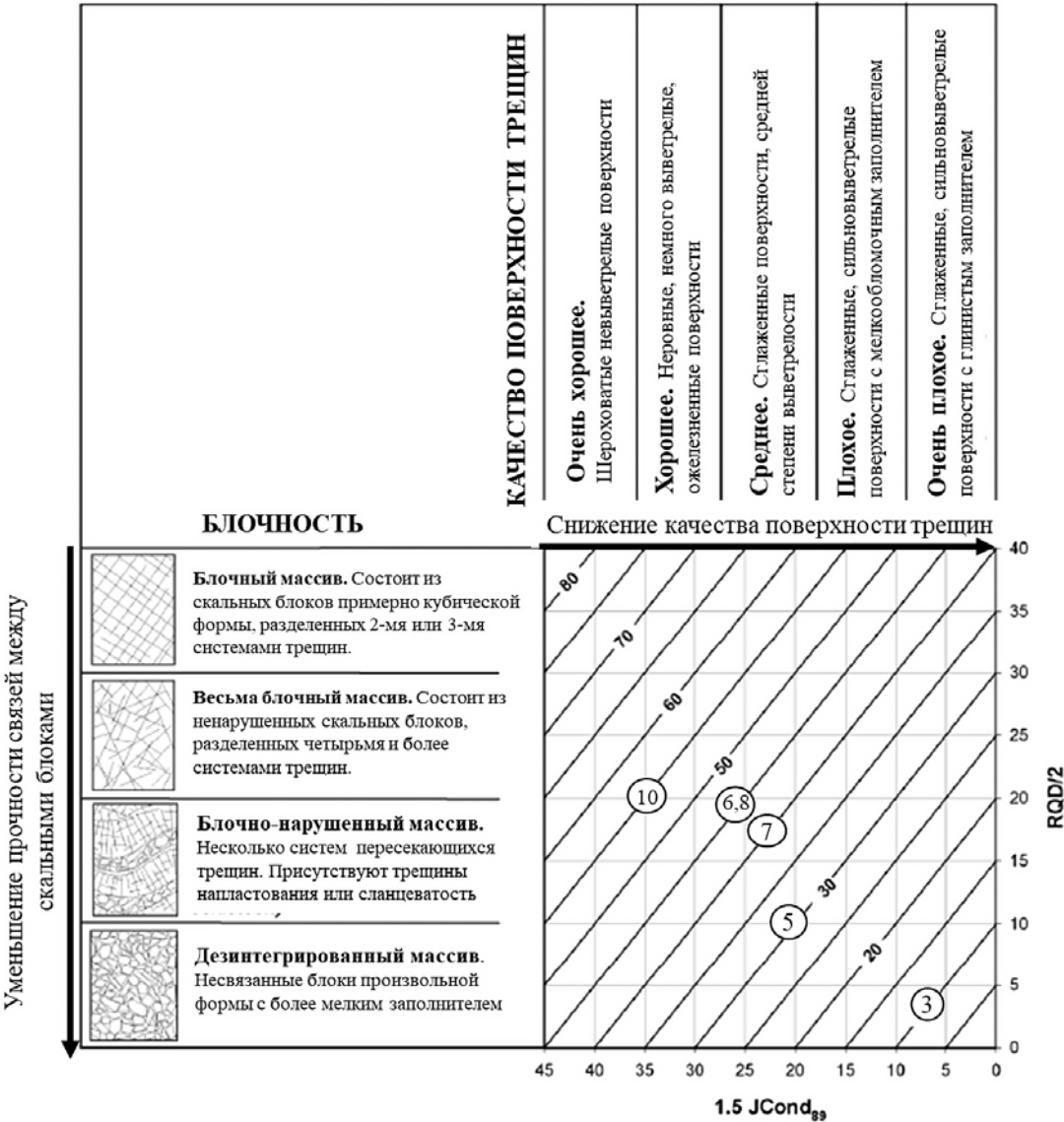


Рис. 2. Оценка геологического индекса прочности по классификации GSI. Номер в кружке соответствует ИГЭ

отражением техногенного воздействия на исследуемую породу и условий проходки. В соответствии с рекомендациями [11], для верхнего горизонта C_{3izm} значение D было принято 0,7 (механическая выемка слабого грунта), для остальных горизонтов $D=0$, поскольку данные горизонты не будут нарушены в процессе строительства.

Оценка свойства карбонатных грунтов в массиве

Расчет показателей физико-механических свойств скальных грунтов в массиве проводился с помощью ПО «RocLab». Зная значения параметров GSI и D , рассчитывались эмпирические коэффициенты m , s , a , входящие в модель Хоека-Брауна, а затем по эмпирическим формулам, приведенным в работе [11], вычислялись показатели прочностных свойств скального массива.

Модуль деформации скального массива вычислялся с использованием эмпирической формулы [15]:

$$E_{om} = E_i \left(0,02 = \frac{1 - D/2}{1 + e^{((60+15D)/11)}} \right) \tag{7}$$

Помимо этого, модуль деформации в массиве определялся с помощью прессиометрии ($E_{опр}$) [5, 6]. Для проведения опытов использовался прессиометрический комплекс ПК-3М конструкции Гидропроекта с однокомпонентным зондом 1КП-90/110. Всего было выполнено 42 прессиометрических испытания в один цикл нагружения в медленном режиме. Давление на породу увеличивалось ступенями (в карбонатных породах 8 ступеней нагружения). Величина ступеней нагружения принималась согласно ГОСТ 20276.7–2020 [5]. Максимальное рабочее давление на стенки скважины доводилось до 2,0 МПа.

В таблице 2 представлены физико-механические свойства карбонатных пород в массиве, рассчитанные по модели Хоека-Брауна и прессиометрический модуль деформации.

Обсуждение результатов

Проведено сопоставление значений показателей физико-механических свойств карбонатных пород, определенных в лаборатории на образцах, и вычисленных для массива по модели Хоека — Брауна с учетом трещиноватости. В таблице 3 приведены значения коэффициента структурного ослабления, рассчитанные для выделенных горизонтов (ИГЭ).

Установлено, что прочность пород в массиве в среднем на порядок меньше, чем прочность, полученная при испытании образцов: прочность на сжатие в среднем составляет 10–15% от прочности образца, сцепление — 15–20%. Исключением является измайловский горизонт, сложенный доломитовыми известняками, раздробленными до мелких глыб, щебня и дресвы с карманами известковой муки («разборный» массив). Для него при переходе от образца к массиву характерно снижение прочностных характеристик на два порядка. Угол внутреннего трения в массиве снижается в 1,5–2 раза. Это связано с тем, что образующиеся при разрушении образца трещины имеют неровные шероховатые поверхности, обладающие значительным трением при сдвиге, тогда как поверхности трещин, существующих в массиве, обычно более сглаженные за счет выветривания, частичного растворения карбонатного вещества и других природных процессов, что в целом снижает сопротивлению сдвигу.

Таблица 2. Свойства карбонатных пород в массиве (в водонасыщенном состоянии)

ИГЭ	Индекс	GSI, балл	σ_{cm} , МПа	σ_b , МПа	C, МПа	φ , град	E_{om} , МПа	$E_{опр}$, МПа
3	C_{3izm}	10	0,08	0,001	0,04	5	54	-
5	C_{3prh}	30	3,30	0,020	1,10	25	316	332
6a	C_{3nvr}	45	1,60	0,010	0,20	25	345	380
7	C_{3rt}	40	0,60	0,050	1,30	25	1018	448
9	C_{3sv}	45	2,80	0,060	0,90	25	989	722
10	$C_{2mč}$	55	1,30	0,060	0,40	26	1027	955

Таблица 3. Коэффициенты структурного ослабления

ИГЭ	Индекс	E_{om} / E_o	$\sigma_{cm} / \sigma_{ci}$	C_m / C	φ_m / φ	Нарушенность массива
3	C_{3izm}	0,02	0,01	0,01	0,1	Дезинтегрированный
5	C_{3prh}	0,08	0,11	0,23	0,5	Блочно-нарушенный
6a	C_{3nvr}	0,22	0,12	0,18	0,6	Весьма блочный
7	C_{3rt}	0,16	0,12	0,16	0,6	
9	C_{3sv}	0,22	0,12	0,16	0,6	
10	$C_{2mč}$	0,41	0,14	0,22	0,7	Блочный

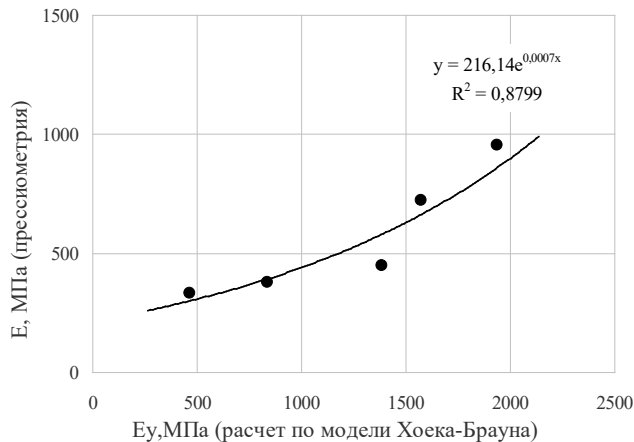


Рис. 3. Сопоставление модуля упругости массива, рассчитанного по модели Хоека-Брауна, и прессиометрического модуля деформации

Значения модулей общей деформации и упругости в массиве также существенно ниже, чем в образце. У карбонатов касимовского яруса значения модулей в массиве в среднем составляют 10–20% от образца, у известняков московского яруса — 40%. Для перхуровского горизонта, характеризующегося высокой трещиноватостью и соответственно плохой сохранностью керна ($RQD_{cp}=21\%$), значения модулей в массиве составляют 8% от образца. В наибольшей степени масштабный эффект проявляется для измайловского горизонта, представляющего собой щебенисто-глыбовые образования с мелкообломочным карбонатным заполнителем.

Следует отметить, что значения модуля общей деформации E_{om} , рассчитанные по модели Хоека-Брауна, в целом обнаруживают хорошую сходимость с данными прессиометрии (табл. 2). Существенное расхождение зафиксировано лишь для известняков ратмировского горизонта, что, вероятно, связано с неоднородностью данного слоя по трещиноватости (это выражается в сильном варьировании значений RQD), тогда как прессиометр захватывает лишь область около 0,5 м.

Рассчитанный для массива модуль упругости E_{ym} в среднем в два раза выше, чем прессиометрический модуль деформации. При этом между данными параметрами установлена тесная корреляционная связь, имеющая экспоненциальный вид (в интервале значений E_y 500–2000 МПа) (рис. 3).

Заключение

Расчеты, выполненные с помощью модели Хоека-Брауна для карбонатных пород среднего и верхнего карбона г. Москвы, показали существенное уменьшение значений показателей прочностных и деформационных свойств при переходе от образца к массиву. Наиболее значимое снижение зафиксировано для измайловского горизонта, залегающего в кровле верхнего карбона и отличающегося сильной нарушенностью. Установлено, что значения модуля деформации, рассчитанные по модели Хоека-Брауна, в целом сопоставимы с данными прессиометрии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ 21153.3–85. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном растяжении. — М.: Изд-во стандартов, 1985. — 14 с.
- ГОСТ 21153.2–84. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии. — М.: Изд-во стандартов, 1984 (изменение 2009).
- ГОСТ 28985–91. Породы горные. Метод определения деформационных характеристик при одноосном сжатии. — М.: Изд-во стандартов, 2004. — 11 с.
- ГОСТ 20522–2012. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний. — М.: Стандартинформ, 2013. — 16 с.
- ГОСТ 20276.7–2020. Грунты. Метод испытания прессиометром с секторным приложением нагрузки. — М.: Стандартинформ, 2020.
- Рекомендации по методике прессиометрических исследований. П-847–86. Гидропроект. — Москва, 1987.
- Arshadnejad S. Determination of “mi” in the Hoek-Brown failure criterion of rock // Mining Science. — 2018. — 25. — P. 111–117.
- Barton N. R. Twenty Strange Years in the World of Rock Mechanics and Engineering Geology // Current Trends in Civil & Structural Engineering. — 2025. doi.org 10.33552/CTCSE. 2025.11.000768
- Bieniawski Z. T. Engineering rock mass classifications. — New York: Wiley, 1989.
- Erharter G. H., Bar-N., Hansen T. F., Jain-S., Marcher T. International Distribution and Development of Rock Mass Classification: A Review // Rock Mechanics and Rock Engineering — 2024. <https://doi.org/10.1007/s00603-024-04215-8>
- Hoek E. Practical Rock Engineering — An Ongoing Set of Notes, 2023. Rocscience website, www.rocscience.com
- Hoek E., Brown E. T. Empirical strength criterion for rock masses // J. Geotech. Engng Div. — 1980. — ASCE 106 (GT9). — P. 1013–1035.
- Hoek E., Brown E. T. The Hoek-Brown failure criterion and GSI — 2018 edition // J. of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. — 2019. — P. 445–463.
- Hoek E., Carter T. G., Diederichs M. S. Quantification of the Geological Strength Index Chart // 47th US Rock

- Mechanics / Geomechanics Symposium, San Francisco, CA, USA June 23–26, 2013. — P. 1–9.
15. Hoek E, Diederichs M. S. Empirical estimation of rock mass modulus // Int. J. of Rock Mechanics and Mining Sciences. — 2006. — 43. — P. 203–215.
16. Marinos V., Marinos P. and Hoek E. The geological Strength index: applications and limitations // Bull. Eng. Geol. Environ. — 2005. — 64 (1). — P. 55–65. DOI: 10.1007/s10064-004-0270-5