



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

# СЕРГЕЕВСКИЕ ЧТЕНИЯ

**Выпуск 26**

Массивы грунтов как жизнеобеспечивающий  
ресурс общества

Материалы годичной сессии  
Научного совета РАН по проблемам геоэкологии,  
инженерной геологии и гидрогеологии  
(27-28 марта 2025 г.)

Москва  
Издательство «Геоинфо»  
2025

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Научный совет РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и  
гидрогеологии

Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН

Российская национальная группа МАИГ

Российский университет транспорта (МИИТ)

ТК 418 «Дорожное хозяйство» Росстандарта

при поддержке

Федерального дорожного агентства (Росавтодор)

# ***СЕРГЕЕВСКИЕ ЧТЕНИЯ***

## ***Массивы грунтов как жизнеобеспечивающий ресурс общества***

***Выпуск 26***

**Материалы годичной сессии  
Научного совета РАН по проблемам геоэкологии,  
инженерной геологии и гидрогеологии  
(27-28 марта 2025 г.)**



Москва  
Издательство «Геоинфо»  
2025

# КЛАССИФИКАЦИЯ МАССИВОВ СКАЛЬНЫХ ГРУНТОВ КАК ИНСТРУМЕНТ ИЗУЧЕНИЯ И ОЦЕНКИ ИХ ПОВЕДЕНИЯ

О.В. Зеркаль<sup>1</sup>, И.К. Фоменко<sup>2</sup>, Ю.В. Фролова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> МГУ им. М.В. Ломоносова, геологический факультет, 119234, г. Москва, Ленинские Горы, д. 1

E-mail: igzov@mail.ru, ju\_frolova@mail.ru

<sup>2</sup> РГГУ им. Серго Орджоникидзе, 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23

E-mail: ifolga@gmail.com

## Введение

В инженерной геологии во многих случаях при решении практических задач (при инженерно-строительной деятельности, в т.ч. гидротехническом строительстве, при освоении месторождений, при реализации мероприятий инженерной защиты и др.) требуется изучение и оценка горных пород в естественных условиях их залегания, для которого характерно непостоянство строения, состава и состояния, наличие различного рода неоднородностей (выветрелости, трещиноватости, сланцеватости и т.д.), а также анизотропность физико-механических свойств. При этом традиционный подход к изучению грунтов – разностороннее исследование отобранных образцов, очевидно, не обеспечивает полноты оценки состояния и характеристик массивов горных пород. Для решения этой проблемы в середине XX в. в инженерной геологии вводятся понятия «массив горных пород» и «грунтовая толща» (для территорий с преимущественным распространением нелитифицированных горных пород). В представляемой работе рассматриваются массивы скальных горных пород.

## Понятие «массив горных пород»/«массив скальных грунтов»

В настоящее время существует два подхода к выделению «массивов горных пород» (или «массивов скальных грунтов») как объектов изучения. Сторонниками первого подхода (Г.А. Голодковская, И.С. Комаров, М. Матула, Л.В. Шаумян и др.), не увязывающими это понятие напрямую с хозяйственной деятельностью, под «массивами горных пород» понимаются «структурно обособленные участки земной коры, характеризующиеся определенными особенностями тектонического, геологического строения, состояния и физико-механических свойств пород» (с. 127, Голодковская и др., 1975). И.С. Комаров уточнил, что для массивов горных пород присущи не только особенности строения и состава, но также характерно наличие дислокаций, подземных вод, физических полей и происходящих геологических процессов (Комаров, 1981). При этом массивы горных пород рассматриваются как «сложно построенные геологические среды, расчлененные поверхностями раздела на структурные (объемные и плоские) элементы различных масштабных уровней и порядков» (с. 84, Голодковская и др., 1998).

Представители второго подхода (П.Н. Панюков, М.В. Рац, Л. Мюллер и др.) увязывают понятие «массива горных пород» исключительно со сферой взаимодействия литосферы с инженерными сооружениями. В рамках этих воззрений «массив горных пород» определяется как «часть земной коры, находящейся в сфере инженерного воздействия, исследуемая с целью определения условий производства инженерных работ и эксплуатации сооружений и обладающая инженерно-геологической структурой, отличной от структуры соседних с ним участков земной коры» (с. 130, Панюков, 1962). Следует отметить, что в действующем ГОСТ 25100-2020 понятие «массива грунтов» также увязывается с объемом грунтов в основании здания/сооружения или вмещающего его.

Вместе с тем, авторы настоящей работ являются сторонниками первого подхода, считая, что ограничение изучаемой части литосферы исключительно «сферой инженерного воздействия» не позволяет в полной мере и с необходимой полнотой оценить массив горных пород, особенности его структуры, строения и другие значимые характеристики, которые могут существенно превосходить (в объеме) «сферу инженерного воздействия». Особенно это факт является наглядным при оценках устойчивости «скальных» склонов, не испытывающих прямого техногенного воздействия, но их деформации, смещения могут представлять опасность для объектов хозяйственной деятельности.

На сегодняшний день в международной практике в нормативных документах «массив горных пород» рассматривается как состоящий из ненарушенного материала вместе с разрывами и зо-

нами выветривания (ISO 14689:2017), пустотами с жидким или газообразным заполнением, часто с анизотропными свойствами (ÖGG, 2023)<sup>1</sup>. В отечественных нормативных документах, регламентирующих инженерные изыскания (ГОСТы, СП, Методические указания (для разработки МПИ) и др.), детализация понятия «массив горных пород»/«массив скальных грунтов» не дается.

### Системы классификации скального массива

Учитывая сложности изучения и оценки массивов горных пород, в инженерной геологии и в других смежных дисциплинах на протяжении десятилетий разрабатывалось (и продолжает разрабатываться) множество систем классификации скальных массивов, часто на основе эмпирических или вычисленных показателей, которые призваны помочь в общей характеристике состояния массива скальных грунтов. Сегодня существуют десятки систем классификации скальных массивов, что является признаком нерешенности вопросов описания этого природного объекта. Продолжающиеся дебаты среди инженер-геологов, геотехников, горных инженеров показывают, что научное сообщество еще не нашло оптимального решения этой проблемы.

Самая ранняя система классификации массивов горных пород была представлена Г. Агриколой (1556), различавшего 4 типа массивов. Современный этап изучения и оценки классификации скальных массивов большинством специалистов во всем мире отсчитывается с работ М.М. Протодяконова, предложившего показатель крепости горных пород  $f^2$  и разработавшего на его основе соответствующую шкалу (Протодяконов, 1911, 1926).

В 40<sup>е</sup>-50<sup>е</sup> г.г. XX в. выходят работы К. Терцаги (1946), И. Штини (1950), Л. Рабцевича (1957), Х. Лауффера (1958) и др., рассматривавшие вопросы поведения скальных массивов при проходке тоннелей. Важным шагом в оценке массивов скальных горных пород стал предложенный Д. Диром показатель качества породы - RQD (Rock Quality Designation), характеризующий (в %) отношение общей длины сохранных кусков керна длиной более 10 см к общей длине пробуренного интервала в скважине (Deere, 1963). Индекс RQD в настоящее время активно применяется как для самостоятельной классификации скальных грунтов при бурении (см. ГОСТ 25100-2020), так и в составе рейтинговых классификаций массивов грунтов.

В 70<sup>е</sup>-80<sup>е</sup> г.г. XX в. разрабатываются три наиболее широко используемых в настоящее время системы классификации массивов скальных грунтов, основанные на результатах обобщений эмпирических данных:

- классификация (рейтинг горных пород - RMR), предложенная в 1973 г. З.Т. Беньявским (Bieniawski, 1973);
- Q-классификация, разработанная Н. Бартоном с соавторами в 1974 г. (Barton et al., 1974);
- классификация по критерию прочности Хоэка-Брауна, предложенная в 1980 г. Э. Хоэком и Э.Т. Брауном (Hoek, Brown, 1980).

Геомеханическая классификация Беньявского (RMR), по мере поступления новых данных, полученных в ходе исследований, модифицировалась. Одна из последних версий RMR была принята в 1989 г. (Bieniawski, 1989). В классификации RMR используются 6 параметров:  $J_{A1}$  - прочность пород на одноосное сжатие;  $J_{A2}$  - показатель качества пород RQD;  $J_{A3}$  - расстояние между трещинами;  $J_{A4}$  - характер трещиноватости (наличие заполнителя, шероховатость поверхностей трещин);  $J_{A5}$  - обводненность трещин;  $J_B$  - ориентировка трещин (относительно проходки выработок). Сумма рейтинговых значений этих показателей в совокупности дают общий рейтинг массива:

$$RMR = J_{A1} + J_{A2} + J_{A3} + J_{A4} + J_{A5} + J_B$$

Значения рейтинга варьируются от 8 до 100. При этом, горные породы делятся на 5 классов по устойчивости. В настоящее время предложена целая серия модификаций RMR-классификации Беньявского для различных целей и условий (горного дела (проектирования карьеров), например,

<sup>1</sup> ГОСТ Р ИСО 14689-1-2017 Исследования и испытания геотехнические. Идентификация и классификация скальных грунтов. ч. 1. Идентификация и описание (ISO 14689-1:2003, IDT) содержит следующее определение: «3.2 скальный массив (rock mass): Естественное геологическое образование из совокупности блоков одной или нескольких горных пород, включая все нарушения и изменения структуры и целостности (трещиноватости и профиля выветривания).»

<sup>2</sup> В настоящее время принимается, что  $f \approx 0,1 \sigma_{сж}$ , где  $\sigma_{сж}$  - предел прочности на одноосное сжатие (МПа).

Д. Лобширом (MRMR – Mining Rock Mass Rating), оценки устойчивости массивов «скальных» склонов, например, М. Романа (SMR - Slope Mass Rating) и др.).

Q-классификация Н. Бартона также основывается на учете шести параметров. Численное значение индекса Q определяется по формуле:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_v}{SFR}$$

где  $RQD$  - показатель качества породы;  $J_n$  - количество систем трещин;  $J_r$  - показатель шероховатости трещин;  $J_a$  - показатель изменения числа трещин;  $J_v$  – показатель обводненности трещин;  $SFR$  – коэффициент, учитывающий природное напряженное состояние массива.

Численное значение индекса Q варьирует от 0,001 до 1000 по логарифмической шкале.

Классификации З.Т. Бенявского и Н. Бартона основаны на рейтинговых оценках и учитывают информацию о прочности нетронутого породного массива, о числе и характеристиках поверхностей трещин и их плотности, а также влияние подземных вод, действующих в массиве природных напряжений, пространственное расположение и простирание основных систем трещин. Вместе с тем, учитываемые показатели имеют несколько различный вес в каждой из рассматриваемых классификационных систем. Этот факт отмечается многими специалистами, которые предпринимали попытки получения корреляционных зависимостей значений показателя RMR и индекса Q.

В 1980 г. для классификации массивов скальных пород Э. Хоеком и Э.Т. Брауном был предложен нелинейный критерий прочности, в первоначальной форме имевший вид (Хоек, Brown, 1980):

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \sqrt{m \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + 1},$$

где  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  - главные напряжения,  $\sigma_c$  – прочность на одноосное сжатие,  $m$  – эмпирический параметр для горных пород.

Критерий Хоека-Брауна развивался, опираясь на результаты обобщений эмпирических данных, в течение более чем двух десятилетий. Последняя версия (в ред. 2018) рассматриваемого критерия известна под названием «Обобщенного критерия Хоека-Брауна» (Generalised Hoek-Brown criterion) (Хоек, Brown, 2019). Согласно обобщенного критерия Хоека-Брауна, для расчета прочности требуется четыре начальных параметра:

$\sigma_{ci}$  – прочность на одноосное сжатие;

$m_i$  – литологический тип грунтов;

$GSI$  – индекс геологической прочности, зависящий от структуры массива, например, ненарушенный, блочный, флишевый и т.д. (от 0 до 100);

$D$  – фактор нарушенности массива горных пород (от 0 до 1).

Каждый из описанных выше четырех входных параметров ( $\sigma_{ci}$ ,  $m_i$ ,  $GSI$ ,  $D$ ) может быть оценен на основе классификационных графиков и таблиц Хоека-Брауна в зависимости от конкретных геологических условий. Обобщенный критерий Хоека-Брауна (в ред. 2018) может быть определен следующим образом (Хоек, Brown, 2019):

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a,$$

где  $\sigma'_1$  и  $\sigma'_3$  – эффективные главные напряжения,  $\sigma_{ci}$  – прочность на одноосное сжатие,  $m_b$ ,  $s$  и  $a$  – параметры Хоека-Брауна для пород, которые можно получить из следующих уравнений:

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

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

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

$$E_m (GPa) = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} * 10^{\left(\frac{GSI-10}{40}\right)}$$

Индекс геологической прочности (GSI), введенный в 1992 г., в свою очередь, наиболее эффективным методом оценивается с использованием уравнения (Методические указания..., 2022):

$$GSI = 1,5 J_{Cond}^{89} + \frac{RQD}{2}$$

Как видно из приведенной формулы индекс геологической прочности (GSI) определяется через показатель состояния поверхности трещин ( $J_{Cond}^{89}$ ), наследуемый из рейтинговой классификации Бенявского (RMR), и показатель качества керна (RQD).

### **Направления применения систем классификации скальных массивов**

В настоящее время в инженерно-геологической практике как вышеописанные классификации массивов скальных грунтов (наиболее часто), их модификации, а также другие подходы (например, A-BQ в Китае) активно используются при выполнении работ на территориях с широким распространением скальных горных пород, а также в рамках изысканий при проектировании подземных или заглубленных объектов в других регионах (например, в последние годы – на территории Москвы). Этому способствует разработанные методы (эмпирические формулы) перехода от рейтинговых показателей к традиционно используемым показателям свойств грунтов (например, модулю общей деформации массива скальных грунтов).

Другим важным направлением применения классификаций массивов скальных грунтов являются работы по оценке устойчивости «скальных» склонов. Для решения этого круга задач разработаны методы оценки прочностных показателей скальных грунтов как с использованием индекса геологической прочности (GSI), предложенного Э. Хоеком, так и на основе применения критериев прочности Бартона-Бандиса (в составе Q-slope (Bar, Barton, 2024)). Пример реализации этого подхода приведен в (Зеркаль, Фоменко, 2016).

### **Выводы**

Решение практических задач в инженерной геологии на основе систем классификации скальных массивов может способствовать более близкому приближению получаемых результатов к реальным условиям скального массива, а также может способствовать лучшему пониманию существующих геологических неопределенностей. Вместе с тем, при применении этого подхода следует четко понимать то, что разработанные классификации массивов грунтов основаны на эмпирических данных и могут давать существенный разброс результатов в зависимости от природных условий.

### *Литература*

1. Голодковская Г.А., Демидюк Л.М., Шаумян Л.В. Состав и содержание инженерно-геологических карт при разведке и проектировании месторождений полезных ископаемых. Проблемы инженерно-геологического картирования (Тр. Всесоюз. симп.). М., Изд-во Моск. ун-та, 1975, с. 119-135
2. Голодковская Г.А., Шаумян Л.В. Инженерно-геологическая типизация массивов горных пород//Изв. Вышш. уч. завед. Геология и разведка. 1998. №6. с. 84-91
3. Зеркаль О.В., Фоменко И.К. Оползни в скальных грунтах и оценка их устойчивости//Инженерная геология. 2016. №4. с. 4-21
4. Комаров И.С. Системный подход к инженерно-геологическому изучению территорий городских агломераций//Методы типизации и картирования геологической среды городских агломераций для решения задач планирования инженерно-хозяйственной деятельности. М.: МосЦТИСИЗ, 1981, с. 87-94
5. Методические указания по изучению массива горных пород для обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов. М., ИПКОН РАН, 2022, 102 с.
6. Панюков П.Н. Инженерная геология. М., Госгортехиздат, 1962, 343 с.
7. Протодьяконов М.М. Материалы для урочного положения горных работ Ч. 1. Горные работы. Изд-во ЦК горнорабочих СССР, 1926, 282 с.
8. Протодьяконов М.М. О крепости горных пород с точки зрения горного искусства//Горнозаводское дело. 1911. №52
9. Bar N., Barton N. Q Slope: Rock Slope Engineering 10 Years on//Rock Mechanics and Rock Engineering. 2024

10. Barton N., Lien R., Lunde J. *Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support*//*Rock Mechanics*. 1974. 6. pp. 189-236
11. Bieniawski Z.T. *Engineering classification of jointed rock masses*. *Civil Engineer in South Africa*. 1973. 15(12). pp. 335-343
12. Bieniawski Z.T. *Engineering rock mass classifications*. New York, Wiley, 1989, 251 p.
13. Deere D.U. *Technical description of rock cores for engineering purposes*//*Rock Mechanics and Engineering Geology*. 1963. 1(1). pp. 16-22
14. Hoek E., Brown E.T. *Empirical Strength Criterion for Rock Masses*. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*. 1980. 106(9). pp. 1013-1035
15. Hoek E., Brown E.T. *The Hoek-Brown failure criterion and GSI - 2018 edition*//*Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2019, 11, pp. 445-463
16. Hoek E., Wood D., Shah S. *A modified Hoek-Brown criterion for jointed rock masses*. *Proc. rock characterization. Symp. Int. Soc. Rock Mech. (Eurock'92)*. pp. 209-213
17. ISO 14689:2017 (E) *Geotechnical investigation and testing - Identification, description and classification of rock*. 2018, 22 p.
18. ÖGG *Richtlinie Geotechnische Planung von Untertagebauten Zyklischer und kontinuierlicher Vortrieb: Gebirgscharakterisierung und Vorgangsweise zur nachvollziehbaren Festlegung von bautechnischen Maßnahmen während der Planung und Bauausführung*, 2023