РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

2022 № 6

УДК 624.121

КОРРЕЛЯЦИЯ ОТСКОКА МОЛОТКА ШМИДТА И ИНДЕКСА ТОЧЕЧНОЙ НАГРУЗКИ С ПРОЧНОСТЬЮ НА СЖАТИЕ ОСАДОЧНЫХ, МАГМАТИЧЕСКИХ И МЕТАМОРФИЧЕСКИХ ПОРОД

H. Аббас¹, К. Ли², **H.** Аббас¹, Р. Али¹

¹Международный университет Каракорума, E-mail: naeem.abbas@kiu.edu.pk, г. Гилгит, Пакистан ²Куньминский университет науки и технологии, 650093, г. Куньмин, провинция Юньнань, Китай

Для определения прочности горной породы на одноосное сжатие с помощью косвенных методов — отскока молотка Шмидта и индекса точечной нагрузки — необходимы эмпирические уравнения, соответствующие типу породы. Для решения данной задачи разработаны специальные модели для трех типов пород. Рассмотрены линейная, показательная и квадратичная регрессионные модели осадочных, магматических и метаморфических пород. Наибольшую корреляцию имеет квадратичная модель. Обобщенная модель показала малый коэффициент корреляции по сравнению с отдельными моделями.

Прочность на одноосное сжатие, индекс точечной нагрузки, молоток Шмидта, корреляция

DOI: 10.15372/FTPRPI20220604

Прочность горной породы на одноосное сжатие (USC) — основной параметр, используемый при проектировании выработок, классификации породных массивов и определении прочностных характеристик породы на сдвиг. Для ее определения в лабораторных условиях применяется универсальная испытательная установка. В [1-3] предложены стандартные методы определения USC, требующие значительных финансовых и временных затрат. Иногда получение кернов нужного размера невозможно, особенно из трещиноватой и рыхлой породы. Такие косвенные методы, как измерение отскока молотка Шмидта (N) и использование индекса точечной нагрузки (PLI), относительно просты, не требуют изготовления специальных образцов и применяются в лабораторных и полевых условиях.

Изначально молоток Шмидта был разработан для определения поверхностной твердости бетона, позже модифицирован для определения USC горных пород [4, 5]. В [6, 7] описана первая эмпирическая модель для расчета USC косвенным способом по N и выявлена линейная корреляция между ними. В [8] получена экспоненциальная зависимость между N и USC для известняковой породы с коэффициентом корреляции $R^2 = 0.77$.

Индекс точечной нагрузки широко используется при определении USC горных пород [9-12]. В [13, 14] предложена зависимость между PLI и USC для кернов, в [15, 16] — для пористых пород, в [17-19] — общие соотношения между USC и PLI. Результаты других научных работ приведены в табл. 1.

Тип породы	Коррелирующее уравнение	Источник	Страна	
Разные	UCS = 23.7 PLI	[20]	Великобритания	
Песчаник	UCS = 23.9 PLI	[21]	ЮАР	
Озадочника	UCS = 29.0 PLI	[22]	Ранинабритания	
Осадочные	UCS = 20.0 - 25.0 PLI	[23]	Великобритания	
Известняк	UCS = 26.5 PLI	F2.41	D 5	
Песчаник	UCS = 24.8 PLI	[24]	Великобритания	
Песчаник	UCS = 17.4 PLI	[25]	CIIIA	
Сланец	UCS = 12.6 PLI	[25]	CIIIA	
Кварцит	UCS = 23.4 PLI	[26]	Индия	

ТАБЛИЦА 1. Обзор научных работ определения USC косвенными методами

Цель настоящей работы — разработка эмпирических соотношений для определения USC косвенным образом. Они получены в таком виде, чтобы могли применяться к разным породам одного типа и позволяли определять USC с помощью N и PLI для быстрой оценки прочности благодаря простоте, портативности и низким затратам рассматриваемых методов.

МЕТОДОЛОГИЯ

Данные для определения соотношения между USC и PLI взяты из [11, 27–30], где выполнено 182 испытания (на осадочные породы приходится 92, магматические — 61, метаморфические — 29), данные для выявления соотношения между USC и N — из [8, 31–33], где проведено 170 испытаний (на осадочные породы приходится 85, магматические — 76, метаморфические — 9). Статистическая регрессия анализировалась с помощью статистического пакета, разработанного для гуманитарных наук (SPSS). Для каждого типа породы применялась линейная, показательная и квадратичная модели. Используя статистические методы, проведены описательный статистический, оценочный параметрический и корреляционный анализы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для выявления корреляционных зависимостей USC от N и PLI выполнен статистический анализ. Максимальные значения USC $_{\rm max}$ для осадочных пород составили 147 МПа, для магматических — 202, для метаморфических — 203 МПа. В табл. 2 приведены обобщенные данные и данные для каждого типа породы.

ТАБЛИЦА 2. Описательная статистика для разных пород, МПа

Параметр	Осадочные породы		Метаморфические породы		Магматические породы		Разные породы	
	Среднее значение	СКО	Среднее значение	СКО	Среднее значение	СКО	Среднее значение	СКО
USC	95.800	43.883	92.040	2.257	71.342	44.769	84.850	44.495
N	37.250	11.516	50.400	6.866	47.249	12.630	42.400	12.878
USC	61.120	47.292	71.151	51.388	91.380	52.475	72.861	51.302
PLI	3.635	2.454	4.330	2.721	5.268	4.036	4.293	3.180

 Π р и м е ч а н и е. СКО — среднеквадратическое отклонение.

Рассмотрены три статистические модели: линейная, показательная и квадратичная. Результаты моделирования и параметрическая оценка корреляции представлены в табл. 3. По точности результатов наиболее предпочтительна квадратичная, далее идут линейная и показательная модели. В результате обработки обобщенных данных всех горных пород коэффициент корреляции USC и N для линейной модели составил 0.40, для квадратичной — 0.43, для показательной — 0.24. Ни один коэффициент корреляции не показывает косвенную зависимость между USC и N, т. е. ни одна одиночная зависимость не отражает все горные породы. Оценка статистических данных разных типов горных пород выполнена независимо друг от друга.

ТАБЛИЦА 3. Анализ моделей и оценка параметров уравнения

Уравнение	Анализ моделей				Оценка параметров квадратичной модели				
•	R^2	F	df_1	df_2	Значимость	Постоянная	b_1	b_2	
Обобщенные данные для USC и N									
Линейное	0.408	116.421	1	169	0	-8.721	2.207	_	
Квадратичное	0.434	64.367	2	168	0	72.780	-1.840	0.046	
Показательное	0.240	53.290	1	169	0	1.599	1.027		
Обобщенные данные для USC и PLI									
Линейное	0.646	329.021	1	180	0	17.187	12.968	_	
Квадратичное	0.716	225.379	2	179	0	-5.786	25.025	-1.010	
USC и N для осадочных пород									
Линейное	0.799	334.952	1	84	0	-31.126	3.407	_	
Квадратичное	0.836	211.284	2	83	0	50.917	-0.870	0.051	
Показательное	0.701	197.246	1	84	0	1.227	1.194		
USC и PLI для осадочных пород									
Линейное	0.604	137.310	1	90	0	6.685	14.976		
Квадратичное	0.750	133.236	2	89	0	-26.339	34.642	-2.000	
Показательное	0.700	280.622	1	90	0	11.880	1.172		
		US	SC и <i>N</i> д	ля магмат	ических пород	Į			
Линейное	0.616	117.180	1	73	0	-60.051	2.781	_	
Квадратичное	0.648	66.302	2	72	0	60.265	-2.820	0.061	
Показательное	0.484	68.515	1	73	0	0.030	1.968		
USC и PLI для магматических пород									
Линейное	0.665	116.988	1	59	0	35.538	10.599		
Квадратичное	0.771	97.583	2	58	0	13.147	23.160	-1.000	
Показательное	0.703	139.409	1	59	0	36.285	0.578		
USC и N для метаморфических пород									
Линейное	0.827	38.373	1	8	0	76.965	0.299		
Квадратичное	0.872	23.848	2	7	0.001	25.487	2.501	-0.020	
Показательное	0.839	41.753	1	8	0	49.836	0.157	_	
USC и PLI для метаморфических пород									
Линейное	0.737	75.817	1	27	0	0.927	16.215		
Квадратичное	0.739	36.866	2	26	0	7.617	13.379	0.216	
Показательное	0.574	36.396	1	27	0	18.425	0.872	_	

 Π р и м е ч а н и е. R^2 — коэффициент корреляции; F — распределение; df — степень свободы; b_1, b_2 — коэффициенты регрессионных соотношений.

На рис. 1 приведена обобщенная модель корреляции USC с N и PLI для всех типов пород. Фактические значения USC имеют слабую корреляцию с N и PLI. Коэффициент корреляции R^2 между USC и PLI для показательной модели составил 0.24, для линейной — 0.40, для квадратичной — 0.43, а между USC и N для линейной модели — 0.62, для показательной — 0.64, для квадратичной — 0.70. Наибольшим коэффициентом R^2 обладает квадратичная модель, но этого недостаточно для удовлетворительной надежности уравнения. Это означает, что одна и та же зависимость USC от N и PLI для всех типов пород не может использоваться, поскольку существуют разные механизмы разрушения и деформирования каждой породы. Разница в пористости также влияет на соотношение USC и PLI [34].

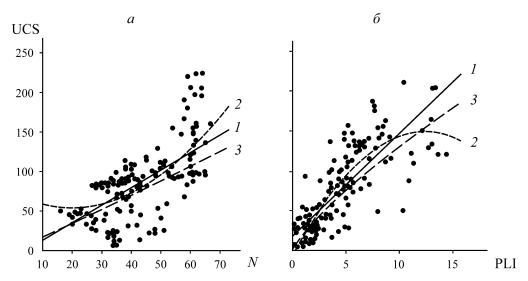


Рис. 1. Корреляция между USC и N(a), USC и PLI (δ) для разных типов пород: • — фактическое значение; I — линейное уравнение; 2 — квадратичное; 3 — показательное

Эмпирические зависимости USC от N и PLI для наборов данных всех пород отражают уравнения:

UCS =
$$0.046N^2 - 1.846N + 72.78$$
,
UCS = $-1.01(PLI)^2 + 25.02PLI - 5$,

которые с наибольшей точностью характеризуют данные по сравнению с двумя другими моделями.

На рис. 2 представлены корреляционные зависимости USC от N и PLI для осадочных пород. В обоих случаях наилучшая корреляция получена с помощью квадратичной модели. Коэффициенты корреляции между USC и N для линейной, квадратичной и показательной модели составили 0.790, 0.836 и 0.701 соответственно. Наибольший коэффициент $R^2 = 0.836$ зафиксирован при квадратичном соотношении между USC и N, что значительно выше коэффициента обобщенной модели (0.4). Коэффициенты корреляции между USC и PLI для линейной, квадратичной и показательной модели составили 0.60, 0.75 и 0.70 соответственно. Наибольший коэффициент корреляции $R^2 = 0.75$ получен также с помощью квадратичной модели. Квадратичные модели описываются уравнениями:

UCS =
$$0.051N^2 - 0.877N + 50.9$$
,
UCS = $-2(PLI)^2 + 34.6PLI - 26$.

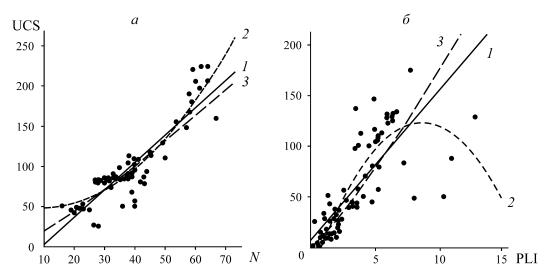


Рис. 2. Корреляция между USC и N (a), USC и PLI (δ) для осадочных пород: • — фактические значения; I — линейное уравнение; 2 — квадратичное; 3 — показательное

Корреляция USC с N и PLI для магматических пород показана на рис. 3. Коэффициенты R^2 между USC и N для линейной, квадратичной и показательной модели составили 0.610, 0.648 и 0.480 соответственно. Наибольший коэффициент R^2 между USC и N получен для квадратичной модели. Для квадратичной модели R^2 значительно превышает (0.77) коэффициенты, полученные другими моделями. В обоих случаях R^2 выше, чем в обобщенных моделях. Квадратичные модели описываются уравнениями:

UCS =
$$0.061N^2 - 2.829N + 60$$
,
UCS = $-(PLI)^2 + 23.16PLI + 13.146$.

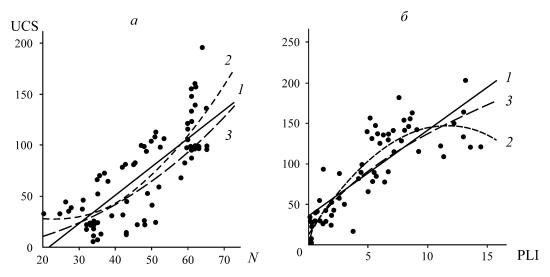


Рис. 3. Корреляция между USC и N(a), USC и PLI (б) для магматических пород: • — фактические значения; I — линейное уравнение; 2 — квадратичное; 3 — показательное

Корреляция USC с N и PLI для метаморфических пород приведена на рис. 4. Коэффициент корреляции R^2 между USC и N для линейной, квадратичной и показательной модели составил 0.820, 0.872 и 0.830 соответственно. Наибольший $R^2 = 0.872$ получен для квадратичной модели.

Наибольший коэффициент корреляция между USC и PLI составил 0.740 также для квадратичной модели. Данные модели описываются уравнениями:

UCS =
$$-0.023N^2 + 2.51N + 25.48$$
,
UCS = $0.216(PLI)^2 + 13.379PLI + 7.6$.

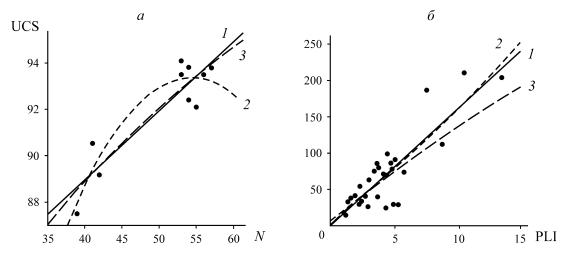


Рис. 4. Корреляция между USC и N(a), USC и PLI (б) для метаморфических пород: • — фактические значения; 1 — линейное уравнение; 2 — квадратичное; 3 — показательное

Отметим, что наблюдается значительное различие параметров эмпирических уравнений для определения USC разных типов пород, а в корреляционных графиках обобщенных данных имеет место значительный разброс. Однако при рассмотрении каждого типа породы в отдельности получена большая согласованность данных. Установлено, что USC зависит от типа породы, в связи с чем требуется детальное изучение пород в рамках одного типа для получения более точных зависимостей USC от N и PLI. Предложенные ранее линейные модели (табл. 2) не всегда являются подходящими из-за низкого коэффициента корреляции (табл. 3). Это означает, что одно уравнение прогнозирования USC на основе N и PLI не может подходить для всех типов горных пород. Отдельные уравнения для каждого типа породы дают более точные результаты, более высокие коэффициенты корреляции USC.

выводы

По данным методов индекса точечной нагрузки и отскока молотка Шмидта можно прогнозировать прочность горной породы на сжатие USC. Это простая альтернатива лабораторным методам определения прочности. USC породы зависит от ее типа, поэтому одного уравнения для всех типов пород для прогнозирования через N и PLI недостаточно. Путем упорядочивания данных по трем видам пород: осадочным, метаморфическим и магматическим разработаны линейная, квадратичная и показательная модели корреляции USC с данными отскока молотка Шмидта и индекса точечной нагрузки. Среди различных моделей прогнозирования USC через N и PLI квадратичная модель показала наиболее высокий коэффициент корреляции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- **1. ASTM D.** Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil, ASTM standard D 2166, 2006.
- **2.** Ulusay R. The ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring 2007–2014, Springer, Bull. Eng. Geol. Env., 2015, Vol. 74, No. 4.
- **3. ASTM D 2344-00.** Standard test method for apparent interlaminar shear strength of parallel fiber composites by short-beam method, Annual Book of ASTM Standards, 1984. 15 p.
- **4. Schmidt E.** A non-destructive concrete tester, Concrete, 1951, Vol. 59. P. 34–35.
- **5.** Cargill J. S. and Shakoor A. Evaluation of empirical methods for measuring the uniaxial compressive strength of rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstracts, 1990, Vol. 27, No. 6. P. 495–503.
- **6. Deere D. and Miller R.** Engineering classification and index of intact rocks, technicality report, New Mexico, Air Force Weapons Lab, Kirtland air force base, 1996, No. AFWL-TR-65-116.
- 7. Qureshi J. A., Abbasi N., Mir Z., and Khan A. Correlation of Schmidt hammer rebound numbers with ultrasonic pulse velocity and slake durability index of dolomitic limestone of Khyber, North Pakistan, Int. J. Econom. Env. Geol., 2022, Vol. 13, No. 1. P. 18–22.
- **8.** Arslan M., Khan M. S., and Yaqub M. Prediction of durability and strength from Schmidt rebound hammer number for limestone rocks from Salt Range, Pakistan, J. Himalayan Earth Sci., 2015, Vol. 48, No. 1. P. 9–13.
- 9. Smith H. J. The point load test for weak rock in dredging applications, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 1997, Vol. 34, No. 3-4. P. 295.
- **10. Yilmaz I.** A new testing method for indirect determination of the unconfined compressive strength of rocks, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2009, Vol. 46, No. 8. P. 1349–1357.
- 11. Singh T., Kainthola A., and Venkatesh A. Correlation between point load index and uniaxial compressive strength for different rock types, J. Rock Mech. Rock Eng., 2012, Vol. 45, No. 2. P. 259–264.
- **12. Akbay D. and Ekincioglu G.** Usability of digital shore hardness devices in estimation of physical and mechanical properties of rocks, J. Min. Sci., 2021, Vol. 57, No. 4. P. 696–702.
- **13.** Chau K. and Wong R. Uniaxial compressive strength and point load strength of rocks, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstracts, 1996, Vol. 33, No. 2. P. 183–188.
- 14. Abbas N., Akhter J. Q., Khan G., Alam M., Khan H., Bano Ya., Alam M., Rehman ur Shams, Khanet A. Relationship of physical properties of limestone and marble with rock strength under specific geological conditions from Khyber region Hunza, Int. J. Econom. Env. Geol., 2019, Vol. 10, No. 4. P. 14–18.
- **15.** Palchik V. and Hatzor Y. The influence of porosity on tensile and compressive strength of porous chalks, J. Rock Mech. Rock Eng., 2004, Vol. 37, No. 4. P. 331–341.
- **16. Abbas N., Li K., Khan A., and Qureshi J.** The influence of thermal breakage on physio-mechanical behavior of Ghulmet marble north Pakistan, Int. J. Min. Geo-Eng., 2022, Vol. 56, No. 2. P. 199–203.
- 17. Grasso P., Xu S., and Mahtab A. Problems and promises of index testing of rocks, The 33th US Symp. Rock Mech. (USRMS), American Rock Mechanics Association, 1992. P. 879–888.
- **18. Quane S. L. and Russell J. K.** Rock strength as a metric of welding intensity in pyroclastic deposits, European J. Mineralogy, 2003, Vol. 15, No. 5. P. 855–864.
- **19. Tsiambaos G. and Sabatakakis N.** Considerations on strength of intact sedimentary rocks, Eng. Geol., 2004, Vol. 72, No. 3 4. P. 261 273.
- **20.** Broch E. and Franklin J. The point-load strength test, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstracts, 1972, Vol. 9, No. 6. P. 669 676.
- **21.** Bieniawski Z. The point-load test in geotechnical practice, Eng. Geol., 1975, Vol. 9, No. 1. P. 1–11.

- 22. Hassani F., Scoble M., and Whittaker B. Application of the point load index test to strength determination of rock and proposals for a new size-correction chart, The 21st US Symp. Rock Mech. (USRMS), American Rock Mechanics Association, 1980. P. 543–553.
- **23.** Franklin J. Suggested method for determining point load strength, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstracts, 1985. P. 51–60.
- **24. Hawkins A. and Olver J.** Point load tests: Correlation factors and contractual use. An example from the corallian at Weymouth, Geological Society, London, Eng. Geol. Special Publications, 1986, Vol. 2, No. 1. P. 269–271.
- **25.** Vallejo L. E., Welsh Jr R. A., and Robinson M. K. Correlation between unconfined compressive and point load strengths for Appalachian rocks, The 30th US Symp. Rock Mech. (USRMS), American Rock Mechanics Association, 1989. P. 461–468.
- **26. Singh V. and Singh D.** Correlation between point load index and compressive strength for quartzite rocks, J. Geotech. Geolog. Eng., 1993, Vol. 11, No. 4. P. 269 272.
- **27. Kahraman S. and Gunaydin O.** The effect of rock classes on the relation between uniaxial compressive strength and point load index, Bull. Eng. Geol. Env., 2009, Vol. 68, No. 3. P. 345 353.
- **28. Akram M. and Bakar M. A.** Correlation between uniaxial compressive strength and point load index for salt-range rocks, Pakistan J. Eng. Appl. Sci., 2007. P. 1–8.
- **29. Endait M. and Juneja A.** New correlations between uniaxial compressive strength and point load strength of basalt, Int. J. Geotech. Eng., 2015, Vol. 9, No. 4. P. 348–353.
- **30. Affam M., Asare E., and Aikins D.** Correlation analysis of uniaxial compressive strength (UCS) and point load index *Is*₅₀ of banket conglomerate within Tarkwaian deposits of Ghana, Technology, 2019, Vol. 10, No. 6. P. 418–434.
- **31.** Torabi S., Ataei M., and Javanshir M. Application of Schmidt rebound number for estimating rock strength under specific geological conditions, J. Min. Env., 2010, Vol. 1, No. 2. P. 1–8.
- **32. Dincer I. et al.** Correlation between Schmidt hardness, uniaxial compressive strength and Young's modulus for andesites, basalts and tuffs, Bull. Eng. Geol. Env., 2004, Vol. 63, No. 2. P. 141–148.
- **33.** Aydin A. and Basu A. The Schmidt hammer in rock material characterization, Eng. Geol., 2005, Vol. 81, No. 1. P. 1–14.
- **34. Karaman K. and Kesimal A.** Evaluation of the influence of porosity on the engineering properties of volcanic rocks from the Eastern Black Sea Region: NE Turkey, Arabian J. Geosciences, 2015, Vol. 8, No. 1. P. 557–564.

Поступила в редакцию 13/X 2020 После доработки 21/X 2022 Принята к публикации 24/XI 2022