

УДК 539.3-620.1

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ ЦИФРОВЫХ ПРИБОРОВ ИЗМЕРЕНИЯ
ТВЕРДОСТИ ПО ШОРУ ПРИ ОЦЕНКЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРОДЫ**

Д. Акбай¹, Г. Экинсилу²

¹Университет 18 марта в Чанаккале, Колледж Кан,

E-mail: denizakbay@comu.edu.tr, 17400, г. Чанаккале, Турция

²Университет Ахи Эвран, Колледж Каман, 40300, г. Кыршехир, Турция

Проведены измерения твердости по Шору карбонатной породы склерометром Шора модели С-2 и твердомерами РСЕ-1000, Mitech МН310. Выполнено сравнение полученных результатов и обоснована применимость цифровых приборов измерения твердости по Шору.

Твердость породы, твердость по Шору, природный камень, физико-механические свойства

DOI: 10.15372/FTPRPI20210418

Твердость — наиболее изученное и сложное свойство горной породы. Это способность породы сопротивляться внешней механической нагрузке. При разработке инженерных проектов, проходки подземных выработок, возведении плотин, оснований и склонов физические и механические свойства нетронутой породы имеют крайне важное значение. Непосредственная оценка прочности и деформации породы требует больших затрат и занимает продолжительное время на подготовку образцов.

Для определения инженерных свойств породы разработаны косвенные методы, включающие точечную нагрузку, твердость по отскоку молотка Шмидта, твердость по Шору и абразивную твердость. Такие измерения просты в исполнении, не требуют больших затрат и выполняются за короткое время [1]. Твердость породы напрямую связана с ее химической и атомной структурой, отражающей физические и механические свойства породы. Величину твердости легко оценить количественно, но сложно количественно описать. В большинстве своем разработанные методы определения твердости оценивают сопротивляемость материала царапанию или вдавливанию [2].

Существуют разные методы определения твердости для различных материалов. В металлургии разработаны методы расчета твердости металлических материалов. Обычно используются такие динамические методы, как молоток Шмидта, склероскоп Шора, твердость по методу Либа и др. Они более дешевые и функциональные по сравнению со статическими методами и методами вдавливания (твердость по Бринеллю, Виккерсу, Роквеллу, Кнупу, CERCHAR, ASTM) [3, 4].

Твердость отскока — показатель величины отскока объекта от поверхности породы. Степень отскока — функция количества потерянной энергии на пластическую деформацию и разрушение породы в точке падения [4, 5]. В [6] предложена шкала твердости на основе стандартного ряда из десяти пород, которым присвоена относительная твердость. Твердость исследуемой породы измеряется путем царапания их поверхности разными минералами. Это простой, но недостаточно точный метод оценки механических свойств [2]. Ввиду своей практичности и экономичности широко используется склероскоп Шора модели С-2. Физико-механические свойства горных пород важны при проектировании подземных выработок и классификации пород. Для этого применяется твердость по Шору. В [1 – 5] рассмотрены вопросы измерения твердости, твердость пород и соотношения между твердостью и физико-механическими свойствами.

Цель настоящей работы — исследование применимости цифровых твердомеров вместо склероскопа Шора модели С-2 и формулировка соотношения между твердостью Шора и физико-механическими свойствами породы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Твердость по Шору определялась у одинаковых образцов 13 карбонатных пород из разных регионов Турции (табл. 1) с помощью склероскопа Шора модели С-2, цифровых твердомеров PSE-1000 и Mitech MH310 (рис. 1).

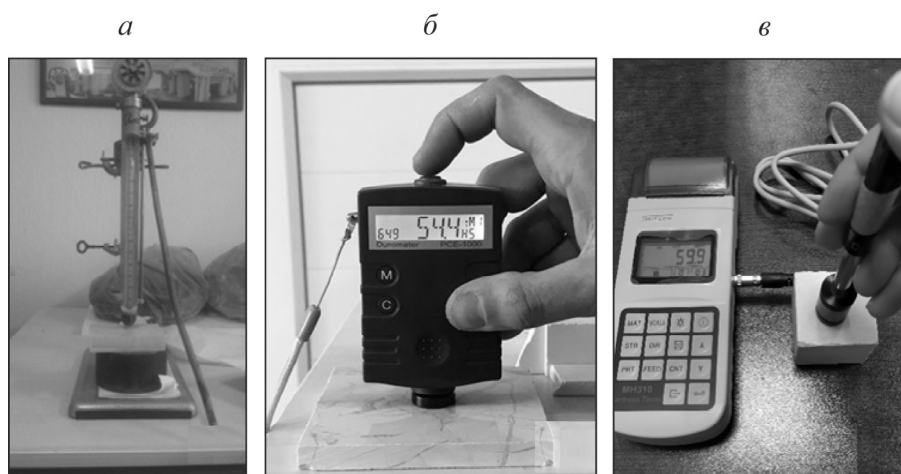


Рис. 1. Приборы измерения твердости по Шору: а — склероскоп Шора модели С-2; б — твердомер PSE-1000; в — твердомер Mitech MH310

ТАБЛИЦА 1. Образцы карбонатных пород

Образец	Тип породы	Регион
CR-1	Осадочная	Бурдур
CR-2		Бурса
CR-3		Ыспарта
CR-4		Ыспарта
CR-5		Ыспарта
CR-6		Ыспарта
CR-7		Бурса
CR-8		Кастамону
CR-9		Денизли
CR-10		Анталия
CR-11		Анталия
CR-12		Анталия
CR-13		Анталия

Испытания проводились на кафедре технологии добычи природного камня Университета им. Сулеймана Демиреля и в лаборатории анализа природных камней колледжа Каман Университета Ахи Эвран. Твердость измерялась в соответствии со стандартом ISRM при одинаковых внешних условиях [7, 8]. Значения твердости по Шору, полученные с помощью склерометра Шора модели С-2 и твердомеров РСЕ-1000 и Mitech МН310, обозначены как SH-1, SH-2 и SH-3 соответственно (табл. 2). С каждого образца снято 20 показаний твердости каждым прибором, за окончательное значение принималось их среднее арифметическое.

ТАБЛИЦА 2. Твердость по Шору

Образец	SH-1	SH-2	SH-3
CR-1	58.98	54.15	51.82
CR-2	60.45	59.43	58.80
CR-3	49.73	42.52	40.72
CR-4	41.10	43.23	44.96
CR-5	54.98	52.18	53.53
CR-6	55.15	57.44	55.34
CR-7	58.93	54.60	56.84
CR-8	60.10	57.54	57.81
CR-9	41.68	45.12	44.88
CR-10	30.18	39.76	41.00
CR-11	30.48	38.72	39.89
CR-12	40.13	31.80	35.37
CR-13	42.20	30.20	37.01

Физико-механические свойства определялись в соответствии со стандартами [7, 9–11]. Общая пористость находилась по стандарту TS EN 1936, скорость распространения звуковой волны — TS EN 14579, истирание широким кругом (абразивная прочность) — TS EN 14157, прочность на одноосное сжатие и прочность на растяжение — ISRM. Результаты испытаний приведены в табл. 3.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Выявлено, что твердость по Шору одинаковых образцов, полученная разными приборами, близка друг к другу и статистически значимо не различается (рис. 2).

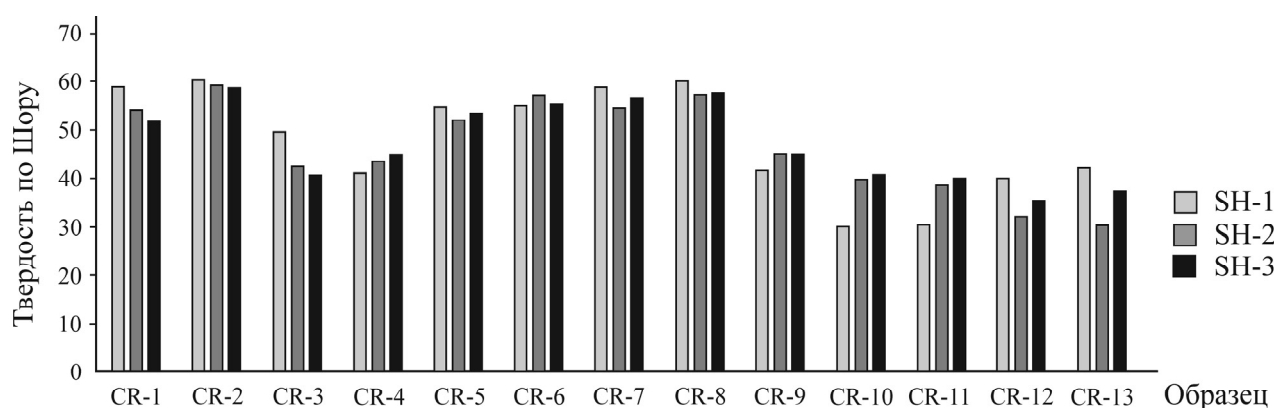


Рис. 2. Твердость по Шору природного камня, полученная разными приборами

Соотношения между значениями твердости по Шору, полученными склероскопом Шора модели С-2 и твердомерами РСЕ-1000 и Mitech МН310, проанализированы с помощью графических средств (рис. 3). Наиболее полезной для демонстрации соотношения между двумя количественными переменными является диаграмма рассеяния, показывающая плотность, направление и форму рассеяния значений переменных. Степень корреляции соотношения определяется коэффициентом корреляции r , лежащим в диапазоне $-1 \div 1$. Коэффициент $r = -1$ соответствует идеальной отрицательной корреляции, $r = 1$ — идеальной положительной, $r = 0$ — отсутствие линейной зависимости между двумя переменными [12]. Выделяются следующие категории корреляции: крайне слабая (0–0.25); слабая (0.26–0.49); средняя (0.50–0.69); высокая (0.70–0.89); крайне высокая (0.9–1.0). Между SH-1 и SH-2, SH-1 и SH-3 выявлена высокая корреляция с $r = 0.82$ и $r = 0.84$ соответственно, что показывает корректность измерения твердости по Шору цифровыми приборами нового поколения, точность которых превышает точность аналогового склероскопа Шора модели С-2.

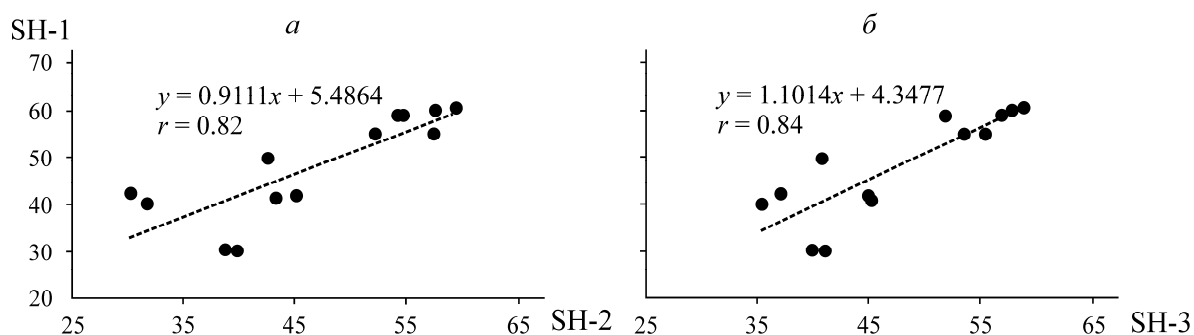


Рис. 3. Отношения SH-1 / SH-2 (а) и SH-1 / SH-3 (б)

Исследованы соотношения между определенными физико-механическими свойствами рассматриваемой породы (табл. 3) и твердостью по Шору, измеренной разными приборами (см. табл. 2). Они проанализированы методом статистической регрессии, а по результатам построены графики (рис. 4).

ТАБЛИЦА 3. Физические и механические свойства породы

Образец	Общая пористость T_p , %	Скорость распространения звуковой волны V_p , м/с	Абразивная прочность W_d , мм	Прочность на одноосное сжатие σ_c , МПа	Прочность на растяжение σ_r , МПа
CR-1	0.69	6237	18.05	113.12	7.98
CR-2	1.11	6103	17.84	113.57	7.40
CR-3	5.29	3954	21.96	118.74	5.73
CR-4	6.29	3217	22.38	108.66	5.60
CR-5	0.97	6376	18.58	160.47	6.00
CR-6	1.13	6281	16.76	138.43	6.70
CR-7	1.45	6306	15.67	146.87	5.67
CR-8	1.08	6422	17.00	116.18	7.00
CR-9	11.09	5197	16.46	47.99	4.32
CR-10	7.09	4202	25.94	75.40	2.95
CR-11	11.98	4270	21.72	73.09	2.95
CR-12	12.96	4305	25.80	43.40	3.57
CR-13	12.33	4295	23.81	47.67	3.75

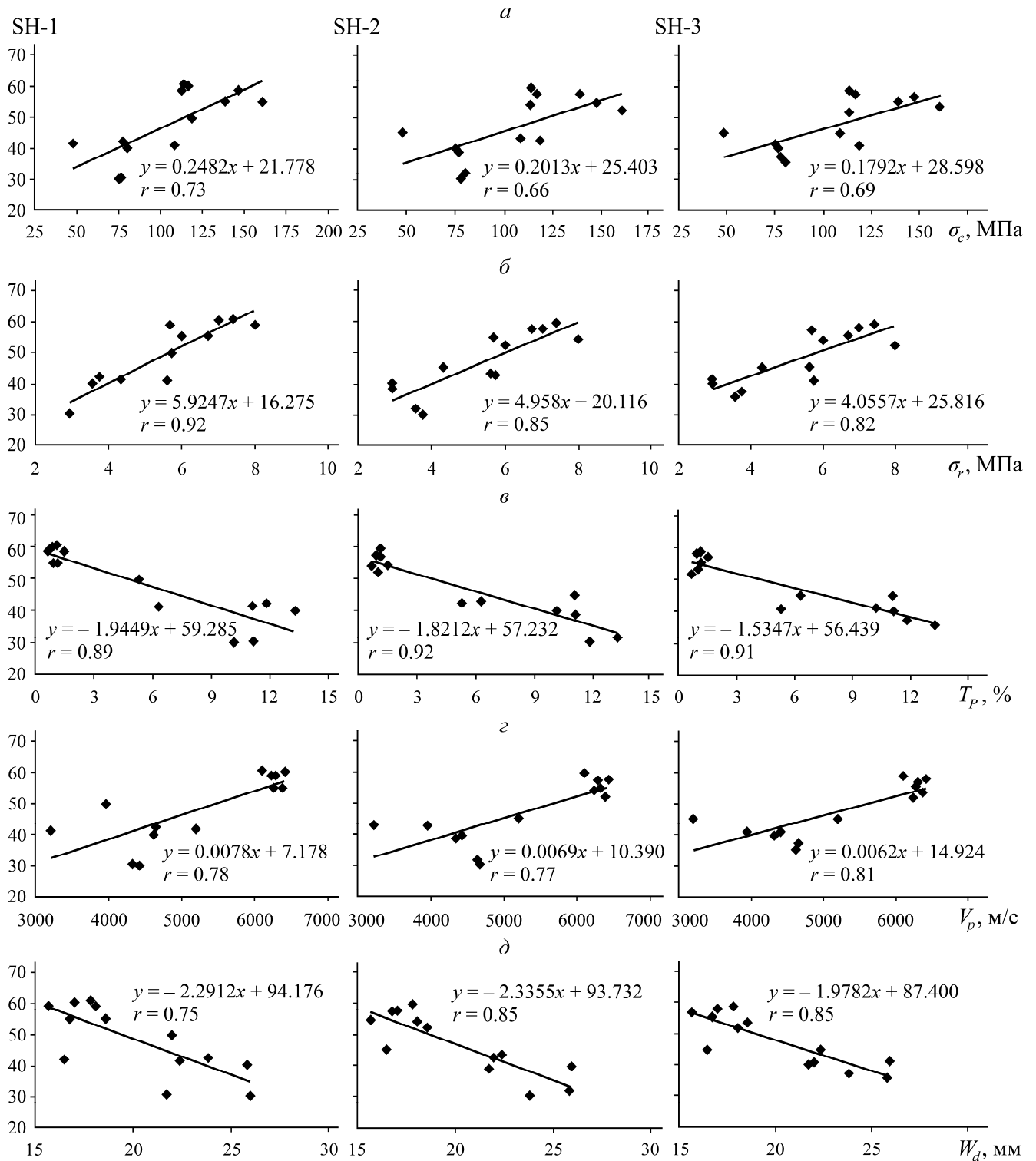


Рис. 4. Зависимость между твердостью по Шору и прочностью на одноосное сжатие (а), прочностью на растяжение (б), общей пористостью (в), скоростью распространения звуковой волны (г) и абразивной прочностью (д)

Получены значимые соотношения между физико-механическими свойствами карбонатной породы и твердостью по Шору, измеренной тремя приборами. Установлено, что свойства породы можно оценить по значениям твердости по Шору, полученным каждым прибором.

Обнаружена линейная зависимость со значимым коэффициентом корреляции между твердостью по Шору (SH-1, SH-2, SH-3) и прочностью на одноосное сжатие σ_c (рис. 4а). Между SH-1 и σ_c наблюдается высокая корреляция ($r=0.73$), между SH-2 и σ_c — средняя ($r=0.66$), между SH-3 и σ_c — средняя ($r=0.69$), т. е. корреляция между SH-1 и σ_c выше, чем между SH-2 и σ_c и SH-3 и σ_c .

Сильная линейная корреляция выявлена между твердостью по Шору и прочностью на растяжение σ_r (рис. 4б). Коэффициент корреляции между SH-1 и σ_r составил 0.92 (крайне высокая корреляция), между SH-2 и σ_r — 0.85 (высокая) и между SH-3 и σ_r — 0.82 (высокая).

На рис. 4в прослеживается сильная нелинейная корреляция между твердостью по Шору и общей пористостью T_p . Наиболее высокий коэффициент корреляции $r=0.92$ между SH-2 и T_p (крайне высокая корреляция), между SH-3 и T_p — $r=0.91$ (крайне высокая) и между SH-1 и T_p — $r=0.89$ (высокая).

Линейная зависимость наблюдается между твердостью по Шору и скоростью распространения звуковой волны V_p (рис. 4г). Коэффициенты корреляции между SH-1, SH-2, SH-3 и V_p составили 0.78, 0.77 и 0.81 соответственно.

Значимая корреляция отмечена между твердостью по Шору и абразивной прочностью W_d (рис. 4д). Между SH-2, SH-3 и W_d высокая корреляция ($r=0.85$), между SH-1 и W_d — средняя ($r=0.75$).

Полученные значения r , соответствующие корреляции между рассмотренными свойствами породы и твердостью по Шору, измеренной тремя разными приборами, близки друг к другу. Таким образом, твердость по Шору может использоваться для оценки физико-механических свойств горной породы. Применение твердомеров PCE-100 и Mitech МН310 для оценки свойств породы на основе твердости по Шору более предпочтительно ввиду бóльшей чувствительности и простоты в использовании.

ВЫВОДЫ

Обоснована применимость цифровых приборов нового поколения для измерения твердости горных пород вместо склероскопа Шора модели С-2. Для испытаний использовались твердомеры двух брендов, доступные на рынке с экономической точки зрения. Проанализирована статистическая регрессия между полученными значениями твердости и физико-механическими свойствами. Обнаружено, что значения твердости, полученные тремя приборами, близки друг к другу, т. е. приборы могут быть взаимозаменяемы.

Получены зависимости между значениями твердости и прочностями на одноосное сжатие и растяжение, а также зависимости между значениями твердости и общей пористостью, скоростью распространения волны, абразивной прочностью.

Для более точного определения твердости породы по Шору цифровые измерительные приборы должны производиться с разной энергией воздействия и разными диаметрами наконечника, после чего необходимо продолжить исследования для получения новых результатов и дальнейшего развития приборов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Shalabi F. I., Cording E. J., and Al-Hattamleh O. H.** Estimation of rock engineering properties using hardness tests, *Eng. Geol.*, 2007, Vol. 90. — P. 138–147.
2. **Boutrid A., Bensihamdi S., Chettibi M., and Talhi K.** Strength hardness rock testing, *J. Min. Sci.*, 2015, Vol. 51. — P. 95–110.
3. **American Society for Testing and Materials (ASTM)**, Standard hardness conversion tables for metals relationship among Brinell hardness, Vickers hardness, rockwell hardness, superficial hardness, Knoop hardness, Scleroscope hardness, and Leeb hardness, E140-12b, 2013.
4. **Çelik S. B. and Çobanoğlu İ.** Comparative investigation of Shore, Schmidt, and Leeb hardness tests in the characterization of rock materials, *Environ. Earth Sci.*, 2019, Vol. 78.
5. **Atkinson R. H.** Hardness test for rock characterization, *Comprehensive rock engineering: principles, practice and projects, Rock Testing and Site Characterization*, Oxford, Pergamon, 1993.
6. **Tabor D.** Mohr's Hardness Scale, A physical interpretation, *Proc. of Physical Society of London, Section B*, 1954.
7. **International Society for Rock Mechanics (ISRM)**, The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring, 1974–2006, R. Ulusay and J. A. Hudson (eds.), Ankara, Pergamon, Oxford, 2007.
8. **Altındağ R. and Güney A.** ISRM suggested method for determining the shore hardness value for rock, *Int. J. Rock Mech. Min.*, 2005, Vol. 43. — P. 19–22.
9. **Turkish Standard TS EN 1936.** Natural stone test methods — determination of real density and apparent density, and of total and open porosity, 2010.
10. **Turkish Standard TS EN 14579.** Natural stone test methods — determination of sound speed propagation, 2015.
11. **Turkish Standard TS EN 14157.** Natural stone — Determination of the abrasion resistance, 2017.
12. **Moore D. S., Notz W. I., and Flinger M. A.** The basic practice of statistics, New York, W. H. Freeman and Company, 2013.
13. **Doymuş K.** Korelasyon Analizi. <https://kemaldoymus.files.wordpress.com/2009/12/korelasyon.ppt>. Accessed January 5, 2016.

*Поступила в редакцию 03/VIII 2020
После доработки 31/V 2021
Принята к публикации 30/VI 2021*