

УДК 620.178.4

**СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ МЕХАНИЧЕСКИМИ И ФИЗИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ
ПЕСЧАНИКА ИЗ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ СОЛЯНОГО ХРЕБТА ПАКИСТАНА**

**М. З. Эмад¹, М. У. Хан¹, С. А. Саки¹,
М. А. Раза¹, М. У. Тахир²**

*¹Инженерно-технологический университет
E-mail: usman@uet.edu.pk, г. Лахор, Пакистан*

²NESPAK, Национальная инженерная служба, Пакистан

Рассмотрены возможные соотношения между механическими и физическими свойствами песчаника из формаций Соляного хребта. Определены следующие свойства: скорость распространения звуковой волны, плотность в сухом состоянии, пористость, прочность на одноосное сжатие, прочность на растяжение и постоянные упругости. Полученные результаты подверглись статистическому анализу, выявлены соотношения между двумя группами испытанных пород. Данные соотношения определены между пористостью и статическими механическими свойствами, а также между пористостью и динамическими механическими свойствами.

Соляной хребет, песчаник, пористость, прочность, скорость распространения звуковой волны, коэффициент Пуассона, модуль Юнга

DOI: 10.15372/FTPRPI20210603

Определение свойств пород — ключевая задача при инженерном проектировании шахт и подземных сооружений, а также при решении различных геотехнических проблем. Оно выполняется с помощью сложных, зачастую трудоемких, тщательно стандартизированных лабораторных испытаний. Из широкого диапазона свойств горных пород для проектных расчетов часто применяются следующие: прочность на одноосное сжатие (UCS), модуль Юнга, коэффициент Пуассона, прочность на растяжение и скорость распространения звуковой волны.

Динамическое исследование пород относится к неразрушающим методам контроля состояния материала и позволяет определить значения скорости распространения волны сжатия (P -волны) и волны сдвига (S -волна), которые применяются для расчета динамических констант упругости, таких как коэффициент Пуассона ν , модуль Юнга E , модуль объемного сжатия K и модуль сдвига G . Методики измерения скорости распространения P - и S -волн на протяжении многих лет применяются в горном деле и геотехнике: в полевых условиях для геофизического исследования объектов, в лабораторных — для определения динамических свойств пород. Существенные факторы, влияющие на скорость распространения волны, — тип породы, минералогический состав, плотность, пористость, анизотропия, наличие воды в порах породы, гидростатическое давление, температура, степень эрозии, текстура, структура, размер и форма частиц. В общем случае на свойства породы влияют как внутренние факторы (степень связности

частиц, их размер, текстура, состав, пористость, структура минеральных включений и пор), так и внешние факторы (эрозия). Многие исследователи пытались выявить соотношения между различными свойствами пород [1–5].

Снижение прочности и других свойств пород из-за воды — широко известный факт, однако качественная оценка степени прочности между высушенным и насыщенным водой образцом является сложной задачей. Повышение пористости обычно снижает плотность и модуль упругости породы, а также ослабляет связи между частицами. Пористость влияет на механические свойства горных пород [6–8]. Сама по себе пористость оказывает незначительное воздействие на механическое поведение породы, но различные размеры и распределение пустот обеспечивают заметное разнообразие механических свойств.

Цель настоящей работы — исследование наличия соотношений между механическими (прочность, модуль Юнга, коэффициент Пуассона) и физическими (плотность, пористость, скорость распространения P - и S -волн) свойствами песчаника из различных формаций Соляного хребта.

РАСПОЛОЖЕНИЕ ИЗУЧАЕМОЙ ОБЛАСТИ И ЕЕ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА

Соляной хребет представляет собой горную цепь, располагающуюся между реками Джелам и Инд в северной части провинции Пенджаб, Пакистан (рис 1). Хребет широко известен благодаря своей геологической структуре, залежам полезных ископаемых, истории их разработки и геологической истории. В данной области находится множество действующих шахт, в которых осуществляется добыча каменной соли, угля, известняка, гипса, различных глин и минерального сырья. Помимо шахт в районе Соляного хребта располагаются нефтяные и газовые скважины, а также присутствует множество геотехнических сооружений, соединяющих основные города и стратегические объекты [9]. Учитывая повышение потребности страны в полезных ископаемых, в частности в цементе, для их добычи и транспортировки, а также для сопутствующего гражданского строительства в исследуемой области планируется развитие подземных сооружений. Такие планы являются причиной для более эффективного определения свойств горных пород в районе Соляного хребта. Рассмотрим подробнее геологическую структуру формаций горных пород интересующей нас области.



Рис. 1. Геологическая карта Соляного хребта

Формация Чинджи (СН) — часть группы Сивалик (миоцен), состоит из перемежающихся слоев песчаника и глинистой породы. Формация обрадуется осадками молассового типа. Типичный литологический состав представлен красной глиной с включениями серого или коричневого цвета.

невого, мелко- и среднезернистого (иногда крупного), диагонально-слоистого и мягкого песчаника в основании и налегающим мощным слоем песчаника и побочной глиной. На различных горизонтах в пределах формации встречаются рассеянные валуны кварцита и тонкие линзы внутриформационного конгломерата.

Формация Дхок Патхан (DP) также относится к группе Сивалик (поздний миоцен – ранний плиоцен). Эта формация представлена равномерным циклическим чередованием слоев песчаника и глины. Песчаник в основном серый, светло-серый, блестяще-белый или красновато-коричневый (иногда коричневатый-серый, зеленовато-серо-коричневый или темно-желтый). Песчаник характеризуется большой мощностью слоев, содержанием извести, умеренной цементацией, мягкостью и диагонально-слоистым залеганием.

Формация Куссак (KU) и формация глауконитового песчаника Куссак (KU-GL) (кембрий) состоит из зеленовато-серого глауконитового слюдистого песчаника и зеленовато-серого алеврита с включением слоев светло-серого доломита и оолитового песчаного доломита. Присутствует большое количество слоев внутриформационного конгломерата.

Формация Багханвала (BA) (кембрий) состоит из красного сланца и глины с чередованием плитообразного песчаника, представленного разными цветами, включая розово-серый и синезеленый, особенно в нижней половине формации. Также распространены осадочные структуры и глинистые трещины.

В основе формации Чхидру (CU) (верхний пермский период) лежит сланец от бледно-желто-серого до темно-серого цвета. Налгающей породой являются слои известнякового песчаника. В верхней части формации залегает белый песчаник с волнистыми следами ряби, мелко- и среднезернистый с включениями темного сланца.

Формация Варча (WA) (ранний пермский период) состоит из средне- и крупнозернистого песчаника, местами конгломератного с включениями слоев сланца. Песчаник диагонально-слоистый, имеет красный, пурпурный и светло-розовый цвета.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Образцы отобраны из шести формаций песчаника Соляного хребта. Лабораторный анализ включал в себя подготовку образцов в соответствии со стандартами Американского общества по испытанию материалов (ASTM) и последующие испытания согласно стандартам Международного общества по механике горных пород (ISRM). Подготовка образцов состояла из kernового бурения алмазным буром, разрезания керна и его шлифования. Из образцов кубической формы получены керны с размерами AX и NX [10]. Разломанные образцы и образцы, подвергнутые эрозии, исключены из испытаний после визуального осмотра.

Для исследования различных свойств песчаника использовано 39 образцов. Физические и механические свойства образцов находились согласно методам, предложенным ISRM [11 – 14]. Образцы нагружались с применением установки UTM (возможность нагружения до 200 т). Для нахождения скоростей распространения P - и S -волн использован портативный ультразвуковой неразрушающий измерительный тестер ELE, эффективная пористость пород измерялась порозиметром Helium.

В ходе испытаний определены следующие свойства образцов песчаника: плотность в сухом состоянии ρ , пористость η , прочность на одноосное сжатие (UCS), прочность на растяжение T , статический модуль Юнга E_s , статический коэффициент Пуассона ν_s , скорость распространения продольной волны V_p , скорость распространения поперечной волны V_s , динамический модуль Юнга E_d и динамический коэффициент Пуассона ν_d . Результаты испытаний представлены в таблице.

Значения механических и физических свойств песчаника

Код образца	η , %	ρ , г/см ³	V_p , км/с	V_s , км/с	E_d , ГПа	ν_d	T , МПа	UCS, МПа	E_s , ГПа	ν_s
BA-1	15.50	2.45	1.21	1.14	1.43	0.32	1.06	74.84	—	—
BA-2	15.43	2.52	1.31	1.23	1.76	0.33	2.84	26.32	2.50	0.47
BA-3	15.35	2.47	1.17	1.08	0.80	0.24	3.29	59.93	4.62	0.47
BA-4	15.30	2.46	1.34	1.26	1.65	0.31	2.45	21.71	—	—
BA-5	15.38	2.48	1.27	1.15	0.55	0.18	2.87	54.34	—	—
WA-1	18.80	2.64	2.82	2.29	1.49	0.05	3.68	92.29	33.90	0.42
WA-2	15.10	2.65	3.04	2.40	2.09	0.03	2.84	17.11	10.16	0.37
WA-3	15.50	2.63	2.79	2.38	0.47	0.08	2.56	78.42	—	—
WA-4	15.09	2.68	3.00	2.42	1.80	0.04	1.95	70.19	—	—
WA-5	15.20	2.36	3.37	2.52	2.97	0.01	2.77	76.09	7.74	0.35
KU-GL-1	15.98	2.39	1.77	2.52	7.61	0.15	0.05	45.52	3.70	0.19
KU-GL-2	18.36	2.36	1.71	2.39	7.01	0.15	0	47.27	—	—
KU-GL-3	16.04	2.17	1.76	2.34	6.98	0.17	0.10	52.32	—	—
KU-GL-4	16.09	2.20	1.57	1.46	1.41	0.25	0.15	40.91	7.16	0.42
KU-GL-5	15.99	2.17	1.49	1.36	0.88	0.21	2.04	43.09	—	—
KU-1	17.45	2.48	1.60	1.51	2.64	0.36	1.51	42.53	21.60	0.13
KU-2	14.67	2.55	0.68	0.59	0.20	0.11	0.91	43.02	26.75	0.17
KU-3	14.55	2.42	3.06	2.07	2.24	0.01	1.11	40.59	—	—
KU-4	14.59	2.43	2.86	2.00	2.02	0.01	0.96	38.07	—	—
CH-1	17.80	2.44	2.85	1.94	1.99	0.01	0.58	8.58	7.60	0.12
CH-2	15.70	2.64	2.12	1.52	1.22	0.01	0.12	9.71	7.70	0.22
CH-3	17.65	2.64	2.14	1.55	1.24	0.01	0.18	8.23	—	—
CH-4	17.62	2.65	2.05	1.48	1.13	0.01	0.14	9.11	—	—
DP-1	17.71	2.65	2.10	1.53	1.18	2.22	0.18	9.25	7.90	0.33
DP-2	17.83	1.46	3.28	3.93	14.49	2.15	0.05	6.67	—	—
DP-3	17.81	1.29	3.76	4.41	16.97	2.32	10.84	38.62	—	—
DP-4	17.69	1.46	3.13	3.75	13.11	2.14	8.81	36.40	—	—
CU-1	15.71	2.64	2.12	1.52	1.22	0.01	2.04	43.09	—	—
CU-2	18.57	2.64	2.14	1.55	1.24	0.01	1.48	42.19	7.74	0.35
CU-3	18.45	2.67	2.22	1.44	1.19	0.01	1.51	42.53	—	—
CU-4	18.48	2.65	2.05	1.48	1.13	0.01	0.91	43.02	—	—
CU-5	18.54	2.65	2.31	1.52	1.21	0.01	1.11	40.59	7.16	0.42

ВЛИЯНИЕ ПОРИСТОСТИ НА СВОЙСТВА ПЕСЧАНИКА

Результаты, полученные в ходе соответствующих испытаний, статистически проанализированы. Для графической интерпретации выбраны соотношения между пористостью, физическими и механическими свойствами. Коэффициенты корреляции и регрессионные соотношения рассчитаны методом наименьших квадратов. На графиках представлены линии доверительного и вероятностного интервала 95 %.

В ходе анализа образцы из соответствующих формаций разделились на две группы:

- Группа А — Багханвала (BA), Варча (WA), Чхидру (CU) и формация глауконитового песчаника Куссак (KU-GL);
- Группа В — Дхок Патхан (DP), Чинджи (CH) и Куссак (KU).

С помощью анализа статистической регрессии выявлено, что пористость песчаников из групп А и В соотносится с их механическими и физическими свойствами. Наличие корреляции между двумя переменными определено коэффициентом r , значение которого лежит в диапазоне от -1 до $+1$ для абсолютно отрицательной и положительной корреляции соответственно. Нулевое значение r показывает отсутствие корреляции между рассматриваемыми переменными. Зависимость между пористостью η и коэффициентом Пуассона ν_s для песчаников из группы А имеет обратно пропорциональный характер (рис. 2а), что подтверждается работами [15, 16]. На рис. 2б представлена прямо пропорциональная зависимость коэффициента Пуассона от пористости для песчаников из группы В [17]. Корреляций между пористостью и другими свойствами для песчаников из группы А не обнаружено. Песчаники группы В имеют обратно пропорциональную зависимость между пористостью и статическим модулем Юнга E_s (рис. 2в). Похожее соотношение обнаружено исследователями в [15].

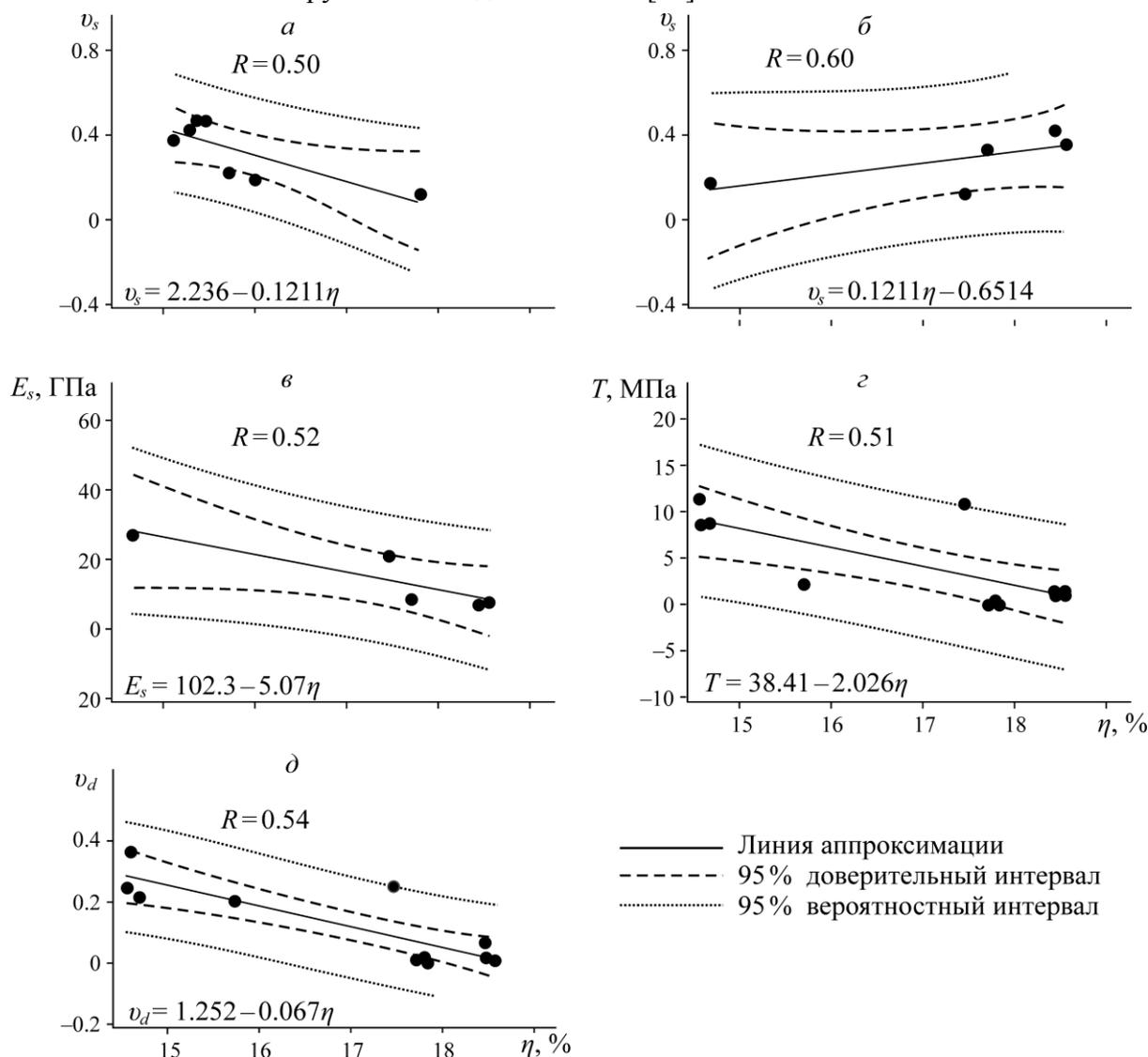


Рис. 2. Соотношения между различными свойствами песчаника и пористостью: статические коэффициенты Пуассона/пористость — группа А (а); группа В (б); статический модуль Юнга/пористость — группа В (в); прочность на растяжение/пористость — группа В (г); динамический коэффициент Пуассона/пористость — группа В (д)

На рис. 2з, д показаны графики, характеризующие обратно пропорциональную зависимость между пористостью и прочностью на растяжение, а также динамическим коэффициентом Пуассона и пористостью для песчаников из группы В, что подтверждают данные, полученные в [15]. Между пористостью и динамическими свойствами для песчаников из группы А соотношения не обнаружены.

СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ СТАТИЧЕСКИМИ И ДИНАМИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ ПЕСЧАНИКА

Установлены линейные соотношения с различными трендами между статическими и динамическими свойствами. При увеличении прочности на растяжение песчаника из группы А статический коэффициент Пуассона повышается, но для песчаника из группы В данная корреляция противоположна (рис. 3а и б). Соотношение между статическим модулем Юнга и UCS песчаника из группы А является линейным и прямо пропорциональным, а для песчаника из группы В данное соотношение обратно пропорционально (рис. 3в и г). Это согласуется с исследованиями, проведенными в [18].

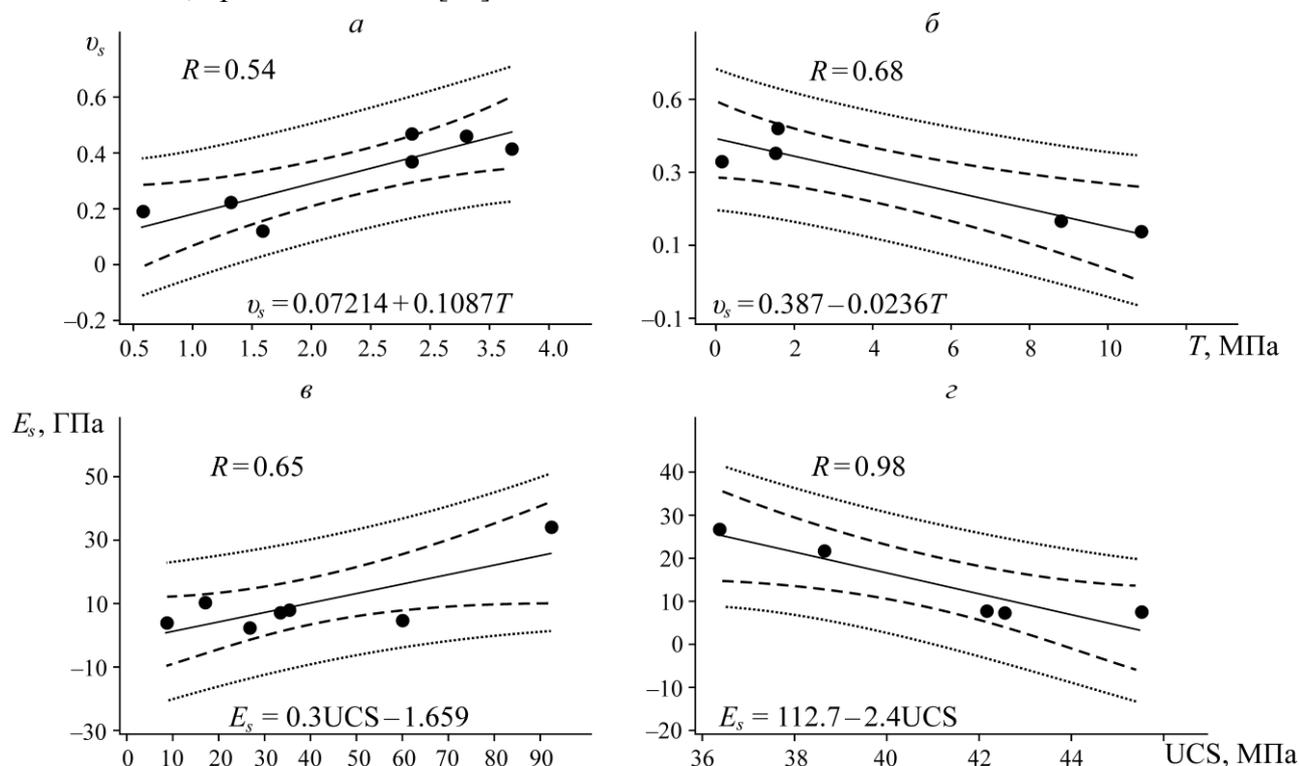


Рис. 3. Соотношения между статическими и динамическими свойствами песчаника: а — статический коэффициент Пуассона / прочность на растяжение (группа А); б — статический коэффициент Пуассона / прочность на растяжение (группа В); в — статический модуль Юнга / прочность на сжатие (группа А); г — статический модуль Юнга / прочность на сжатие (группа В)

На рис. 4а и б представлена линейная и прямо пропорциональная зависимость между скоростями распространения поперечной и продольной волн для двух исследуемых групп. Аналогичная зависимость получена в [18] и [2].

Прочность на растяжение и динамический коэффициент Пуассона для песчаника из группы В имеют обратно пропорциональную зависимость от скорости распространения продольной волны (рис. 4в и г).

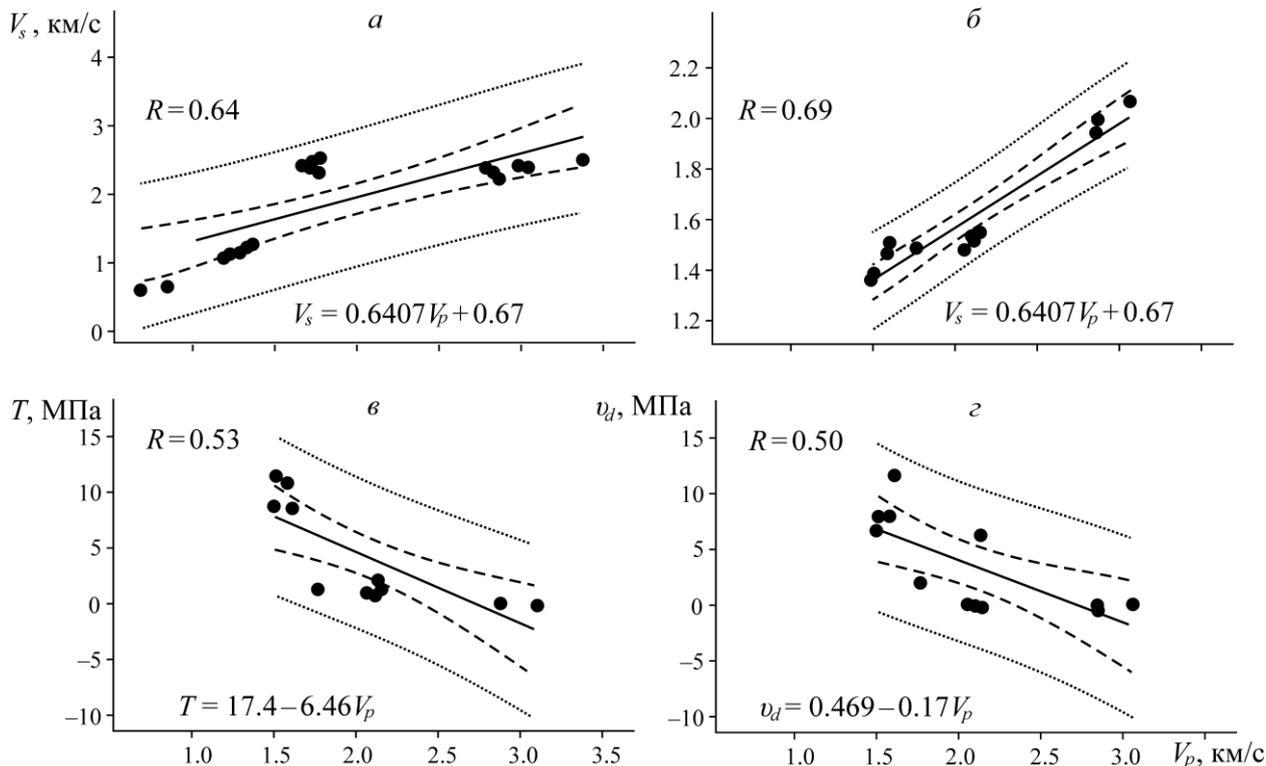


Рис. 4. Соотношения между статическими и динамическими свойствами песчаника: *а* — скорость *S*-волны/скорость *P*-волны (группа А); *б* — скорость *S*-волны/скорость *P*-волны (группа В); *в* — прочность на растяжение/скорость *P*-волны (группа В); *г* — динамический коэффициент Пуассона / скорость *P*-волны (группа В)

Динамический модуль Юнга песчаника из группы А обратно пропорционален плотности песчаника, но статический модуль Юнга прямо пропорционален плотности (рис. 5). Соотношения для статического модуля Юнга, выявленные в [18] и [3], также имели прямо пропорциональный характер.

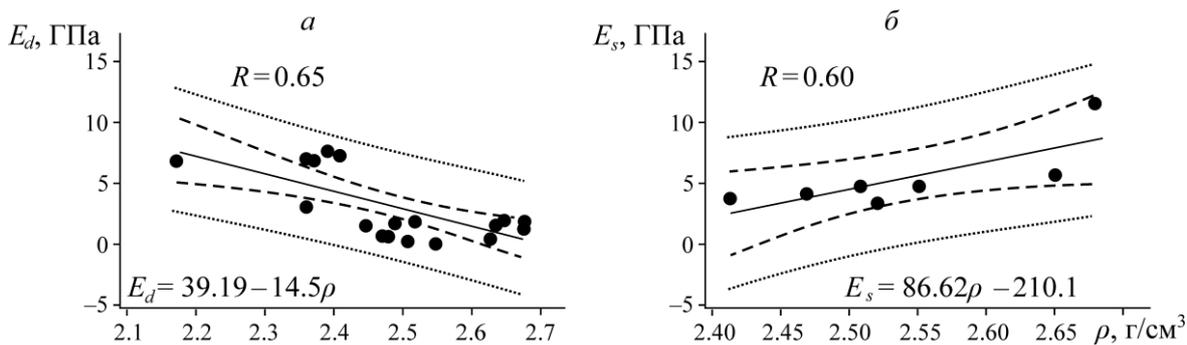


Рис. 5. Соотношения между статическими и динамическими свойствами песчаника (группа А): *а* — динамический модуль Юнга / плотность; *б* — статический модуль Юнга / плотность

В группе А зависимости между прочностью на растяжение и динамическим модулем Юнга, между прочностью на сжатие и динамическим модулем Юнга песчаника являются обратно пропорциональными; соотношения между прочностью на сжатие и прочностью на растяжение песчаника — прямо пропорциональными (рис. 6).

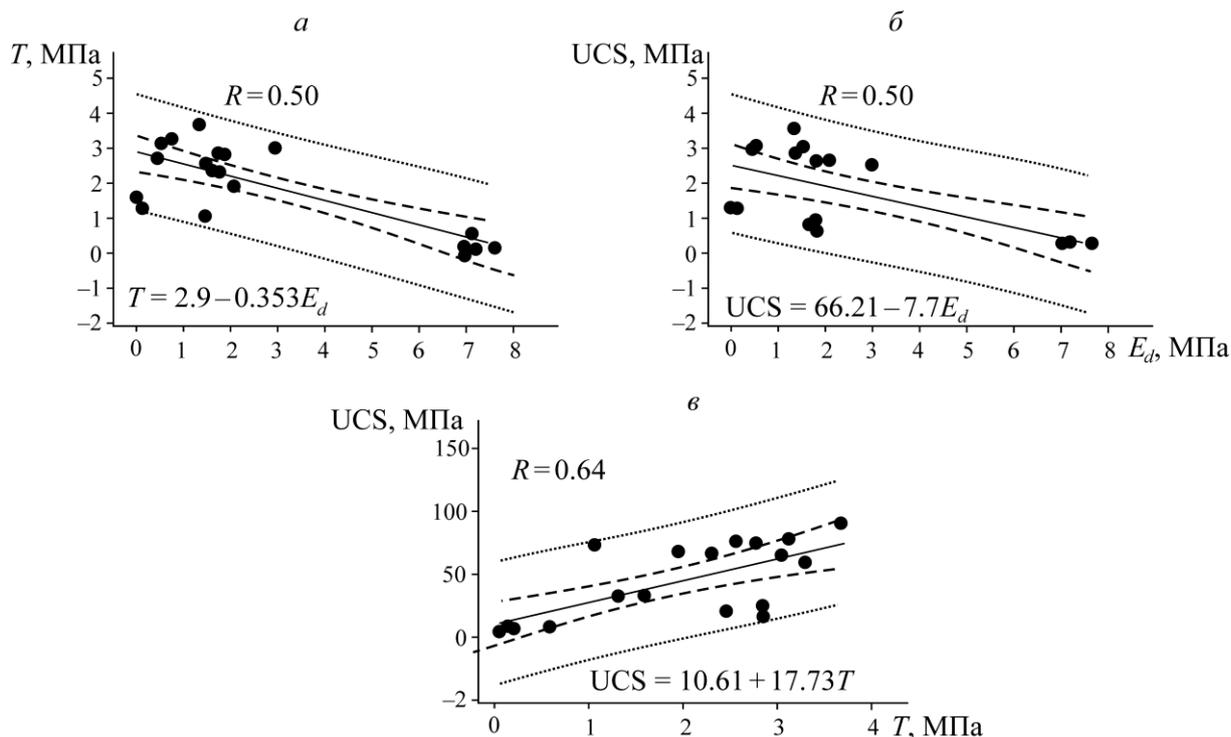


Рис. 6. Соотношения между статическими и динамическими свойствами песчаника (группа А): а — прочность на растяжение / динамический модуль Юнга; б — прочность на сжатие / динамический модуль Юнга; в — прочность на сжатие / прочность на растяжение

В группе В соотношение между статическим модулем Юнга и динамическим коэффициентом Пуассона песчаника является прямо пропорциональным; между статическим и динамическим коэффициентом Пуассона — обратно пропорциональным (рис. 7). Прямо пропорциональная корреляция между статическим и динамическим коэффициентом Пуассона приведена в [2].

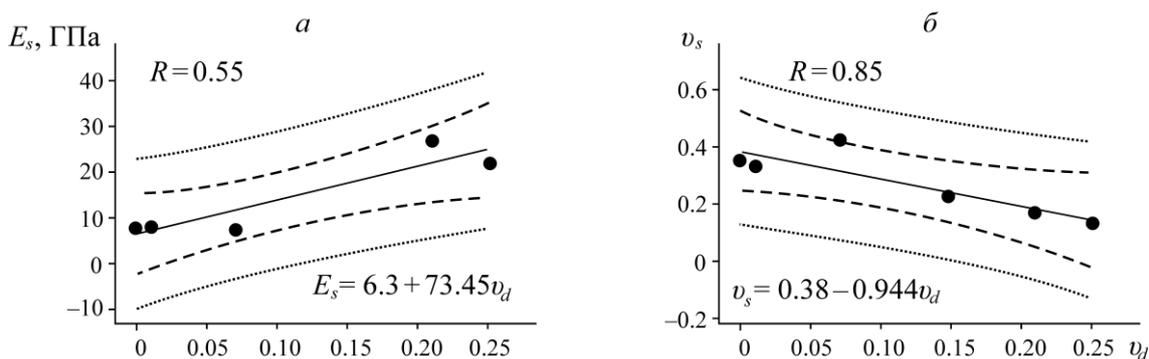


Рис. 7. Соотношения между статическими и динамическими свойствами песчаника (группа В): а — статический модуль Юнга / динамический коэффициент Пуассона; б — статический коэффициент Пуассона / динамический коэффициент Пуассона

Для группы В песчаника соотношение между статическим коэффициентом Пуассона и статическим модулем Юнга является обратно пропорциональным (рис. 8а), соотношение между статическим коэффициентом Пуассона и прочностью на одноосное сжатие — прямо пропор-

циональным (рис. 8б). На рис. 8в представлена прямо пропорциональная зависимость между статическим коэффициентом Пуассона и плотностью песчаника. Отметим, что в [5] обнаружена обратно пропорциональная корреляция между прочностью на сжатие и коэффициентом Пуассона, не выявлена корреляция между коэффициентом Пуассона и плотностью горных пород, а также между коэффициентом Пуассона и UCS.

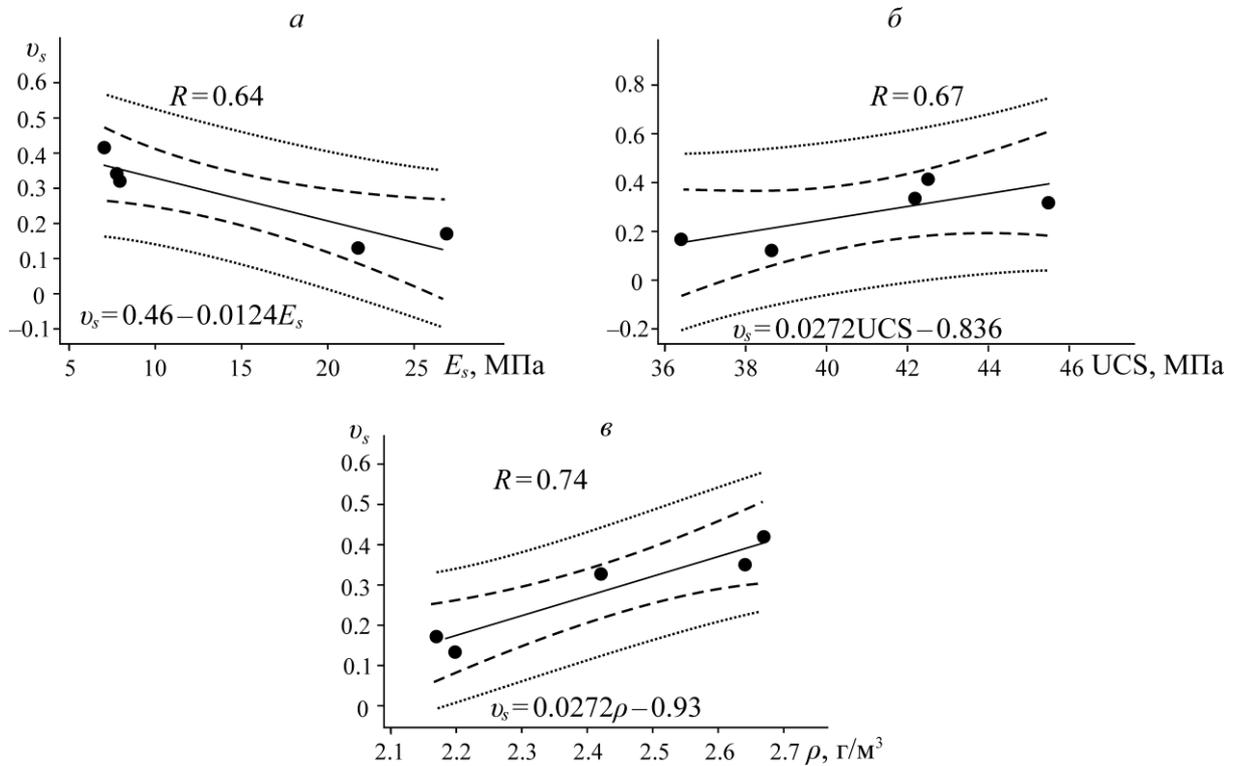


Рис. 8. Соотношения между статическими и динамическими свойствами песчаника (группа В): а — статический коэффициент Пуассона/статический модуль Юнга; б — статический коэффициент Пуассона/прочность на сжатие; в — статический коэффициент Пуассона/плотность

На рис. 9 показана обратно пропорциональная зависимость между прочностью на растяжение и плотностью, линейная и прямо пропорциональная зависимость между модулем Юнга и прочностью на растяжение песчаника из группы В.

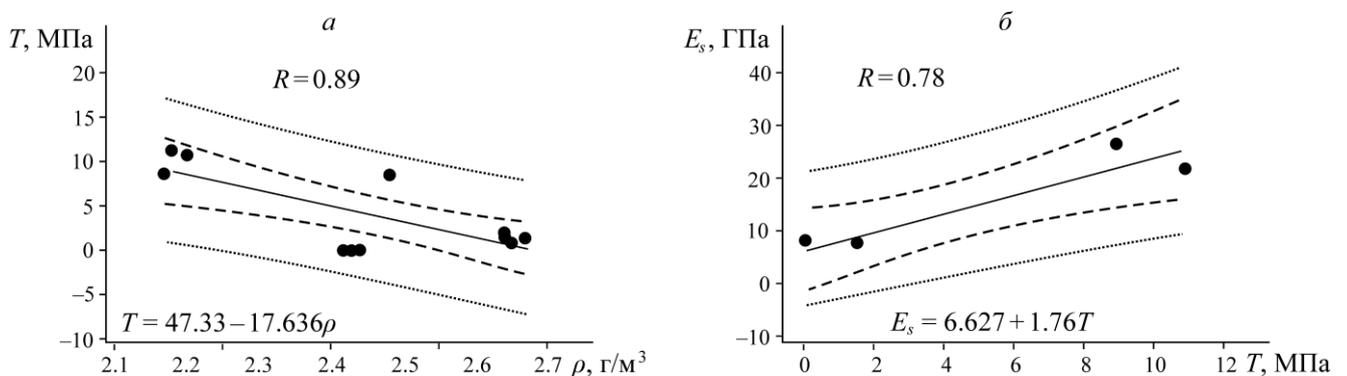


Рис. 9. Соотношения между статическими и динамическими свойствами песчаника (группа В): а — прочность на растяжение/плотность; б — статический модуль Юнга/прочность на растяжение

ВЫВОДЫ

Полученные в ходе испытаний результаты статистически проанализированы методом регрессии с целью выявления зависимостей между определяемыми свойствами. Песчаники из группы А имеют хорошую корреляцию: между статическим модулем упругости и прочностью на сжатие (0.65); между динамическим модулем упругости и плотностью (0.65); между скоростями поперечной и продольной волны (0.64) и между значениями прочности на сжатие и растяжение (0.64). У песчаников из группы В хорошая корреляция по следующим величинам: между статическим модулем упругости и прочностью на сжатие (0.98); между статическим и динамическим коэффициентом Пуассона (0.85); между статическим модулем Юнга и прочностью на сжатие (0.78); между скоростями поперечной и продольной волны (0.69); между статическим коэффициентом Пуассона и прочностями на растяжение (0.68) и сжатие (0.67).

Результаты данного исследования показали, что механические и физические свойства, определение которых является долгим и финансово затратным процессом, могут быть косвенно спрогнозированы через пористость, скорость распространения *P*- и *S*-волн и плотность при помощи соотношений, установленных для конкретного типа горной породы. Подтверждение надежности метода может быть осуществлено путем расширения данной работы на большее количество образцов пород из различных областей залегания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kahraman S.** Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2001, Vol. 38. — P. 981–994.
2. **Soroush H. and Fahimifar A.** Evaluation of some physical and mechanical properties of rocks using ultrasonic pulse technique and presenting equations between dynamic and static elastic constants, 10th ISRM Congress, Sandton, South Africa, 2003. — P. 6.
3. **Yasar E. and Erdogan Y.** Correlating sound velocity with the density, compressive strength and Young's modulus of carbonate rocks. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2004, Vol. 41. — P. 871–875.
4. **Chary K. B., Sarma L. P., Prasanna Lakshmi K. J., Vijayakumar N. A., Naga Lakshmi V., and Rao M. V. M. S.** Evaluation of engineering properties of rock using ultrasonic pulse velocity and uniaxial compressive strength, *Proc. National Seminar on Non-Destructive Evaluation*, Hyderabad, India, 2006. — P. 379–385.
5. **Shalabi F. I., Cording E. J., and Hattamleh O.** Estimation of rock engineering properties using hardness tests, *Eng. Geol.*, 2007, Vol. 90. — P. 138–147.
6. **Palchik V. and Hatzor Y. H.** The influence of porosity on tensile and compressive strength of porous chalks. *Rock Mech. Rock Eng.*, 2004, Vol. 37. — P. 331–341.
7. **Tamrakar N. K., Yokota S., and Shrestha S. D.** Relationships among mechanical, physical and petrographic properties of Siwalik sandstones, Central Nepal Sub-Himalayas. *Eng. Geol.*, 2007, Vol. 90. — P. 105–123.
8. **Regnet J. B., Davidet C., Fortin J., Robion P., Makhloufi Y., and Collin P.-Y.** Influence of microporosity distribution on the mechanical behavior of oolitic carbonate rocks, *Geomechanics for Energy and the Environment*, 2015, Vol. 3. — P. 11–23.
9. **Sameeni S. J.** The Salt Range: Pakistan's unique field museum of geology and paleontology, in *PaleoParks, The protection and conservation of fossil sites worldwide*, Notebooks on Geology, Chapter 6. France, 2009.

- 10. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974–2006**, in Suggested methods prepared by the Commission on Testing Methods, Compilation arranged by the ISRM Turkish National Group, eds. Ulusay R., Hudson J. A., Ankara, 2007.
- 11. Tests**, Suggested methods for determining tensile strength of rock materials., Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomechanics Abstracts, 1978. Vol. 15. — P. 99–103.
- 12. Bieniawski Z. T. and M. J. Bernede**, Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials: Part 1. Suggested method for determining deformability of rock materials in uniaxial compression, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomechanics Abstracts, 1979. Vol. 16. — P. 138–140.
- 13. Aydin A.** Upgraded ISRM suggested method for determining sound velocity by ultrasonic pulse transmission technique, Rock Mech. Rock Eng., 2014, Vol. 47. — P. 255–259.
- 14. Suggested methods for determining sound velocity**, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomechanics Abstracts, 1978, Vol. 15. — P. 53–58.
- 15. Yu C., Ji S., and Li Q.** Effects of porosity on seismic velocities, elastic moduli and Poisson's ratios of solid materials and rocks, J. Rock Mech. Geotech. Eng., 2016, Vol. 8. — P. 35–49.
- 16. Domenico S. N.** Rock lithology and porosity determination from shear and compressional wave velocity, Geophysics, 1984, Vol. 49. — P. 1188–1195.
- 17. Zhang J. J. and Bentley L. R.** Factors determining Poisson's ratio, CREWES Research Report, 2005, Vol. 17. — P. 1–15.
- 18. D'Andrea, D.V., Fogelson D. E., Fischer R. L.** Prediction of compressive strength from other rock properties, Washington, 1965. — 23 p.

Поступила в редакцию 15/X 2020

После доработки 13/III 2021

Принята к публикации 11/XI 2021