

пространение, так как степень её прерывистости ничтожная.

Пай-Хой (от 68°23' до 69°35' с. ш.). Современные достаточно суровые и однородные по площади геокриологические условия горного кряжа, средняя высота которого порядка 200 м, формировались в основном под влиянием широтно-зональных усло-

вий теплообмена. Температура пород изменяется от - 3 до - 5°С, а мощность КТ-1 — от 300 до 500 м. Мёрзлая толща имеет сплошное распространение, так как сквозные талики редкость. Их площадь менее 5 % [4, 8, 9]. Только в отдельных горах, поднимающихся до 450 м, температура пород понижается до - 7°С, а мощность КТ-1 увеличивается до 700 м.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балобаев В.Т. Геотермия мерзлой зоны литосферы. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1991. 193 с.
2. Баулин В.В., Чеховский А.Л., Суходольский С.Е. Основные этапы развития многолетнемерзлых пород Европейского Северо-Востока и Западной Сибири // История развития многолетнемерзлых пород Евразии. М.: Наука, 1981. С. 41–60.
3. Величко А.В. Природный процесс в плейстоцене. М.: Наука, 1973. 256 с.
4. Геокриологическая карта СССР. М-б 1:2 500 000. Винница: Картпредприятие, 1991.
5. Кинд Н.В. Геохронология позднего антропогена по изотопным данным: М.: Наука, 1974. 216 с.
6. Краткая географическая энциклопедия. М.: Изд-во Советская энциклопедия, 1964. Т. 4. 448 с.
7. Оберман Н.Г. История формирования многолетнемерзлых пород Полярного, Приполярного и Северного Урала // История развития многолетнемерзлых пород Евразии. М.: Наука, 1981. С. 73–78.
8. Оберман Н.Г., Борозинцев В.Е. Урал. Геокриология СССР. Европейская территория СССР. М.: Недра, 1988. С. 301–324.
9. Суходольский С.Е. Парагенезис подземных вод и многолетнемерзлых пород. М.: Наука, 1982. 152 с.
10. Фотиев С.М. Гидрогеотермические особенности криогенной области СССР. М.: Наука, 1978. 236 с.
11. Фотиев С.М. Криогенный метаморфизм пород и подземных вод (условия и результаты). Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2009. 280 с.
12. Хотинский Н.А. Голоцен Северной Евразии М.: Наука, 1977. 200 с.
13. Шер А.В. Природная перестройка в Восточно-Сибирской Арктике на рубеже плейстоцена и голоцена и ее роль в вымирании млекопитающих и становлении современных экосистем // Криосфера Земли. 1997. Т. 1. № 1. С. 21–29.

УДК 624.131.1 (571.5)

КОМПЛЕКСНАЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРОТЕРОЗОЙСКИХ ПЕСЧАНИКОВ (СТРОИТЕЛЬНАЯ ПЛОЩАДКА В РАЙОНЕ УДОКАНА)

Т.Г. РЯЩЕНКО, С.А. ТИРСКИХ, Т.А. КОРНИЛОВА, Е.В. БРЫЖАК

*Институт земной коры СО РАН
664033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, e-mail: ryashenk@crust.irk.ru*

Рассмотрены результаты комплексных инженерно-геологических исследований протерозойских песчанников строительной площадки в районе Удокана. При обработке данных о плотности, прочности и водостойкости грунтов, полученных в процессе изысканий, применены программы «Стандартная статистика» и «Кластер-анализ». В образцах определено водопоглощение, измерены скорости распространения продольных сейсмических волн; впервые изучены структурно-текстурные особенности пород в петрографических шлифах. На основе комплексных данных сделаны выводы о факторах прочности исследованных объектов.

Ключевые слова: песчаник; плотность; прочность; водопоглощение; скорость сейсмических волн; структура; текстура.

INTEGRATED ENGINEERING GEOLOGICAL EVALUATION OF PROTEROZOIC SANDSTONES: A CASE STUDY OF THE CONSTRUCTION SITE NEAR THE TOWN OF UDOKAN

T.G. RYASHCHENKO, S.A. TYRSHIH, T.A. KORNILOVA, E.V. BRYZHAK

*Institute of the Earth's Crust, SB RAS
664033, Russia, Irkutsk, Lermontov ul., 128, e-mail: ryashenk@crust.irk.ru*

The article considers the results of integrated engineering geological studies of Proterozoic sandstones at the construction site near the town of Udokan. The «Standard Statistics» and «Cluster Analysis» programs have been applied by processing the data on density, strength and water resistance of the soils obtained during the research. The samples have been examined for water absorption and longitudinal seismic wave velocity, the structural and textural characteristics of rocks in petrographic thin sections have been studied for the first time. On the basis of complex data, conclusions about the strength factors of the studied objects have been drawn out.

Key words: sandstone, density, strength, water absorption, seismic wave velocity, structure texture.

Инженерно-геологические изыскания выполнялись на строительной площадке (дамба хвостохранилища на руч. Неизвестный и территория ГОК) в районе Удокана (Россия, Забайкальский край, Каларский район, лист О-50-XXXV). Здесь в апреле 2014 г. геолого-разведочными скважинами (1А-5; 1А-6; 1В-1; 1В-2; 1В-4; 1С-2) глубиной 25–52 м были вскрыты скальные грунты, представленные метаморфизованными песчаниками протерозоя. Технический отчёт по результатам первого этапа изысканий составлялся Центром геоэкологических исследований Национального исследовательского Иркутского государственного технического университета (ЦГЭИ НИ ИрГТУ). Использована документация разрезов некоторых скважин, а также показатели физико-механических свойств песчаников, представленные в техническом отчёте ЦГЭИ НИ ИрГТУ. Дополнительные исследования образцов песчаников протерозоя проводились в Институте земной коры СО РАН (ИЗК СО РАН). На основе комплексных данных сделаны выводы о факторах прочности исследованных объектов.

Проблемы изучения скальных грунтов в инженерной геологии [1–3, 5] рассматриваются значительно реже по сравнению с природными дисперсными разновидностями, поэтому предлагаемые материалы, по нашему мнению, дополняют «информационную корзину» практических и научно-методических разработок в этом направлении.

Объекты исследований и методика

Характеристика разрезов (по данным документации). Объектами выбраны три скважины глубиной 26,5–52,0 м (1А-5, 1В-4, 1С-2) — описание выполнено геологами Е. Марчук и А. Лысенко. При документации разрезов этих скважин выделены зоны дробления, по керну — участки различной степени макротрещиноватости песчаников — от единичных трещин до 85 и более. Песчаники серого цвета, мелкозернистые, полосчатые, со следами метаморфизма (отмечено окварцевание, эпидотизация, хлоритизация); супесчано-глыбовая зона (делювиальный современный комплекс, представленный глыбами песчаников с супесчаным заполнителем) с включениями льда достигает 2,5–5,0 м.

Наибольшую опасность для устойчивости грунтовой толщи создают зоны дробления, которые зафиксированы в указанных скважинах. Например, в скв. 1А-5 (глубина 28,0 м) такие зоны отмечены в

интервалах 6,1–9,7 м (дресва, супесь с единичными глыбами песчаников, сцементирована льдом) и 18,2–20,9 м (крупный щебень и глыбы песчаников, заполнитель — супесь и дресва (сцементированные льдом). В скв. 1В-4 (26,5 м) в скальных грунтах обнаружено присутствие маломощных (10–20 см) прослоев сильно выветрелых разновидностей с «гнездами» вторичного эпидота; на глубине 22,4 м зафиксирован «тектонический шов» (зона разлома), выполненный глиной трения; лёд обнаружен только в трещинах глыб песчаников делювиальной зоны мощностью 3,8 м. Разрез скв. 1С-2 (52,0 м) характеризуется чередованием песчаников разной степени трещиноватости; в интервале 27,3–29,3 м среди окварцованных песчаников обнаружена зона дробления.

Физико-механические свойства песчаников. Данные о природной — влажности, плотности и прочности скальных грунтов получены в ЦГЭИ НИ ИрГТУ, они включены в отчёт первого этапа исследований. Определения показателей выполнены по стандартным методикам [4, 8]. Нами отобраны 17 образцов ненарушенной структуры (керна), для которых в грунтовой лаборатории ЦГЭИ ИрГТУ определено водопоглощение [8].

Кроме того, в лабораторных условиях (ИЗК СО РАН) на приборе «Пульсар — 2.2: измерение времени и скорости распространения ультразвука» получены скорости распространения продольных сейсмических волн (V_p , м/с) в образцах-керне (диаметр цилиндров 0,06 м) длиной 2,0–5,0 см и 5,1–15,0 см. Измерения выполнялись параллельно слоистости и перпендикулярно к ней. В первом случае удалось измерить скорость только по слоистости, так как при небольшой высоте образца (менее 5 см) прибор не может определить скорость в вертикальном направлении, т. е. время прохождения пути всегда будет 9,59 мкс, что мы и обнаружили при измерениях. Во втором случае были получены два значения «сейсмической скорости».

Впервые для некоторых образцов в ИЗК СО РАН были изготовлены и профессионально описаны петрографические шлифы: установлены типы текстуры и структуры, типы и состав цемента, размеры и минеральный состав обломков, признаки бластогенеза и кластогенеза. Проведён качественный анализ влияния указанных характеристик на прочность метапесчаников протерозоя.

Для составления матрицы по физико-механическим свойствам скальных грунтов, отобранных из скв. 1А-5, 1А-6, 1В-1, 1В-4, 1С-2, были выбраны

десять образцов ($n = 10$), для каждого получены значения признаков-показателей, к числу которых относились: природная плотность ($P_{пр}$), прочность на растяжение (R_p), прочность на сжатие (R), прочность на растяжение (R_{p1}) и сжатие (R_1) в водонасыщенном состоянии, коэффициент размягчаемости песчаников по прочности на растяжение ($K_{рА}$) и сжатие ($K_{рБ}$) ($m = 7$). Затем в матрицу дополнительно был введен показатель, характеризующий водопоглощение (W_n) пород ($n = 10$, $m = 8$).

Эти данные проанализированы с помощью программ «Стандартная статистика» и «Кластер-анализ», последняя широко применяется в грунтоведческой группе лаборатории инженерной геологии и геоэкологии ИЗК СО РАН, где она установлена на персональном компьютере в EXCEL [6, 9, 10, 12]. Программа состоит из двух частей: R -анализ исследует связь признаков (показателей физико-механических свойств песчаников) по общей выборке образцов; Q -анализ устанавливает связь между объектами (образцами), т. е. группирует их в кластеры.

В первом случае (R -тип) строится график-дендрограмма, характеризующая степень корреляционной связи между признаками и их группами: по вертикали располагаются признаки, по горизонтальной оси — коэффициент корреляции R (от +1 до -1). При $R > 0,7$ связи между признаками и их группами считаются существенными, при $R < 0,4$ — слабыми; коэффициент корреляции в пределах 0,4—0,7 свидетельствует о средней степени связей (их можно назвать «заметными»).

Во втором случае (Q -тип) дендрограмма представляет собой группирование объектов по степени сходства между ними относительно анализируемых признаков: по горизонтали указывается «евклидово расстояние» (r) — мера близости между

объектами (от 0 до +1), по вертикали — порядковые номера объектов-образцов. Чем больше «евклидово расстояние», тем меньше степень близости между образцами по значениям показателей.

Результаты и их обсуждение

Физико-механические свойства. Природная влажность песчаников не превышает 0,2 %, остальные показатели приведены для выбранных десяти образцов (табл. 1).

Определены пределы прочности на растяжение ($R_p = 15,3$ —38,6 МПа) и одноосное сжатие ($R = 92,9$ —151,4 МПа) в условиях природной влажности; аналогичные определения выполнены для тех же образцов в водонасыщенном состоянии ($R_{p1} = 10,3$ —29,4 МПа; $R_1 = 77,7$ —137,5 МПа); рассчитаны коэффициенты размягчаемости (в долях единицы) по результатам растяжения ($K_{рА} = 0,53$ —0,96) и одноосного сжатия ($K_{рБ} = 0,67$ —0,97). При сопоставлении прочности песчаника на одноосное сжатие и растяжение четко устанавливается анизотропия этого свойства: коэффициент анизотропии изменяется от 3,7 до 8,0 ($K_{ан} = R/R_p$). По представленным материалам проведена статистическая обработка данных (табл. 2) и построены графики-дендрограммы с помощью программы «Кластер-анализ» — R - и Q -типов.

Результаты статистического анализа

Природная плотность метаморфизованных песчаников в среднем составляет 2,70 г/см³, при этом степень изменчивости этого показателя очень низкая ($V = 3$ %) Для сравнения приведём по гранитам, габбро, пироксенитам, кварцитам, сланцам и гнейсам [7, с. 51—59] следующие значения: для

Таблица 1

Показатели физико-механических свойств метаморфизованных песчаников протерозоя площадки Удокан (материалы ЦГЭИ НИ ИргТУ)

Номер п/п	Номер скв.	H	Показатель							
			$P_{пр}$	R_p	R	R_{p1}	R_1	$K_{рА}$	$K_{рБ}$	$K_{ан}$
1 ш	1А-5	9,9	2,67	18,4	93,9	16,9	77,7	0,92	0,83	5,1
2 ш	1А-5	11,5	2,59	20,5	110,3	16,2	106,8	0,79	0,97	5,4
3	1А-5	15,2	2,67	32,9	151,4	27,2	130,9	0,83	0,86	4,6
4 ш	1А-6	5,3	2,68	25,1	132,2	21,4	96,9	0,85	0,73	5,3
5	1А-6	8,8	2,75	30,4	141,7	29,4	108,5	0,96	0,77	4,7
6 ш	1В-1	12,4	2,74	18,2	92,9	16,6	89,5	0,91	0,96	5,1
7	1В-4	9,0	2,58	15,3	109,7	10,3	94,9	0,67	0,87	7,2
8 ш	1В-4	13,0	2,83	16,8	133,8	15,6	124,0	0,93	0,93	8,0
9 ш	1С-2	9,0	2,74	30,6	132,3	18,7	88,7	0,61	0,67	4,3
10 ш	1С-2	48,5	2,70	38,6	144,0	20,4	137,5	0,53	0,95	3,7

Примечание. H — глубина отбора образца, м; $P_{пр}$ — природная плотность песчаника, г/см³; R_p — прочность на растяжение, МПа; R — прочность на сжатие, МПа; R_{p1} — прочность на растяжение в водонасыщенном состоянии, МПа; R_1 — прочность на сжатие в водонасыщенном состоянии, МПа; $K_{рА}$, $K_{рБ}$ — коэффициенты размягчаемости песчаников по прочности на растяжение и сжатие (доли единицы); $K_{ан}$ — коэффициент анизотропии по прочности (доли единицы); ш — изготовлен и описан петрографический шлиф.

Таблица 2

Результаты статистической обработки данных о показателях физико-механических свойств метаморфизованных песчаников протерозоя — площадка Удокан ($n = 10$)

Параметр	Показатель							
	$P_{пр}$	R_p	R	R_{p1}	R_1	K_{pA}	K_{pB}	$K_{ан}$
$X_{ср}$	2,70	24,7	124,2	19,3	105,5	0,80	0,85	5,3
X_{min}	2,58	15,3	92,9	10,3	77,7	0,53	0,67	3,7
X_{max}	2,83	38,6	151,4	29,4	137,5	0,96	0,97	8,0
	0,075	8,018	20,973	5,637	19,767	0,148	0,104	1,307
$V, \%$	3	32	17	29	19	19	12	24
	0,057	6,845	18,010	4,248	16,003	0,12	0,083	0,916
M_d	2,69	22,8	132,2	17,8	101,9	0,84	0,87	5,1

Примечание. Параметры: $X_{ср}$, X_{min} , X_{max} — среднее, минимальное и максимальное значения показателя; — стандартное отклонение; V — коэффициент вариации; — среднее отклонение; M_d — медиана; n — число образцов; коэффициенты размягчаемости (K_{pA} , K_{pB}) и анизотропии ($K_{ан}$) рассчитаны в долях единицы.

гранита среднее значение плотности (11217 образцов) 2,57 г/см³, диорита — 2,81 (3683), габбро — 2,95 (1990), пироксенита — 3,20 (2895), кварцита — 2,61, сланцев — 2,72, гнейса — 2,70—3,10. Таким образом, наши песчаники по природной плотности близки к сланцам и кварцитам (2,61—2,72 г/см³); максимальная плотность характерна для магматических пород среднего и основного составов (2,81—3,20 г/см³).

Прочность на одноосное сжатие в среднем составляет 124,2 МПа — это очень прочные скальные грунты (максимальное значение 151,4 МПа, минимальное — 92,9), при этом коэффициент вариации (V) достигает 17 %, т. е. по сравнению с плотностью отмечается заметная изменчивость показателя, причину которой и нужно установить (это могут быть особенности структуры и текстуры песчаников, степень их микротрещиноватости, возможно, химический состав, но не величина плотности). Сравнение нашего объекта с диоритами, габбро и кварцитами [7] свидетельствует о его «отставании» по прочности: песчаники 124, диориты 154, габбро 110—191, кварциты 182 МПа.

Прочность при растяжении по абсолютному значению в четыре-восемь раз меньше прочности на сжатие, кроме того, этот показатель отличается максимальной изменчивостью ($V = 32 \%$). Можно предположить, что уменьшение прочности по растяжению связано с наличием в песчаниках микрослоистой текстуры (просмотр петрографических шлифов позволит эту текстуру зафиксировать, если она имеется в образце).

Коэффициент размягчаемости, рассчитанный по прочности на растяжение (K_{pA}), изменяется в относительно — широких пределах ($V = 19 \%$), следовательно, песчаники могут «бояться» воды, т. е. иногда попадают в группу размягчаемых разновидностей (три образца из десяти). Тот же коэффициент, рассчитанный по прочности на сжатие (K_{pB}), также позволяет выделить размягчаемые разновидности (два образца из десяти). В чем здесь причина? Ви-

димо, искать её нужно в структурно-текстурных особенностях песчаников, их составе или микротрещиноватости.

Результаты кластерного анализа

По кластеру R -типа выделились две группы признаков (рис. 1): 1) природная плотность ($P_{пр}$) и коэффициент размягчаемости, рассчитанный по прочности на растяжение (K_{pA}), с коэффициентом корреляции 0,35 (связь несущественная); 2) прочность на растяжение (R_p) и сжатие (R) (связь существенная — 0,78), прочность на растяжение (R_{p1}) и сжатие (R_1) при водонасыщении (связь заметная — 0,70—0,52). Первая и вторая группы между собой связи не имеют (коэффициент корреляции равен нулю). Самостоятельное положение занимает коэффициент размягчаемости по прочности на сжатие (K_{pB}), так как его связи с другими показателями практически отсутствуют. На основании приведенных данных можно заключить, что, во-первых, плотность песчаников не является фактором их прочности, поскольку связи между этими пока-

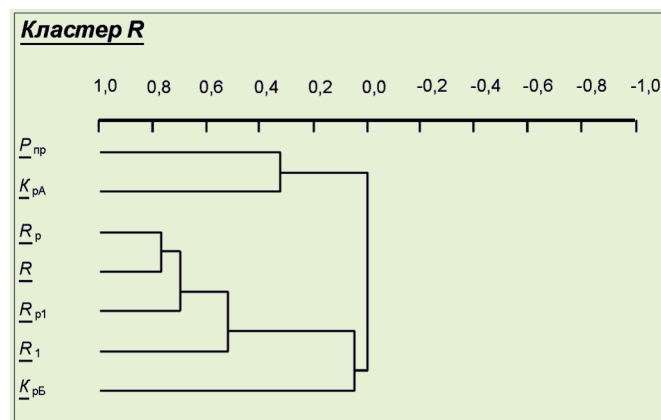


Рис. 1. Взаимосвязи природной плотности ($P_{пр}$) песчаников, их прочности на растяжение (R_p) и сжатие (R) при природной влажности и в условиях водонасыщения (R_{p1} , R_1), коэффициентов размягчаемости по прочности на растяжение (K_{pA}) и сжатие (K_{pB}); число образцов $n = 10$, число показателей $m = 7$

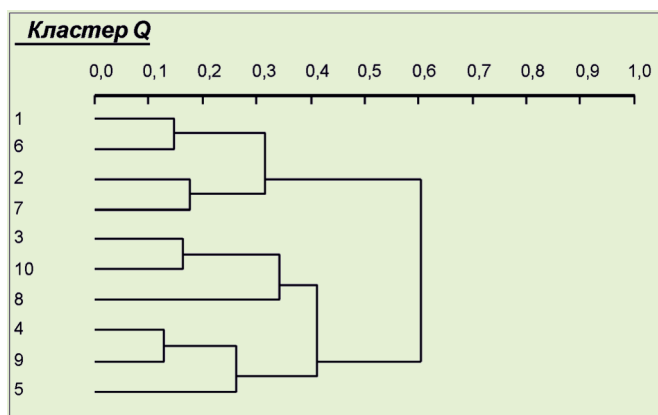


Рис. 2. Группирование образцов песчаников по показателям их плотности, прочности и коэффициентам размягчаемости ($n = 10$)

зателями отсутствуют; во-вторых, показатели прочности, определённые в разных вариантах, характеризуются заметными и существенными взаимосвязями.

При группировании (кластер Q -типа) четко выделились четыре пары объектов ($r = 0,12-0,18$): 1) образцы 1, 6 (имеются близкие значения R_p , R , R_{p1} , K_{pA}); 2) 2, 7 ($P_{пр}$, R); 3) 3, 10 ($P_{пр}$); 4) 4, 9 (R) (рис. 2). Учёт глубины отбора образцов показал, что их группирование подчиняется интервалам опробования: первая, вторая и четвертая пары находятся в верхней части разреза (5,3–12,8 м), третьей соответствуют разные глубины — 15,2 и 48,9 м.

Водопоглощение. Величина водопоглощения скальных грунтов зависит от степени их макро- и

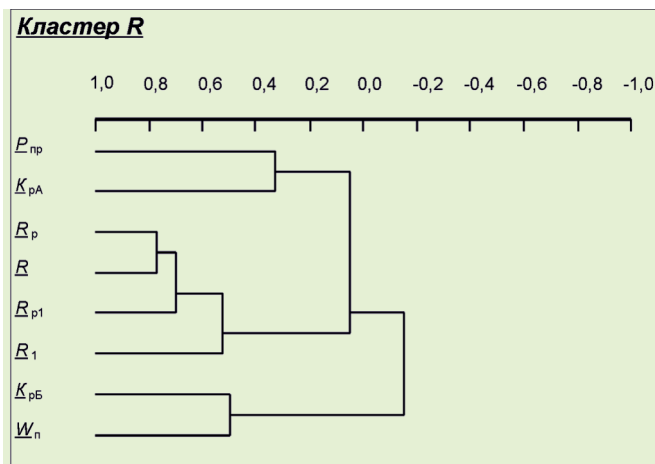


Рис. 3. Взаимосвязи плотности, прочности и водопоглощения песчаников

микротрещиноватости. В исследованных образцах ($n = 17$) этот показатель изменяется от 0,02 до 1,00 % (табл. 3); — среднее значение 0,28 %; — коэффициент — вариации достигает 90 %. Следовательно, микротрещины в метаморфизованных песчаниках имеются, но распределены они весьма неравномерно. Для выяснения влияния степени водопоглощения на прочность песчаников выполнен кластер-анализ R -типа ($n = 10$, $m = 8$): взаимосвязи с прочностью не обнаружены, однако заметна корреляция (коэффициент 0,5) с коэффициентом размягчаемости по сжатию ($K_{pБ}$) (рис. 3). Видимо, вода, проникая в микротрещины, снижает прочность именно в этом направлении, т. е. перпендикулярно слоистости.

Таблица 3

Природная плотность, водопоглощение и скорости распространения продольных сейсмических волн в протерозойских песчаниках

Номер п/п	Номер скв.	H	Показатель					
			$P_{пр}$	$W_{п}$	V_{pA}	V_{pB}	$K_{ан}(v_p)$	$K_{ан}(R)$
1 ш	1A-5	9,9	2,67	0,312	4950	4600	0,93	5,1
2 ш	1A-5	11,5	2,59	1,000	4050	3900	0,96	5,4
3	1A-5	15,2	2,67	0,265	5000	4050	0,81	4,6
4 ш	1A-6	5,3	2,68	0,112	5300	4900	0,92	5,3
5	1A-6	8,8	2,75	0,114	5360	4400	0,82	4,7
6 ш	1B-1	12,4	2,74	0,140	4340	—	—	5,1
7	1B-4	9,0	2,58	0,670	4050	—	—	7,2
8 ш	1B-4	13,0	2,83	0,332	—	—	—	8,0
9 ш	1C-2	9,0	2,74	0,022	4830	—	—	4,3
10 ш	1C-2	48,5	2,70	0,100	5300	—	—	3,7
11	1A-5	13,0	—	0,224	5220	5050	0,97	—
12	1C-2	5,5	—	0,134	5780	—	—	—
13	1C-2	32,5	—	0,135	5170	—	—	—
14	1C-2	47,0	—	0,138	5000	5080	1,02	—
15	1C-2	51,7	—	0,096	4820	4330	0,90	—
16	1B-4	25,0	—	0,500	—	—	—	—
17	1B-2	4,4	—	0,530	—	—	—	—

Примечание. H — глубина отбора образца, м; $P_{пр}$ — природная плотность, г/см³; V_{pA} , V_{pB} — скорость распространения продольных сейсмических волн вдоль образца (параллельно слоистости) и поперёк (в вертикальном направлении), м/с; $K_{ан}(v_p)$ — коэффициент анизотропии по сейсмической скорости (V_{pB} / V_{pA}), $K_{ан}(R)$ — то же по прочности (R_p / R) (доли единицы); ш — изготовлен и описан петрографический шлиф; прочерк — показатель не определялся.

Скорость распространения продольных сейсмических волн

Установлено, что скорость, измеренная вдоль образца (по слоистости), составляет 4050–5780 м/с ($n = 14$), поперёк (в вертикальном направлении) — 3900–5080 м/с ($n = 8$); коэффициент анизотропии близок к единице — 0,81–1,02 (табл. 3). Следовательно, микрослоистая текстура, отмеченная в петрографических шлифах почти всех образцов, практически не влияет на величину скорости распространения продольных сейсмических волн, в то же время она снижает показатель прочности песчаника по растяжению (коэффициент анизотропии 3,7–8,0). Почему так происходит? Видимо, причина заключается в том, что древние песчаники пережили воздействия процессов бластогенеза и клас-тогенеза (по шлифам признаки этих процессов установлены), которые избирательно повлияли на их прочность. Однако величина этого параметра позволяет относить исследованные образцы к прочным, очень прочным и средней прочности разновидностям, для которых более низкие сейсмические скорости, независимо от направления измерения, несвойственны. Вывод: протерозойские метапесчаники относятся к скальным грунтам первой категории по сейсмическому «поведению», но по прочности характеризуются высокой анизотропией.

Для сравнения приведем материалы одной работы [11], посвященной изучению взаимосвязей скорости сейсмических продольных волн трёх объектов: скальных интрузивных (граниты) и эффузивных (базальты, базальтовые туфы, трахиты, андезиты) пород — (Монголия, г. Мурэн), алевролитов из района Коршуновского ГОК (Иркутская область) и неогеновых глин (Монголия, г. Дзунмод). Измерения проводились с помощью ультразвуковой установки на большом числе образцов, применялся кластер-анализ R -типа. Для скальных грунтов эффузивной группы (базальтовые туфы) чётко установлена зависимость сейсмической скорости от наличия пилотокситовой микротекстуры (наблюдается ориентированность микролитов и крупных изометричных кристаллов плагиоклаза): пределы вариации скорости в зависимости от направления измерений составляют 2690–6020 м/с. Для наших протерозойских песчаников таких значений не установлено.

Результаты изучения петрографических шлифов

Эти результаты оказались наиболее интересными, тем более что они были получены впервые и использованы затем для выяснения факторов прочности протерозойских метаморфизованных песчаников площадки изысканий. Особенности состава, текстуры и структуры, а также признаки метаморфических изменений пород сопоставлялись с

показателями их плотности и прочности (приведены данные для четырех образцов).

Образец 1А-5 — 9,9 м. Метапесчаник — текстура микрослоистая, структура алевро-псаммитовая (размер обломков 0,1–0,6 мм, 0,06–0,1 мм; состав — кварц 57 %, плагиоклаз 15 %, калиевый полевой шпат 10 %); цемент контактово-поровый глинисто-слюдистый; контуры обломков реакционные, плагиоклазы замещены серицитом, отмечается вторичный хлорит (метаизменения); наблюдаются микротрещины и волнистое погасание кварца (следы катаклаза); $P_{пр}=2,67$; $R_p=18,4$; $R=93,9$; $K_{ан}=5,1$; $K_{рА}=0,92$; $K_{рБ}=0,83$. Для исследованного образца установлена минимальная прочность на сжатие, прочность на растяжение также уменьшается, при этом отмечается высокий коэффициент анизотропии. Как мы и предполагали выше, причина анизотропии прочностных свойств — микрослоистая текстура. Следы катакlastического метаморфизма и разъедание обломков за счёт глинисто-слюдистого цемента определили относительно пониженную прочность как на одноосное сжатие, так и растяжение.

Образец 1В-4 — 13,0 м. Ороговикованный песчаник, текстура слабо ориентированная, неясно слоистая, структура гранобластовая и реликтовая псаммитовая (размер обломков 0,1–0,3 мм, редко 0,4–0,6 мм, состав: кварц 55 %, плагиоклаз 17 %, калиевый полевой шпат 8 %); обломки превратились в гранобластовые агрегаты; растущие пластинки мусковита и зеленовато-бурого биотита «захватывают» зёрна кварца и плагиоклаза, создавая участками пойкилитовую структуру; обособление слюдистых минералов и хлорита, их однонаправленная ориентация определили текстуру породы. $P_{пр}=2,83$; $R_p=16,8$; $R=133,8$; $K_{ан}=8,0$; $K_{рА}=0,93$; $K_{рБ}=0,93$. Песчаник из всей исследованной группы образцов имеет максимальную природную плотность, высокую прочность на сжатие и пониженную — на растяжение; коэффициент анизотропии оказывается очень высоким ($K_{ан}=8,0$), что связано с ориентированной текстурой породы. По величине коэффициентов размягчаемости песчаник водоустойчив.

Образец 1С-2 — 9,0 м (рис. 4) — метапесчаник, в котором четко видны признаки бластогенеза (перекристаллизация в твердом состоянии): глинисто-слюдистый цемент превратился в смесь мусковита, биотита и хлорита; по полевым шпатам развиты пелит-серицитовые тонкочешуйчатые агрегаты; отмечена трещина-прожилок, заполненная гранобластовыми образованиями эпидота, кальцита и кварца. На фоне перекристаллизации сохраняется микрослоистость за счёт чередования реликтового мелкозернистого агрегата с более крупными агрегатными формами. Наблюдаются микротрещины, заполненные агрегатным эпидотом с примесью мелкочешуйчатого зеленоватого биотита и хлорита;

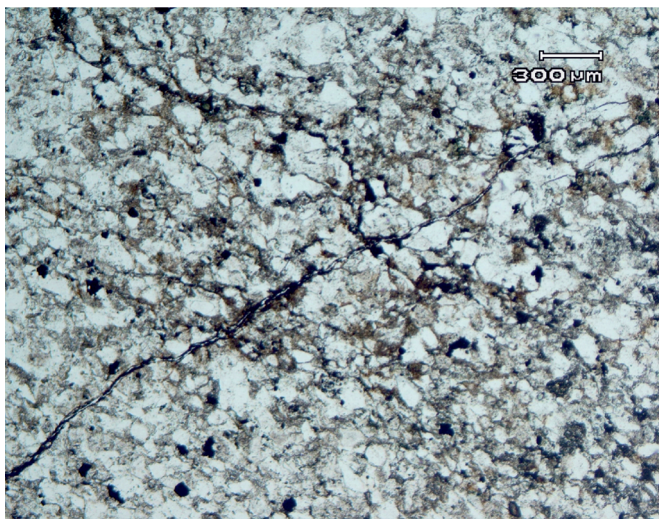


Рис. 4. Шлиф № 8 — обр. 1С-2 — 9,0 м. Метапесчаник, текстура неясно микрослоистая, структура — реликтовая псаммитовая (размер обломков 0,1–0,3 мм, состав: кварц 66 %, плагиоклаз 16 %, калишпат 8 %). Признаки бластогенеза: глинисто-слюдистый цемент превратился в мусковит, биотит и хлорит; трещина-прожилок заполнена гранобластовыми образованиями эпидота, кальцита и кварца; на фоне перекристаллизации — реликтовая микрослоистость (чередование мелких и более крупных агрегатов); микротрещины с агрегатным эпидотом, чешуйками биотита (катаклаз). $P_{пр} = 2,74$; $R_p = 30,6$; $R = 132,3$; $K_{ан} = 4,3$; $K_{рА} = 0,61$; $K_{рБ} = 0,67$

слои в песчанике трассируются трещинками катаклаза. Природная плотность несколько завышена, как и прочность на сжатие, однако анизотропия имеет место, что связано с ориентированной и слоистой текстурой породы. Фиксируется весьма интересная особенность: по величине коэффициентов размягчаемости, определённых по сжатию и растяжению, метапесчаник относится к размягчаемым разновидностям ($K_{рА} = 0,61$; $K_{рБ} = 0,67$). Видимо, причина относительной водонеустойчивости скального грунта (происходит снижение его прочности) — присутствие агрегатов разного состава, возникших в процессе перекристаллизации.

Образец 1С-2 — 48,5 м (рис. 5) представляет собой метапесчаник, который утратил свой первоначальный облик в результате процессов перекристаллизации; отмечаются микротрещины и следы раздавливания обломков. Наблюдается чередование алевритовых и псаммитовых слоёв, которое контролируется микротрещинами с новообразованиями хлорита и эпидота, при этом более прочные алевритовые слои при сжатии создают своеобразную «арматуру», увеличивая прочность песчаника.

Плотность образца всего 2,70 г/см³. В то же время прочность на сжатие максимальная (144,0 МПа), но при испытании на растяжение ее величина резко падает ($K_{ан} = 3,7$). Установлены различия водостойчивости песчаника — коэффициент размягчаемости по прочности на растяжение очень низкий (0,53), т. е. грунт считается, согласно классификации, размягчаемым, но по сжатию подобной картины не наблюдается ($K_{рБ} = 0,95$). Воз-

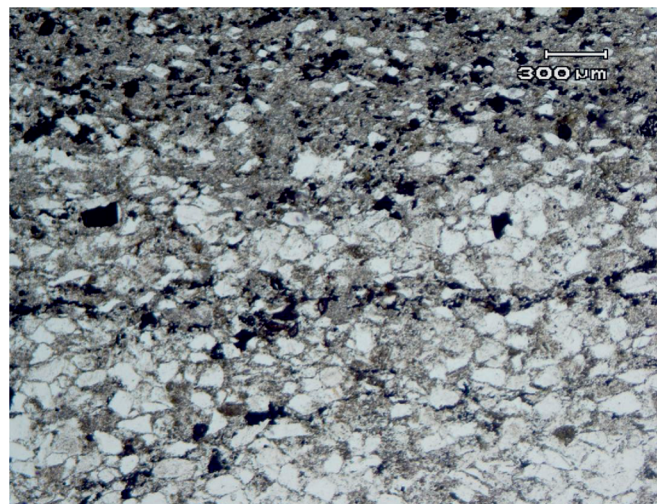


Рис. 5. Шлиф № 9 — обр. 1С-2 — 48,5 м. Метапесчаник, текстура слоисто-полосчатая, структура псаммитовая (размер обломков 0,1–0,3 мм), состав: кварц 52 %, плагиоклаз 15 %, калиевый полевой шпат 7 %; цемент контактово-порový, глинисто-слюдистый; кварц имеет извилистые контуры (признак бластогенеза), отмечаются микротрещины, следы раздавливания и волнистое погасание кварца (признаки катаклаза). $P_{пр} = 2,70$; $R_p = 30,6$; $R = 132,3$; $K_{ан} = 4,3$; $K_{рА} = 0,61$; $K_{рБ} = 0,67$

можно, алевритовые микрослои менее водостойчивы при действии горизонтальной силы, но при вертикальном сжатии эта «арматура» не реагирует на водонасыщение.

Для исследованного образца песчаника подтверждается отсутствие зависимости между его плотностью и прочностью на сжатие, что ранее было установлено по кластерному анализу R-типа (рис. 1). Причина отсутствия такой зависимости заключается, по всей вероятности, в характере изменений песчаника в процессе бластогенеза и катаклаза.

Песчаник с глубины 52 м имеет массивную текстуру, гранобластовую метасоматическую структуру, обломки утратили первоначальный облик, контуры искажены перекристаллизацией, кварц превратился в гранобластовый агрегат. Можно предположить, что протерозойские метапесчаники глубоких горизонтов должны обладать очень высокой прочностью при отсутствии анизотропии.

Выводы

Основные результаты исследований заключаются в следующем.

1. На основании изучения разрезов скважин, вскрывающих метаморфизованные протерозойские песчаники, установлена их неоднородность, связанная с присутствием на различной глубине зон дробления и тектонических нарушений, что понижает устойчивость грунтовой толщи в пределах площадки изысканий.

2. Статистическая обработка материалов по физико-механическим свойствам песчаников протерозоя показала, что их природная плотность зани-

жена и изменяется незначительно; параметры — прочности разнородны, особенно по растяжению; значения коэффициентов размягчаемости ($< 0,75$) свидетельствуют о понижении прочности некоторых образцов при водонасыщении.

3. Согласно стандартной классификации [4], исследованные скальные грунты относятся к прочным и очень прочным разновидностям по сжатию (77,7—137,5 МПа) и разновидностям средней прочности — по растяжению (15,6—18,7 МПа).

4. Природная плотность песчаников не является фактором их прочности, что подтверждается результатами кластерного анализа *R*-типа; величина водопоглощения весьма изменчива и заметную корреляцию имеет только с коэффициентом размягчаемости, непосредственного влияния на прочность она также не оказывает.

5. Особенностью исследованных скальных грунтов является анизотропия их прочностных свойств: при сжатии прочность в 4—8 раз выше, чем при растяжении; причина этой «аномалии» —

микрослоистая текстура или следы ориентированности псаммитовых и алевроитовых обломков, а также различных новообразований, появившихся в процессе метаморфических изменений.

6. Протерозойские метапесчаники относятся к скальным грунтам первой категории по сейсмическому «поведению» (не установлено различий по «сейсмической скорости» в зависимости от направления измерений), но по прочности характеризуются высокой анизотропией.

7. Главными факторами прочности исследованных древних метапесчаников оказались признаки, связанные с процессами бластогенеза и катаклаза, что установлено при изучении петрографических шлифов.

Следует добавить, что, к большому сожалению, при инженерно-геологических изысканиях в нашем регионе указанный фактор прочности скальных грунтов давно исключен из технических заданий по причине отсутствия специалистов-петрографов в грунтоведческих лабораториях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абатурова И.В. Оценка и прогноз инженерно-геологических условий месторождений твердых полезных ископаемых горно-складчатых областей. Екатеринбург: ФГБОУ «Уральский государственный горный университет», 2011. 226 с.
2. Алексеев А.С., Голодковская Г.А., Панасьян Л.Л. Проблемы изучения карбонатных пород на территории г. Москвы // Актуальные вопросы инженерной геологии и экологической геологии. М.: Изд-во МГУ, 2010. С. 27—28.
3. Голодковская Г.А., Кривошеева В.А., Лодыгин В.М. и др. Пространственные закономерности формирования инженерно-геологических свойств базальтов неоген-четвертичного возраста // Петрогенетические, историко-геологические и пространственные вопросы в инженерной геологии. М.: Изд-во МГУ, 2002. С. 39—40.
4. ГОСТ 25100—2011. Грунты. Классификация. Издание официальное. М.: МНТКС. 60 с.
5. Даммер А.Э., Квашук С.В. Инженерно-геологическая характеристика скальных массивов эффузивных пород Восточного Приамурья и Северного Сихотэ-Алиня. Хабаровск: ДВГУПС, 1990. 103 с.
6. Данилов Б.С. Кластерный анализ в EXCEL // Строение литосферы и геодинамика. Иркутск, 2001. С. 18—19.
7. Инженерная геология России. Том 1. Грунты России / Под ред. В.Т. Трофимова, Е.А. Вознесенского, В.А. Королева. М.: КДУ, 2011. 672 с.
8. Ломтадзе В.Д. Физико-механические свойства горных пород. Методы лабораторных исследований: Учебное пособие для ВУЗов. Л.: Недра, 1990. 328 с.
9. Рященко Т.Г. Региональное грунтоведение (Восточная Сибирь). Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2010. 287 с.
10. Рященко Т.Г. Микроструктура и свойства дисперсных грунтов (опыт применения кластерного анализа) // Изв. вузов. Геология и разведка. 2013. № 3. С. 39—45.
11. Рященко Т.Г., Демьянович Н.И., Басов А.Д. Взаимосвязи сейсмических свойств пород // Геоэкологические и экологические прогнозы. Новосибирск: Наука, 1984. С. 18—26.
12. Рященко Т.Г., Ухова Н.Н. Химический состав дисперсных грунтов: возможности и прогнозы (Восточная Сибирь). Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2008. 131 с.