



## Анализ инженерных свойств горных пород участка плотины Шах-и-Арус, Кабул, Афганистан

Абдулхалим Зарьяб<sup>1\*</sup>, Мохаммад Ибрагим Наджаф<sup>1</sup>, Мохаммад Зия Джамал<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Кабульский политехнический университет, Кабул, Афганистан

\* для корреспонденции: [a.zaryab@kpu.edu.af](mailto:a.zaryab@kpu.edu.af)

Данная версия является переводом статьи «Analysis of engineering properties of rock mass of Shah-wa-Arus dam site, Kabul, Afghanistan», опубликованной в журнале 15 марта 2019 г.

МРНТИ 70.17.29

doi: 10.29258/CAJWR/2019-R1.v5-1/35-48.rus

### Аннотация

*В настоящее время на реке Шакардара примерно в 22 км к северо-западу от г. Кабул, Афганистан, ведется строительство плотины Шах-и-Арус. Ее высота и длина составляют 77,5 м и 303 м, соответственно, а объем водохранилища оценивается примерно в 9,38 млн м<sup>3</sup>. Данное многоцелевое сооружение возводится из роликового уплотненного бетона (RCC) и предназначено для хранения оросительной воды, сдерживания наводнений и выработки электроэнергии. Плотина располагается в тектонически активной зоне, чем обуславливается значительное воздействие на нее тектонических процессов. В настоящей статье представлены результаты сопоставления показателей нарушенности горных пород (Rock Quality Designation, RQD) и параметров Люжона, основанных на обзоре и анализе материалов первоначальных инженерно-геологических изысканий и дополнительных полевых наблюдений. Результаты значений Люжона и показателей RQD прошли статистически-графическую оценку, и далее данные полученных графиков были сопоставлены со всеми другими естественными условиями зоны строительства плотины. Полученные результаты указывают на то, что комплекс природных условий в определенной степени характеризуется взаимосвязью между значениями Люжона и параметрами RQD. Кроме этого, массив горных пород основания плотины был охарактеризован в соответствии с классификацией скальной породы RMR (Rock Mass Rating).*

**Ключевые слова:** плотина Шах-и-Арус, показатель нарушенности пород, Люжон, проницаемость, скальная порода.

**Тип статьи:** научно-исследовательская статья.

## 1. Введение

Качество массива горных пород является одной из наиболее важных геологических параметров, влияющих на проектирование и строительство плотин. В целом геологические структуры, разрывы и степень выветривания являются наиболее важными параметрами, влияющими на инженерное обеспечение массива горных пород (Bell, 2007).

Еще один важный параметр – гидравлическая проводимость пород – тесно связан со свойствами разрывов и трещин. Таким образом, одним из основных вопросов исследований основания плотины является корректировка оценки взаимосвязи между свойствами разрывов и гидравлическим поведением массива горных пород. Гидравлическое испытание, или испытание по методу Люжона, также известное как «пакерное испытание», является одной из наиболее распространенных методик, используемых для оценки проницаемости горной породы (Houlsby, 1990). С другой стороны, Deere (1990) указывает, что использование индекса качества породы RQD и его сравнение с полученными результатами теста Люжона является одним из распространенных методов оценки и объяснения гидравлического поведения конкретного испытываемого участка. Вместе с тем, прямая взаимосвязь между этими двумя параметрами – будь то соответствия или противоречия – существует не всегда. Foyo et al. (2005) утверждают, что иногда наблюдаемая область с низкой степенью трещиноватости (высокий RQD) показывает высокую абсорбцию, и наоборот. Некоторые исследователи, такие как Houlsby (1990), Ewert (1997) и Palmstrom (2005), утверждают, что причиной данного явления могут быть некоторые проблемы с параметром RQD.

Bell (2007) утверждает, что если расстояние между трещинами превышает 10 см, расчет индекса RQD не позволит получить соответствующих данных о протяженности и заполнении трещин. Palmstrom (2005) сообщает, что на этот параметр в большей степени влияет направление ствола скважины, чем расстояние между трещинами или их частота. С другой стороны, гидравлическая проводимость массива горных пород имеет сильную и тесную связь со свойствами разрывов, такими как раскрытие, заполнение, материал заполнения, направленность, протяженность и связи между разрывами. Первоначально Bieniawski (1974) разработал систему классификации массивов горных пород (RMR) на основе опыта осуществления проектов по строительству тоннелей в Южной Африке. С тех пор данная система классификации претерпела значительные изменения отражающие местные условия.

Плотина Шах-и-Арус возводится в тектонически активной зоне, и участок плотины сильно подвержен значительному воздействию тектонических процессов – само появление русла реки стало результатом тектонического события. Породы в этом районе сильно трещиноватые, и в них наблюдается хрупкая деформация. Таким образом, результаты настоящего исследования, возможно, потребуют проведения

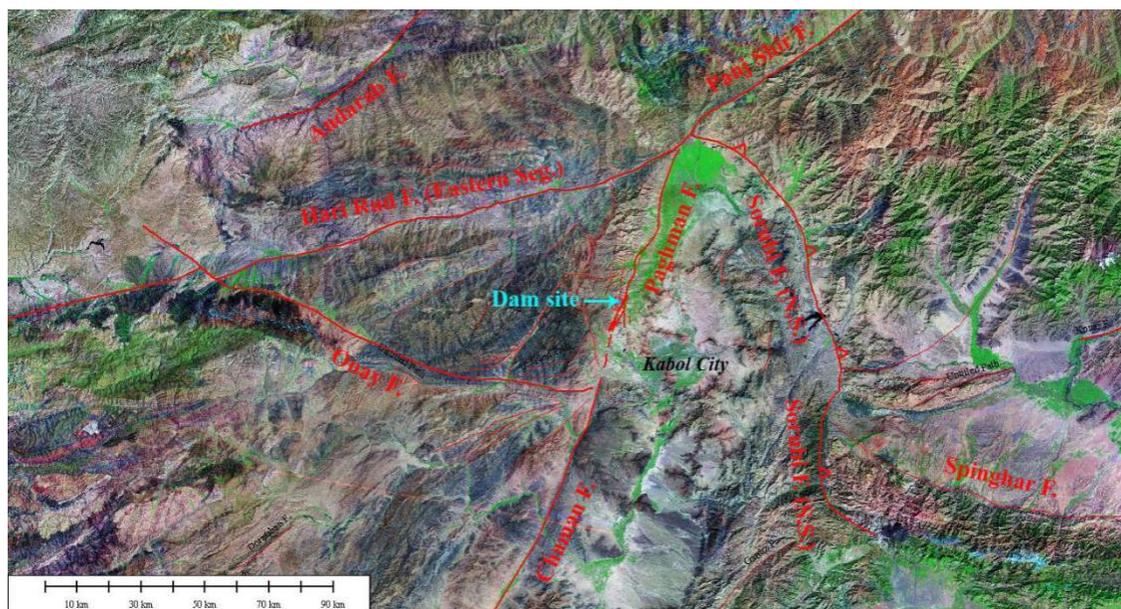
дополнительных изысканий в случае возникновения тех или иных проблемных вопросов или неясных моментов.

Инженерно-геологические и геотехнологические изыскания были проведены Tablieh-Parhoon Tahr (2011b) под непосредственным контролем Министерства энергетики и водных ресурсов Афганистана. В целом в зоне плотины было пробурено 10 скважин общей глубиной 420,32 м, включая 374,12 м в массиве горных пород (Tablieh-Parhoon, 2011b).

## 2. Геология и тектоника участка плотины

Плотина Шах-и-Арус расположена в долине реки Шакардара, примерно в 22 км к северо-западу от города Кабул, Афганистан. Плотина возводится из роликового уплотненного бетона (RCC), согласно проекту высота и длина плотины составляют 77,5 м и 303 м соответственно, а объем водохранилища оценивается примерно в 9,38 млн м<sup>3</sup>. Это многоцелевая плотина, предназначенная для хранения воды для орошения, сдерживания наводнений и выработки электроэнергии. Считается, что скальная порода плотины является частью Кабульского массива, который пересекается с Герат-Бамианским разломом на северо-западе, разломом Соруби на востоке и системой разломов Чаман на юге и западе (рис. 1). Поэтому массив горных пород раздроблен вдоль зон разломов и сдвигов, резко складчатый, а в некоторых местах надвинут, включая создание милонитовых зон.

Кабульский бассейн – структурный бассейн, образовавшийся в результате тектонических сдвигов в период позднего палеоцена (третичного периода). Он окружен метаморфическими породами. Фундамент плотины и прилегающие участки образованы различными породами предположительно палеопротерозойского возраста (включая: двуслюдяные, биотитовые, биотит-амфиболовые, гранит-биотитовые и плагиоклазовые гнейсы; мигматит, кварцит, мрамор, амфиболит). Преобладающим в литологическом составе пород в районе плотины являются тектонически трещиноватые гнейсы с прослойками выветренных биотитовых сланцев. На основании проведенных полевых наблюдений и исследований делается вывод о том, что данный район подвергся обширному влиянию тектонической активности, породы сильно разломанные и трещиноватые, с локально представленными интрузиями гранита, ведущими при контакте к формированию именно таких метаморфических продуктов, как гнейсы. Тектоническое движение по разломам фиксируется линеаментами. На основании спутниковых снимков и некоторых полевых наблюдений в правой части водохранилища, выше по течению от участка строительства плотины, выделены два боковых разлома.



**Рисунок 1.** Спутниковое изображение района проекта Шах-и-Арус, четвертичных и крупных разломов

### 3. Инженерно-геологические исследования участка плотины

Инженерно-геологические, гидрогеологические, а также исследования механики горных пород включали в себя: съемку разрывов, колонковое бурение и измерения качества породы, а также испытание по методу Люжона.

#### 3.1. Бурение

Для проверки состояния основания и получения образцов горных пород для лабораторных исследований были произведены бурения на участке плотины Шах-и-Арус. На участке плотины было пробурено 10 скважин общей протяженностью 420,32 м, из которых 46,2 м пробурено в аллювиальных отложениях и 374,12 м в коренных породах. Данные по проницаемости и обозначению качества породы (RQD) получены непосредственно на месте в результате полевых испытаний. На рисунке 2 показано расположение скважин, а полная информация о скважинах представлена в Таблице I.

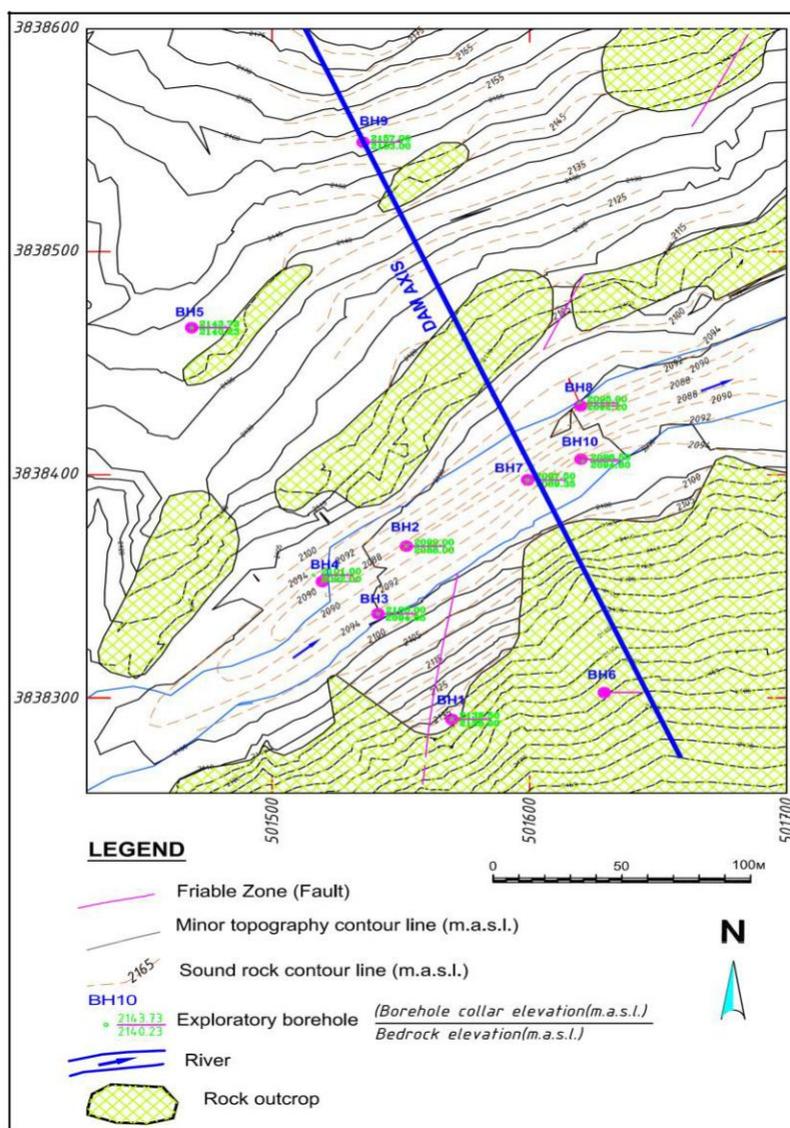


Рисунок 2. Расположение скважин

Таблица I. Описание скважины (Tablieh-Parhoon, 2011a)

№	Скважина	Расположение скважины	Глубина бурения, м			Падение / направление	Значение Люжона (Lu)
			Общая	Вскрышные породы	Массив горных пород		
1	Скв. 1	Правый усть	66,3	0,5	65,8	вертикальное	53
2	Скв. 2	Ось плотины/ река	23,3	11	12,3	вертикальное	4
3	Скв. 3	Ось плотины/ река	9,5	5,35	4,15	вертикальное	-
4	Скв. 4	Река/ Левый берег	15,8	9	6,8	30/310	-

## Продолжение таблицы I

№	Скважина	Расположение скважины	Глубина бурения, м			Падение / направление	Значение Люжона (Lu)
			Общая	Вскрышные породы	Массив горных пород		
5	Скв. 5	Левый устой	60	3,5	56,5	вертикальное	3
6	Скв. 6	Правый устой	65	0	65	вертикальное	3
7	Скв. 7	Ось плотины/ река	60,17	8,15	52,02	вертикальное	<1
8	Скв. 8	РН/ река	35	2,8	32,2	30/340	8
9	Скв. 9	Левый устой	65	4	61	вертикальное	3
10	Скв. 10	Ось плотины/ река	20,25	1,9	18,35	30/140	-

## 3.2. Оценка значений RQD с результатами теста Люжона

## 3.2.1. Обозначение качества породы (RQD)

RQD выражает отношение суммарной длины фрагментов извлеченного керна длиной более 100 мм в процентах к общей длине керна. (Bieniawski, 1989). Снижение извлечения керна косвенно зависит от степени слабости массива горных пород, состояния напряжения и степени трещиноватости, множества трещин и других факторов, влияющих на когерентность и изотропность горных пород. Данные, представленные в Таблице II, описывают только среднее состояние каждой скважины, но не могут описать реальное состояние спуска скважин, так как на некоторых участках скважин значения Люжона высокие, а на некоторых других – низкие. В целом высокие и низкие значения Люжона указывают на неоднородность массивов горных пород на участке плотины. В данном исследовании результаты испытания Люжона анализируются статистически и сравниваются с показателями RQD.

## 3.2.2. Проницаемость

Во время колонкового бурения были проведены испытания на проницаемость с помощью пакера в основании плотины Шах-и-Арус непосредственно в вертикальных и наклонных скважинах в нисходящей последовательности. Основная цель испытаний заключалась в определении проницаемости каждого из массивов горных пород основания плотины и ее устоев, что позволяет определить различные участки, требующие отдельной обработки. Всего в ходе инженерно-геологических изысканий было проведено 70 тестов Люжона.

Проницаемость породы измеряли по шкале Люжона (0–3 Люжона (Lu) – непроницаемость, 3–10 Люжона (Lu) – низкая проницаемость, 10–30 Люжона (Lu) – средняя проницаемость, 30–60 Люжона (Lu) – высокая проницаемость и >60 Люжона (Lu) – очень высокая проницаемость). Средние значения Люжона суммированы и представлены в Таблице I. Значения Люжона, определенные в

результате испытания Люжона, косвенно отражают состояние разрывов в основании плотины. Гидравлическое испытание указывало на необходимость затирки цементным раствором основания плотины. Результаты испытаний под давлением воды и степень соединения также используются в качестве первой помощи при определении соотношения воды и цемента и давления нагнетания в процессе цементирования для обработки основания.

По результатам бурения была проведена оценка качества горных пород (RQD), которая представлена в Таблице III. Принимая во внимание тот факт, что данный участок находится под сильным влиянием тектонической активности и разломов, мощность выветриваемой зоны на этом участке варьируется. В целом, результаты испытаний Люжона и RQD показывают, что на участке плотины между этими двумя геотехническими параметрами существует определенная значимая связь. Результаты тестов Люжона представлены в Таблице II.

**Таблица II.** Результаты теста Люжона

Скважина	Глубина, м	Среднее, Lu	Описание	Общее	Значение Люжона
Скв. 1	2–35	100	Очень высокая	53	Высокое
	35–45	3	Непроницаемый		
	45–50	4	Низкая		
	50–65	<1	Непроницаемый		
Скв. 2	13–23	4	Низкая	4	Низкое
Скв. 4	11,8–15,8	16	Средняя	16	Среднее
Скв. 5	5–10	12	Средняя	5.5	Низкое
	10–15	7	Низкая		
	15–20	2	Непроницаемый		
	20–27,65	5	Низкая		
	27,65–60	1	Непроницаемый		
Скв. 6	6–15	1	Непроницаемый	9	Низкое
	15–20	10	Низкая		
	20–25	25	Средняя		
	25–65	<1	Непроницаемый		
Скв. 7	10–60	<1	Непроницаемый	<1	Непроницаемый
Скв. 8	5–15	0	Непроницаемый	9	Низкое
	15–20	41	Высокая		
	20–25	3	Непроницаемый		
	25–30	0	Непроницаемый		
	30–35	3	Непроницаемый		

Продолжение таблицы II

Скважина	Глубина, м	Среднее, Lu	Описание	Общее	Значение Люжона
Скв. 9	5–10	9	Низкая	5	Низкое
	10–15	2	Непроницаемый		
	15–20	4	Низкая		
	20–25	3	Непроницаемый		
	25–30	6	Низкая		
	30–65	1	Непроницаемый		
Скв. 10	10–19,95	1	Непроницаемый	1	Непроницаемый

### 3.2.3. Правый устой плотины

В скважине № 1 от поверхности до глубины 35 м RQD классифицируется от очень плохого до плохого, затем значения RQD постепенно уменьшаются и классифицируются как от удовлетворительного до хорошего. Проницаемость породы в этой скважине от поверхности до глубины 35 м классифицируется как высокая проницаемость. После этого проницаемость породы постепенно снижалась до забоя скважины и была классифицирована как от низкой до непроницаемой. На рисунке 2 показано, что скважина № 1 расположена вблизи зоны разлома.

В скважине № 6 от поверхности до глубины 16 м значение RQD постепенно увеличивалось с 40 до 70 процентов, затем до глубины 27 м RQD снизилось до 40 процентов. После этого RQD стабильно увеличивалось до забоя скважины. Значения Люжона увеличиваются до глубины 27 м. В дальнейшем значения Люжона уменьшаются по мере увеличения глубины.

### 3.2.4. Левый устой плотины

В скважине № 5 от поверхности до глубины 27 м RQD классифицируется как плохое, затем значения RQD постепенно уменьшаются и классифицируются как хорошие. Значения Люжона увеличиваются в этой скважине при увеличении глубины.

В скважине № 9 в целом с увеличением глубины значения RQD увеличиваются, а значения Люжона, напротив, уменьшаются. Это означает, что в этой скважине существует прямая связь между показателями Люжона и RQD.

В скважине № 9 в целом, с увеличением глубины, значения RQD увеличиваются, а значения Люжона, наоборот, уменьшаются. Это означает, что в этой скважине существует прямая связь между значениями Люжона и RQD.

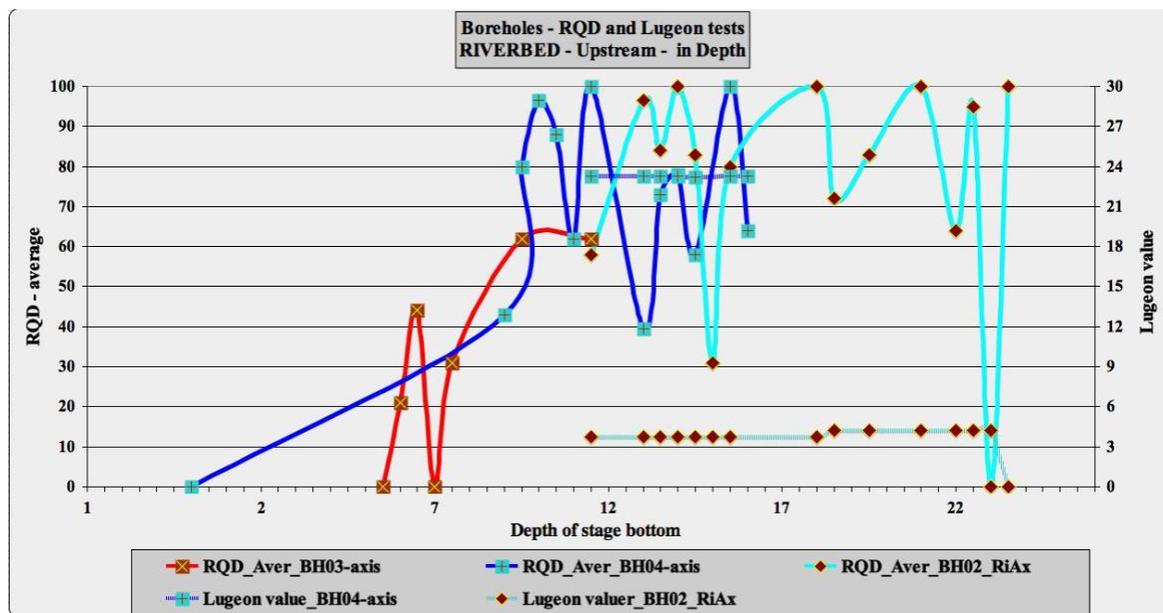
### 3.2.5. Выше по течению от оси плотины (русло реки)

Скважина № 2 – на глубине от 15 до 23 м скважина состоит из массива горной

породы относительно очень хорошего качества, всего один метр скважины классифицируется как очень плохого качества.

Скважина № 3 – качество RQD оценивается от очень плохого к удовлетворительному.

Скважина № 4 – качество RQD оценивается от плохого до отличного.



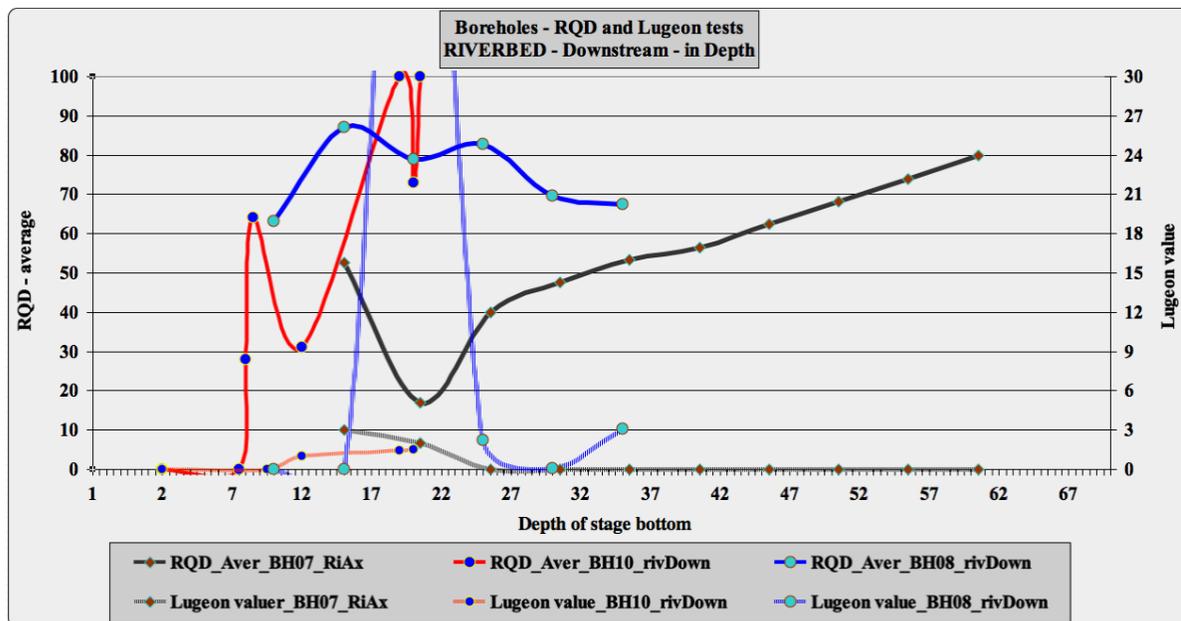
**Рисунок 3.** Сравнение результатов RQD и Люжона скважин в русле реки (в направлении вверх по течению от оси плотины)

### 3.2.6. Ниже по течению от оси плотины (русло реки)

В скважине № 7 от поверхности до глубины 14 м RQD классифицируется как плохое, затем значения RQD постоянно уменьшаются и классифицируются от хорошего до отличного. Кроме того, по результатам теста Люжона порода классифицируется как непроницаемая.

В скважине № 8, расположенной ниже по течению от тела плотины, качество RQD находится в диапазоне от хорошего до отличного. В целом, с увеличением глубины значения RQD увеличиваются, а значения Люжона уменьшаются.

Скважина № 10. Значения RQD от поверхности до глубины 12 м классифицируются от плохих до удовлетворительных. Далее от 12 до 19,5 м RQD классифицируется как отличное. По результатам испытаний Люжона порода классифицируется как непроницаемая.



**Рисунок 4.** Сравнение результатов RQD и Люжона скважин в русле реки (в нижнем течении от оси плотины)

Согласно результатам испытаний Люжона, в большинстве скважин с увеличением глубины наблюдается постоянная тенденция уменьшения значений Люжона.

**Таблица III.** Результаты определения качества горных пород из скважин, пробуренных на участке плотины Шах-и-Арус (Tablieh-Parhoon, 2011a)

№	Скважи на	Расположение скважины	RQD		
			Средний	Минимум	Максимум
1	Скв. 1	Правый устой	52.376	38.00	74.75
2	Скв. 2	Ось плотины/ река	76.548	73.43	79.67
3	Скв. 3	Ось плотины/ река	25.000	25.00	25.00
4	Скв. 4	Река/ Левый устой	81.875	74.75	89.00
5	Скв. 5	Левый устой	62.358	29.00	90.00
6	Скв. 6	Правый устой	65.794	38.40	97.25
7	Скв. 7	Ось плотины/ река	47.667	17.00	79.83
8	Скв. 8	РН/ Река	74.854	63.17	87.00
9	Скв. 9	Левый устой	50.471	27.38	90.00
10	Скв. 10	Ось плотины/ река	63.800	18.40	73.00

#### 4. Лабораторное испытание

Лабораторные исследования проводились в соответствии с процедурами, рекомендованными ISRM (2007) и ASTM для определения физико-механических свойств горных пород, включая удельный вес, плотность, абсорбцию, пористость, одноосную прочность, прочность на сжатие и растяжение, когезию, угол внутреннего трения и параметры деформации (коэффициент Пуассона и модуль упругости). Результаты испытаний обобщены и представлены в Таблице V.

**Таблица V.** Результаты лабораторных испытаний горных пород на участке плотины Шах-и-Арус (Tablieh-Parhoon, 2011b)

Показатель устойчивости, %		Содержание воды, %		Пористость, %		Плотность влажного грунта, г/см <sup>3</sup>		Плотность сухого грунта, г/см <sup>3</sup>		Тип горной породы
99,3		0,26		0,77		2,9		2,9		Гранодиоритовый гнейс
Результаты испытаний на прочность на одноосное сжатие (UCS) и модуль упругости (E)										
E-влажн. (Gp)		E-сух. (Gp)		UCS-влажн. (MPa)		UCS-сух. (MPa)		Тип горной породы		
средн.	Интервал	средн.	Интервал	средн.	Интервал	средн.	Интервал			
35,0	24,9–48,1	43,0	29,6–62,1	108,5	51–146	142,6	111–177	Гранодиоритовый гнейс		
Результаты испытаний на прямой сдвиг										
Φ (градус)		C (MPa)				Тип горной породы				
35		0,16				природный		Гранодиоритовый гнейс		
30		0,0				распил				
Результаты испытаний при трехосном сжатии										
Φ (градус)		C (MPa)				Критерий Хоека-Брауна		Тип породы		
						m <sub>i</sub>		S	Гранодиоритовый гнейс	

#### 5. Рейтинг скальной породы (RMR)

Для обобщения геологических и геотехнических данных была использована одна эмпирическая система классификации скальной породы. Результаты классификации представлены в Таблице VI.

**Таблица VI.** Система оценки скальной породы на участке плотины Шах-и-Арус (Bieniawski, 1989).

<b>Параметры</b>	<b>Оценка</b>
Прочность на одноосное сжатие (МПа)	108,5
Оценка	12
Индекс RQD (%)	60
Оценка	13
Расстояние между трещинами (м)	0,2–2
Оценка	15
Состояние разрывов:	
Устойчивость (м)	1–15
Апертура (мм)	0,2–20
Шероховатость	От очень шероховатой до гладкой
Заполнение	Чистые – С кристаллами Si и Plg
Выветривание	Слегка выветренные
Оценка	2
Состояние грунтовых вод	Сухой
Оценка	15
<b>Общая оценка</b>	<b>57</b>
<b>RMR</b>	<b>III</b>
<b>Описание</b>	<b>Качество породы удовлетворительное</b>

**Таблица VII.** Классы геомеханической классификации (Bieniawski, 1989).

<b>RMR</b>	<b>Качество породы</b>
0–20	Очень плохое
21–40	Плохое
41–60	Удовлетворительное
61–80	Хорошее
81–100	Очень хорошее

Эмпирическая система классификации скальной породы во многом зависит от общих характеристик. Результаты классификации показывают, что массив горных пород на участке плотины относится к категории пород удовлетворительного качества (RMR = 57).

## 6. Заключение

Плотина Шах-и-Арус расположена в долине реки Шакардара в активной тектонической зоне. Горные породы на участке плотины – гранито-гнейсы. По данным натурных наблюдений, можно предположить, что с правой стороны водохранилища возможны обрушения. Судя по наличию трещин, измененных зон и довольно крутых склонов, существующие породы в условиях влажности и высокого давления воды являются неустойчивыми. Согласно результатам испытаний Люжона, проведенным в девяти скважинах на участке плотины, породы классифицируются как средние и непроницаемые, только породы в первой скважине (01) классифицируются как высокопроницаемые. Результаты по Люжону показывают, что значение Люжона уменьшается с увеличением глубины на участке плотины.

В целом результаты Люжона и RQD показывают, что между этими двумя геотехническими параметрами на участке плотины существует определенная взаимосвязь. В соответствии с классификациями RQD и RMR горные породы массива на участке плотины классифицируются как породы удовлетворительного качества.

## 7. Благодарности

Авторы выражают искреннюю благодарность Министерству энергетики и водных ресурсов за доступ к данным плотины.

## 8. Список источников

Zaryab, A., Najaf, M.I. and Jafari, I., 2015, Rock Mass Engineering Classification of Shah-wa-Arus Dam Site, Kabul, Afghanistan//5th International Hindu Kush Geosciences Conference. – KPU, Kabul, Afghanistan. Available at: <https://sites.google.com/site/hindukushconf/publications/special-papers/zaryab-2015>.

Bell, F.G., 2007, Engineering Geology. 2nd ed. London, United Kingdom: Butterworth-Heinemann, 592 pp.

Bieniawski, Z.T., 1974, Estimating the strength of rock materials. National Mechanical Engineering Research Institute, Council for Scientific and Industrial Research.

Bieniawski, Z.T., 1989, Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil and petroleum engineering, New York, John Wiley & Sons.

Deere, D.U. and Deere, D.W., 1989, Rock Quality Designation (RQD) Index in Practice Contract Report G1–89–1, Department of the Army Corps of Engineers.

Foyo, A., Sanchez, M. A. and Tomillo, C., 2005, A proposal for a secondary permeability index obtained from water pressure tests in dam foundations. Engineering Geology, Vol. 77, pp. 69-82.

Hoek, E. and Brown, E.T., 1997, Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 34, No 8, pp. 1165-1186.

Houlsby, A.C., 1990, *Construction and design cement grouting*. John Wiley and Sons, Inc, USA., 392 pp.

Palmstrom, A., 2005, Measurements of and correlations between block size and rock quality designation (RQD). *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 20, No 4, pp. 362-377.

Tablieh-Parhoon Tarh, J.V. 2011a, Shah-wa-Arus – Multipurpose project – Final Report on Engineering Geology.

Tablieh-Parhoon Tarh J.V., 2011b, Shah-wa-Arus – Multipurpose project – Final Report on Rock Mechanics.