

УДК 624.131

С.Н. Чернышев, Т.В. Зоммер, А.А. Лаврусевич

НИУ МГСУ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ СКАЛЬНЫХ МАССИВОВ ОСНОВАНИЯ ГИДРОСООРУЖЕНИЯ МЕТОДОМ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА НА ПРИМЕРЕ БОГУЧАНСКОЙ ГЭС

Проведен статистический анализ массовых определений коэффициента фильтрации в целях построения наиболее точной расчетной модели фильтрационного поля неоднородного скального основания плотины, необходимой для фильтрационных расчетов, а также прогноза фильтрационных режимов гидротехнических сооружений и их оснований. Получена эффективная оценка коэффициента фильтрации на основе закона статистического распределения. Предложен формализованный подход к определению структурных элементов поля фильтрационной неоднородности скальных массивов основания гидросооружения на основе статистического анализа. Показан способ выделения инженерно-геологических элементов с учетом фильтрационной неоднородности скальных грунтов на примере Богучанской ГЭС на р. Ангаре.

Ключевые слова: гидротехнические сооружения, скальные основания, фильтрационный режим, фильтрационная неоднородность, натурные наблюдения, статистический анализ фильтрационной неоднородности, Богучанская ГЭС, Ангара

Сложенные из разных горных пород скальные основания гидросооружений чаще всего имеют неоднородные по степени трещиноватости [1—7] участки. Для детальной проработки и оконтуривания неоднородности на геологических разрезах требуется большое количество скважин и горных выработок. Однако сложный рельеф бортов долины и наличие мощного потока в русле ограничивают возможность проходки дополнительных скважин, шахт и штолен.

Задача построения гидрогеологической модели с учетом фильтрационной неоднородности и скоростных характеристик подземного потока, полученных, в частности, на основе фильтрационной модели блочной среды сетей трещин [8—10], ставится в пособии к СНиП [11].

Однако в [11] оказывается не учтен масштабный эффект, возникающий в связи с тем, что объем опробованной зоны при одиночных откачках и нагнетаниях на несколько порядков меньше объема основания гидроузла и на два порядка меньше объема подлежащих цементации фильтрующих зон. При этом предлагаемое нами эффективное расчетное значение коэффициента фильтрации основания существенно отличается от рекомендуемого в [11].

Построение модели водопроницаемости скальных грунтов основания рассматриваемой в качестве примера Богучанской ГЭС [12] с учетом фильтрационной неоднородности включает весь спектр классификации оснований по степени водопроницаемости — от практически водонепроницаемых до очень сильноводопроницаемых (табл. 1) [11].

Табл. 1. Классификация скальных массивов на основе показателя степени водопроницаемости

Степень водопроницаемости	Коэффициент фильтрации K_f , м/сут	Удельное водопоглощение q , л/мин
Практически водонепроницаемые	$> 0,005$	$> 0,01$
Слабоводопроницаемые	$0,005 \dots 0,3$	$0,01 \dots 0,1$
Водопроницаемые	$0,3 \dots 3$	$0,1 \dots 1$
Сильноводопроницаемые	$3 \dots 30$	$1 \dots 10$
Очень сильноводопроницаемые	> 30	> 10

В условиях ограниченного объема информации при расчленении массива скального основания гидросооружения на инженерно-геологические элементы (ИГЭ) авторы считают целесообразным применять формализованный подход, основанный на математико-статистическом анализе. При этом используется алгоритм расчленения неоднородного массива на ИГЭ по результатам ограниченного числа определений одного показателя в отдельных точках массива [13].

Алгоритм может быть применен для анализа неоднородности на основе достаточно большого множества определений свойства массива при соблюдении условия, что в пределах ИГЭ случайные колебания показателя свойства или какой-либо его функции, например, логарифма показателя свойства, подчиняются нормальному закону распределения. В последнем случае все цифровые значения показателя должны быть пересчитаны для приведения к виду, при котором они подчиняются закону нормального распределения.

Полученные по разработанной методике границы ИГЭ и эффективные значения показателей свойств массива в пределах этих выделенных элементов могут служить материалом для определения глубины врезки бетонных плотин в скальные основания, а также материалом для назначения глубины и плотности цементационных завес, размещения дренажей и решения других задач гидротехнического проектирования [14—18].

В данном случае неоднородные скальные массивы основания Богучанской ГЭС расчленяем по численным значениям показателя удельного водопоглощения q , л/мин, определение которого в массовом количестве выполняется при инженерных изысканиях скального основания гидроузла. Количество определений удельного водопоглощения в сотни раз превышает число полевых определений модуля деформации штампами или прессиометрией. Гидравлический эксперимент позволяет охарактеризовать достаточно большой (порядка нескольких десятков кубических метров) объем массива посредством осреднения неоднородности сети трещин.

По сравнению с другими показателями удельное водопоглощение изменяется в широком диапазоне, что делает его удобным инструментом для расчленения неоднородного массива на ИГЭ. Показатель удельного водопоглощения

соответствует требованию алгоритма Б.Г. Слепцова [13] по характеру вероятностного распределения случайной величины в массиве: функция случайной величины в виде десятичного логарифма $\lg q$ и $\lg K_{\phi}$ имеет нормальное распределение, что показано по результатам многочисленных экспериментов в магматических и осадочных массивах горных пород в [19].

Выделив ИГЭ по показателю удельного водопоглощения, таким образом расчленим массив на зоны трещиноватости, в каждой из которых для определения механических характеристик массива можем планировать ограниченное количество дополнительных штамповых и прессиометрических испытаний.

Оценка расчетной характеристики водопроницаемости каждого ИГЭ может быть сделана путем осреднения множества значений q . При этом необходимо отметить, что ввиду масштабного эффекта среднее арифметическое значение q из множества опытов не соответствует эффективному значению водопроницаемости для большого объема, что было отмечено впервые в [19].

Экспериментальная проверка указанного предположения впервые была проведена одновременно в лаборатории кафедры гидрогеологии МГРИ [20] на приборе МСМ-1 и Б.Г. Самсоновым [21]. Авторы [20] поместили в центре модели с заданной круговой областью фильтрации и плановой неоднородностью массива водопонижающую скважину. Разбивка модели принималась равномерной. При проведении эксперимента для каждого блока коэффициент фильтрации назначался случайным образом из совокупности, соответствующей логарифмически нормальному (две модели) и нормальному (одна модель) распределениям. Для каждого исходного распределения были найдены средние арифметическая, геометрическая и гармоническая.

Понижение в центральной скважине было задано постоянным. По измеряемому расходу, поступающему в скважину при установившемся режиме потока, была определена эффективная оценка водопроницаемости неоднородного массива, которая затем сравнивалась со статистическими оценками исходных распределений. Оказалось, что для нормального распределения неоднородностей среднее арифметическое коэффициента фильтрации K_{ϕ} элементов неоднородности примерно совпадало с рассчитанной по скважине оценкой для всего объема модели.

Таким образом, среднее при Гауссовом распределении неоднородностей является эффективной оценкой. Для логарифмически нормального распределения коэффициентов фильтрации элементов неоднородности модели полученная по скважине эффективная оценка оказалась близка к средней геометрической. Причем средняя арифметическая оказалась больше эффективной оценки, а средняя гармоническая — меньше эффективной оценки, что вполне совпадает с теоретическими предположениями.

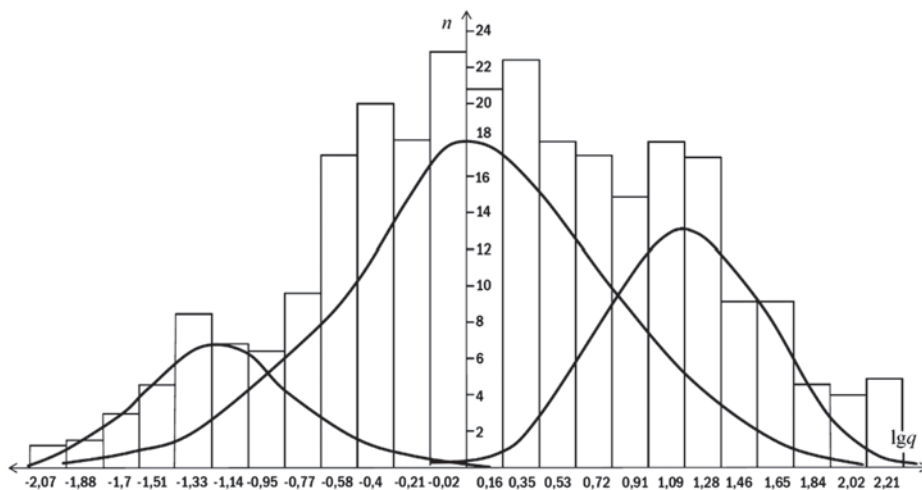
С помощью статистического метода проверки гипотезы удалось установить, что взятый по ИГЭ фактический материал не противоречит логарифмически нормальному закону распределения удельных водопоглощений q и коэффициентов фильтрации K_{ϕ} (табл. 2) [19].

Табл. 2. Сходимость гипотезы о нормальном распределении коэффициентов фильтрации

Опробованные породы	Проверяемая гипотеза	Число разрядов	Объем выборки	Критерий Пирсона	Вероятность подтвержденной гипотезы
Гранит в русле р. Днепр	Согласие эмпирических данных с логарифмически нормальным распределением	4	38	0,10	0,85
Траппы в долине р. Ангары		4	82	0,62	0,43
Песчаники, алевролиты, аргиллиты в долине р. Ангары		8	109	1,05	0,96
То же по другому ИГЭ		8	105	4,84	0,44
Граниты в долине р. Селенги		4	45	0,14	0,70
То же по другому ИГЭ		6	53	2,01	0,56

Предлагаемая методика оценки свойств неоднородного массива способствует решению двух задач: расчленения массива на статически внутренне однородные ИГЭ и оценки расчетных параметров массива в пределах выделенных элементов.

Для решения задачи расчленения предлагаем построение сводной гистограммы опытных результатов по всему массиву (рис.).



Сводная гистограмма и дифференциальные кривые распределения удельного водопоглощения осадочных пород под руслом р. Ангары на участке Кординских створов Богучанской ГЭС

В результате получаем многовершинное распределение или сумму нескольких распределений, каждое из слагаемых которых представляет отдельный ИГЭ массива. В математическом смысле задача заключается в выделении

отдельных слагаемых распределений из суммы. В геологическом отношении каждое из слагаемых распределений получено в отдельном генетически обособленном участке массива.

Соответствие каждой составляющей определенному генетическому элементу массива вытекает из предпосылки, принятой до математического анализа: мы расчленили суммарное распределение на отдельные нормальные распределения, а нормальное распределение верно только для генетически обособленного ИГЭ. После нахождения граничных значений распределений необходимо по специально разработанному алгоритму определить на разрезе области, в которых локализованы соответствующие ИГЭ.

Для уточнения на геологическом разрезе границ литологически различных пород, зон выветривания и повышенной трещиноватости воспользуемся числовыми данными фильтрационного опробования. На геологический разрез наносятся по скважинам числовые значения показателя свойства lgq , по которому ведется расчленение массива.

Против каждого значения lgq номером обозначается слагаемое распределение, в условные границы которого попадает данное значение lgq . Рядом со значением lgq следует отметить (через запятую, на трех возможных позициях) номера слагаемых распределений, к которым числовое значение может быть отнесено, но с меньшей вероятностью. На второй позиции (сразу после численного значения lgq) указывается номер (или номера) r -го слагаемого также из суммы распределений, для которого данное числовое значение попадает в пределы $lgq \pm \sigma_r$.

Это означает, что при данном значении показателя гипотеза о том, что данный интервал опробования относится к r -му однородному элементу, не отвергается примерно на 33%-м уровне значимости, т.е. является весьма вероятной. Если условие не выполняется ни для одного номера r , то на второй позиции ставится прочерк.

Аналогично на третьей позиции указываются номера составляющих, для которых данное значение попадает в интервал $lgq \pm 2\sigma_r$ (или прочерк, если ни для какой новой составляющей это не выполняется). В этом случае гипотеза r -й составляющей не отвергается примерно на 5%-м уровне значимости, т.е. является относительно менее вероятной. Наконец, на четвертой позиции указываются номера составляющих, для которых данное значение попадает в интервал $lgq \pm 3\sigma_r$. В этом случае гипотеза r -й составляющей не отвергается на 1%-м уровне значимости, т.е. она еще менее вероятна.

Таким образом, каждому индивидуальному значению показателя ставится в соответствие цифровой код с четырьмя позициями вида lgq (с возможными прочерками в последних трех позициях), определяющий во второй позиции максимально правдоподобную классификацию этого значения lgq , а также возможные (с разной вероятностью) варианты классификации. В целях оптимального выполнения процедуры присвоения цифровых кодов рекомендуется заранее выписать сигмовые, двухсигмовые и трехсигмовые интервалы для каждого из слагаемых распределений. Поскольку большинство индивидуальных значений располагается вблизи средних значений составляющих, коды, как правило, содержат по одному или несколько прочерков, вся процедура производится достаточно быстро.

После присвоения цифровых кодов всем индивидуальным значениям показателя свойства можно приступать к прорисовке результирующего фильтрационного разреза, заключающейся в объединении на разрезе интервалов с одинаковыми основными значениями во второй позиции кода. Границы между скважинами проводятся на формальной основе по геологическим соображениям. Например, если номер 4 присвоен совокупности с особо большими значениями lgq , т.е. заметно измененным выветриванием пород, то границы между скважинами естественно тянуть вдоль кровли коренных. Если внутри ограниченного таким образом элемента 4 попадает интервал с номером 3, то это может быть интерпретировано как появление останца сохранных пород. В таком случае вокруг номера 3 нужно показать границу ИГЭ с меньшим значением lgq , чем в номере 4.

То же появление интервала 3 в окружении элементов под номером 4 может быть интерпретировано как статистически случайный отскок экспериментального значения за условно выделенную числовую границу распределения с цифрой 4. При такой интерпретации мы обращаемся к третьей и последующим позициям цифрового кода. Если находим там значение 4, то можем принять предложенную интерпретацию с основанием тем большим, чем ближе к началу строки в цифровом коде стоит 4. Если же в коде цифра 4 отсутствует, то гипотеза случайного отскока должна быть отвергнута как весьма мало правдоподобная.

Вероятности, присвоенные каждой позиции кода, служат мерой правдоподобности гипотезы о случайном отскоке. Низкие значения ограждают нас от чрезмерного упрощения границ только на основе геологических соображений и одновременно дают возможность более четко изображать на разрезах геологические гипотезы с использованием геологических знаний и накопленного опыта. Последние цифры кода служат, главным образом, для устранения с разреза геологически неудобной рисовки, выполняемой в угоду кажущейся точности.

После нанесения границ на геологические разрезы можно уточнить параметры каждого ИГЭ или соответствующего ему распределения. Наилучшие оценки могут быть получены после проведения границ на разрезах. Для этого необходимо с каждого разреза снять числовые значения по каждому ИГЭ и составить новые совокупности 1, 2, 3, 4 и т.д. по числу слагаемых распределений, выделенных при первоначальном анализе и на разрезах. В новых совокупностях будут учтены все изменения, которые были внесены в ходе рисовки разрезов с учетом геологических соображений и косвенных, например геофизических, данных [22].

Для каждой из полученных совокупностей по известным статистическим формулам могут быть вычленены среднее значение, стандарты для среднего и индивидуального значений, а также другие статистические оценки, которые оказываются полезны на практике [23—27].

Такой дополнительной эффективной в гидравлическом смысле оценкой для удельного водопоглощения q коэффициента фильтрации K_{ϕ} оказывается среднее геометрическое. Обработка материалов изысканий согласно данной методике заканчивается составлением таблицы характеристик каждого ИГЭ.

Результаты предложенного статистического анализа массовых определений коэффициента фильтрации позволяют получить эффективную оценку коэффициента фильтрации и построить наиболее точную расчетную модель фильтрационного поля неоднородного скального основания, необходимую для фильтрационных расчетов и прогноза фильтрационного режима гидросооружений и их оснований.

Библиографический список

1. *Chernyshev S.N., Paushkin G.A.* Determination du module de deformabilite des roches en place // Symposium International — Reconnaissance des Sols et des Roches par Essais en Place. Paris, Fr., 1983.
2. *Raymer J., Maerz N.H.* Effect of variability on average rock-mass permeability // 48th US Rock Mechanics. Geomechanics Symposium, University of Minnesota, Twin Cities Campus Minneapolis, United States, 1—4 June 2014. 2014. No. 3. Pp. 1822—1829.
3. *Орехов В.Г., Зерцалов М.Г., Шимельмиц Г.И., Фишман Ю.А., Толстиков В.В.* Исследование схемы разрушения системы «бетонная плотина — скальное основание» // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. 1988. Т. 204. С. 71—76.
4. *Зерцалов М.Г., Толстиков В.В.* Учет упругопластической работы бетонных плотин и скальных оснований в расчетах с использованием МКЭ // Гидротехническое строительство. 1988. № 8. С. 33—36.
5. *Chernyshev S.N., Dearman W.* Rock fractures. London : Butterwort-Heinemann, 1991. 272 p.
6. *Orekhov B.G., Zertsalov M.* Fracture mechanics of engineering structures and rocks. Rotterdam, 2001.
7. *Mohajerani S., Baghbanan A., Bagherpour R., Hashemolhosseini H.* Grout penetration in fractured rock mass using a new developed explicit algorithm // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2015. Vol. 80. Pp. 412—417.
8. *Chernyshev S.N.* Estimation of the permeability of the jointy rocks in massif // Symp on Percolation through Fissured Rock, Proc., Sep 18—19 1972. Stuttgart, W Ger.
9. *Чернышев С.Н.* Движение воды по сетям трещин. М. : Недра, 1979. 142 с.
10. *Газиев Э.Г., Речицкий В.И., Боровых Т.Н.* Исследование фильтрационного потока в блочной среде применительно к проектированию сооружений в скальных массивах // Труды Гидропроекта. 1980. № 68. С. 137—147.
11. П 54—90. Методика составления моделей водопроницаемости скальных массивов в основаниях гидротехнических сооружений. Пособие к СНиП 2.02.02—85. СПб. : ВНИИГ, 1992. 97 с.
12. *Чернышев С.Н.* Экзогенные деформации траппов в долине р. Ангары // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 1965. № 12. С. 78—85.
13. *Рац М.В., Чернышев С.Н., Слепцов Б.Г.* Разработка критериев оптимальной глубины врезки бетонных плотин в скальные основания. Статистический анализ водопроницаемости основания Богучанской ГЭС. М. : ПНИИИС, 1975.
14. *Рассказов Л.Н., Анискин Н.А.* Фильтрационные расчеты гидротехнических сооружений и оснований // Гидротехническое строительство. 2000. № 11. С. 2—7.
15. *Malakhanov V.V.* Classification of states and criteria for the operational reliability of water-development works // Hydrotechnical Construction. 2000. Vol. 34. No. 11. Pp. 531—537.
16. *Зоммер В.Л.* Специфика гидравлических и гидротехнических научных исследований в лаборатории гидромеханики и гидравлики // Строительство: наука и образование. 2015. № 2. Ст. 5. Режим доступа: <http://nso-journal.ru>.

17. *Ходзинская А.Г., Зоммер Т.В.* Гидравлика и гидрология транспортных сооружений. М. : МГСУ, 2014. 92 с.
18. *Рассказов Л.Н., Анискин Н.А., Желанкин В.Г.* Фильтрация в грунтовых плотинах в плоской и пространственной постановке // Гидротехническое строительство. 1989. № 11. С. 26—32.
19. *Ильин Н.И., Чернышев С.Н., Дзекцер Е.С., Зильберг В.С.* Оценка точности определения водопроницаемости горных пород / под ред. Л.Д. Белый. М. : Наука, 1971. 150 с.
20. *Чановский А.Е., Перцовский В.В.* Экспериментальное исследование неоднородности горных пород в плане // Разведка и охрана недр. 1972. № 1. С. 45—49.
21. *Самсонов Б.Г., Зильберштейн Б.М., Бурдакова О.Л.* Определение гидрогеологических параметров при эффективной неоднородности водоносных горизонтов // Гидрология и инженерная геология. Экспресс-информация ВИЭМС, МГ СССР. 1972. № 4.
22. *Савич А.И., Речицкий В.И., Замахаев А.М., Пудов К.О.* Комплексные исследования деформационных свойств массива долеритов в основании бетонной плотины Богучанской ГЭС // Гидротехническое строительство. 2011. № 3. С. 12—22.
23. *Анискин Н.А., Тхань То В.* Прогноз фильтрационного режима грунтовой плотины Юмагузинского гидроузла и ее основания // Гидротехническое строительство. 2005. № 6. С. 19—25.
24. *Рассказов Л.Н., Анискин Н.А., Бестужева А.С., Саинов М.П., Толстиков В.В.* Сангудинский гидроузел: напряженно-деформированное состояние и фильтрация в основании плотины и в обход гидроузла // Гидротехническое строительство. 2008. № 5. С. 45—58.
25. *Rasskazov L.N., Aniskin N.A.* Filtration calculations for hydraulic structures and foundation beds // Hydrotechnical Construction. 2000. Vol. 34. No. 11. Pp. 525—530.
26. *Wu J.L., He J.* Determination of volumetric joint count based on 3D fracture network and its application in engineering // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vols. 580—583. Pp. 907—911.
27. *Gudmundsson A., Lo Tveit I.F.* Sills as fractured hydrocarbon reservoirs: Examples and models // Geological Society Special Publication. 2014. Vol. 374 (1). Pp. 251—271.

Поступила в редакцию в ноябре 2015 г.

Об авторах: **Чернышев Сергей Николаевич** — доктор геолого-минералогических наук, профессор, профессор кафедры инженерной геологии и геоэкологии, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, 8 (499) 183-83-47, 9581148@list.ru;

Зоммер Татьяна Валентиновна — преподаватель кафедры инженерной геологии и геоэкологии, заведующий лабораторией гидравлики, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, ZommerTV@mgsu.ru;

Лавруевич Андрей Александрович — доктор геолого-минералогических наук, профессор, профессор кафедры инженерной геологии и геоэкологии, заведующий кафедрой инженерной геологии и геоэкологии, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, 8 (499) 183-83-47, lavrusevich@yandex.ru.

Для цитирования: *Чернышев С.Н., Зоммер Т.В., Лавруевич А.А.* Определение фильтрационной неоднородности скальных массивов основания гидросооружения методом статистического анализа на примере Богучанской ГЭС // Вестник МГСУ. 2016. № 1. С. 150—160.

S.N. Chernyshev, T.V. Zommer, A.A. Lavrusevich

STATISTICAL ANALYSIS OF DETERMINING THE FILTRATION HETEROGENEITY OF FOUNDATION ROCK MASS OF HYDRAULIC STRUCTURES ON THE EXAMPLE OF THE BOGUCHANSKAYA HPP

In the article the authors carried out a statistical analysis of mass determination of the filtration coefficient, which allows us to construct the most accurate calculation model of seepage field of inhomogeneous bedrock foundation of the dam needed for seepage calculations and to predict seepage regime of hydraulic structures and their grounds. The algorithm can be applied to analyze heterogeneity based on the large set of definitions of the properties of soil, subject to the condition that within the engineering geological element of random fluctuations of the index properties or some of its functions, e.g., logarithm of index properties, obey normal distribution law. In the latter case, all digital values of the index should be recalculated and presented in the form, in which they submit to the law of normal distribution. The authors received effective evaluation of the filtration coefficient on the basis of the law of statistical distribution.

Correspondence of each component to a particular genetic element of the array is derived from the premise, adopted prior to the mathematical analysis: we divided the total distribution into separate normal distributions, and normal distribution is only true for a genetically separate engineering-geological element. After finding boundary values of the distributions it is required to determine the cut regions, in which relevant engineering-geological elements are localized, with the help of specially designed algorithm. In order to clarify geological distinction between the various lithological zones, zones of weathered and fractured zones, we use numerical data of filtration sampling. Then we put the numerical values of the index properties of I_{gq} on which segmentation of the array occurs, on a geological cross section, respectively, for each well.

After assigning numerical codes to the individual values of the indicator properties you can begin to image the geological section, where we combine the intervals with identical key values in the second position of the code. The boundaries between the drilled wells are held on a Pro forma basis for geological reasons. For example, if the set of values with the largest number I_{gq} , which corresponds to the species with a visually perceptible change when exposed to weathering, has a number 4, the boundaries between the drilled wells will naturally stretch along the roof of the bedrock. If according to the proposed methodology, within the limited element number 4, the interval is flagged with number 3, it can be interpreted as the appearance of the outcrop of other rocks. In this case we need to show the boundary of engineering-geological element with a smaller value of I_{gq} around the 3, than it is inside the engineering-geological element number 4. For each of the obtained groups of values, calculated using known statistical formulas, we calculated the mean value and other statistical estimates that are useful in practice.

For example, the geometric mean is an effective in a hydraulic sense evaluation of the specific absorption coefficient of the filter. So the authors proposed a formalized approach to defining the structural elements of the filtration field inhomogeneity of a rock mass of hydraulic structures foundation on the basis of statistical analysis. The article shows how to highlight the engineering-geological elements with the filtration inhomogeneity of rocky soils on the example of the Boguchanskaya HPP on the Angara River.

Key words: hydraulic structures, rock foundations, seepage conditions, heterogeneity of filtration, field observations, statistical analysis of the filtration heterogeneity, Boguchanskaya HPP, Angara

References

1. Chernyshev S.N., Paushkin G.A. Determination du module de deformabilite des roches en place. Symposium International — Reconnaissance des Sols et des Roches par Essais en Place. Paris, Fr., 1983.
2. Raymer J., Maerz N.H. Effect of Variability on Average Rock-Mass Permeability. 48th US Rock Mechanics. Geomechanics Symposium, University of Minnesota, Twin Cities Campus Minneapolis, United States, 1—4 June 2014, no. 3, pp. 1822—1829.

3. Orekhov V.G., Zertsalov M.G., Shimel'mits G.I., Fishman Yu.A., Tolstikov V.V. Issledovanie skhemy razrusheniya sistemy «betonnaya plotina — skal'noe osnovanie» [Investigation of the Destruction Scheme of the System "Concrete Dam — Rock Foundation"]. *Izvestiya Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrotekhniki im. B.E. Vedeneeva* [News of the All-Russian Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering Named after B.E. Vedeneev]. 1988, vol. 204, pp. 71—76. (In Russian)
4. Zertsalov M.G., Tolstikov V.V. Uchet uprugoplasticheskoy raboty betonnykh plotin i skal'nykh osnovaniy v raschetakh s ispol'zovaniem MKE [Account for Elastic Plastic Operation of Concrete Dams and Rock Foundations in Calculations Using FEM]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydrotechnical Construction]. 1988, no. 8, pp. 33—36. (In Russian)
5. Chernyshev S.N., Dearman W. *Rock Fractures*. London, Butterworth-Heinemann, 1991, 272 p.
6. Orekhov B.G., Zertsalov M. *Fracture Mechanics of Engineering Structures and Rocks*. Rotterdam, 2001.
7. Mohajerani S., Baghbanan A., Bagherpour R., Hashemolhosseini H. Grout Penetration in Fractured Rock Mass Using a New Developed Explicit Algorithm. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2015, vol. 80, pp. 412—417. DOI: <http://www.doi.org/10.1016/j.ijrmmms.2015.06.013>.
8. Chernyshev S.N. Estimation of the Permeability of the Jointy Rocks in Massif. *Symp on Percolation through Fissured Rock, Proc.*, Sep 18—19 1972. Stuttgart, W Ger.
9. Chernyshev S.N. *Dvizhenie vody po setyam treshchin* [Water Motion through the Network of Cracks]. Moscow, Nedra Publ., 1979, 142 p. (In Russian)
10. Gaziev E.G., Rechitskiy V.I., Borovykh T.N. Issledovanie fil'tratsionnogo potoka v blochnoy srede primenitel'no k proektirovaniyu sooruzheniy v skal'nykh massivakh [Investigation of Filtration Flow in Block Environment in Design of Structures in Rock Masses]. *Trudy Gidroproekta* [Works of Hydroproject]. 1980, no. 68, pp. 137—147. (In Russian)
11. P 54—90. Metodika sostavleniya modeley vodopronitsaemosti skal'nykh massivov v osnovaniyakh gidrotekhnicheskikh sooruzheniy [Article 54—90. Methods of Creating Waterproof Models of Rock Masses in Foundations of Hydraulic Structures]. *Posobie k SNIIP 2.02.02—85* [Manual to Construction Rules SNIIP 2.02.02—85]. Saint Petersburg, VNIIG Publ., 1992, 97 p. (In Russian)
12. Chernyshev S.N. Ekzogennye deformatsii trappov v doline r. Angary [Exogenous Deformations of Traps in the Valley of Angara River]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka* [News of Institutions of Higher Education. Geology and Exploration]. 1965, no. 12, pp. 78—85. (In Russian)
13. Rats M.V., Chernyshev S.N., Sleptsov B.G. *Razrabotka kriteriev optimal'noy glubiny vrezki betonnykh plotin v skal'nye osnovaniya. Statisticheskii analiz vodopronitsaemosti osnovaniya Boguchanskoy GES* [Developing the Criteria of Optimal Incision Depth of Concrete Dams into Rock Foundations. Statistical Analysis of Water Permeability of the Boguchanskaya HPP Foundation]. Moscow, PNIIS Publ., 1975. (In Russian)
14. Rasskazov L.N., Aniskin N.A. Fil'tratsionnye raschety gidrotekhnicheskikh sooruzheniy i osnovaniy [Filtration Calculations of Hydraulic Structures and Foundations]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydrotechnical Construction]. 2000, no. 11, pp. 2—7. (In Russian)
15. Malakhanov V.V. Classification of States and Criteria for the Operational Reliability of Water-Development Works. *Hydrotechnical Construction*. 2000, vol. 34, no. 11, pp. 531—537. DOI: <http://www.doi.org/10.1023/A:1017564423762>.
16. Zommer V.L. Spetsifika gidravlicheskiy i gidrotekhnicheskikh nauchnykh issledovaniy v laboratorii gidromekhaniki i gidravliki [Features of Hydraulic and Hydro-Technological Re-Search Conducted at the Laboratory of Hydromechanics and Hydraulics]. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2015, no. 2. Available at: <http://www.nso-journal.ru>. (In Russian)
17. Khodzinskaya A.G., Zommer T.V. *Gidravlika i gidrologiya transportnykh sooruzheniy. Uchebnoe posobie* [Hydraulics and Hydrology of Transport Constructions. Study Guide]. Moscow, 2014, 92 p. (In Russian)
18. Rasskazov L.N., Aniskin N.A., Zhelankin V.G. Fil'tratsiya v gruntovykh plotinakh v ploskoy i prostranstvennoy postanovke [Filtration in Soil Dams in Flat and 3D Statement]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydrotechnical Construction]. 1989, no. 11, pp. 26—32. (In Russian)

19. Il'in N.I., Chernyshev S.N., Dzehtser E.S., Zil'berg V.S. *Otsenka tochnosti opredeleniya vodopronitsaemosti gornyykh porod* [Estimating Determination Accuracy of Water Permeability of Rock Formations]. Moscow, Nauka Publ., 1971, 150 p. (In Russian)

20. Chapovskiy A.E., Pertsovskiy V.V. Eksperimental'noe issledovanie neodnorodnosti gornyykh porod v plane [Experimental Investigation of Rock Inhomogeneity in Plan]. *Razvedka i okhrana nedr* [Exploration and Preservation of Mineral Resources]. 1972, no. 1, pp. 45—49. (In Russian)

21. Samsonov B.G., Zil'bershteyn B.M., Burdakova O.L. Opredelenie gidrogeologicheskikh parametrov pri effektivnoy neodnorodnosti vodonosnykh gorizontov [Determination of Hydrogeological Parameters in Case of Effective Inhomogeneity of Aquifers]. *Gidrologiya i inzhenernaya geologiya. Ekspress-informatsiya VIEMS, MG SSSR* [Hydrology and Engineering Geology. Express Information of VIEMS, MG USSR]. 1972, no. 4. (In Russian)

22. Savich A.I., Rechitskiy V.I., Zamakhaev A.M., Pudov K.O. Kompleksnyye issledovaniya deformatsionnykh svoystv massiva doleritov v osnovanii betonnoy plotiny Boguchanskoj GES [Complex Investigations of Deformation Properties of Dolerite Masses in the Foundation of the Concrete Dam of Boguchanskaya HPP]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydrotechnical Construction]. 2011, no. 3, pp. 12—22. (In Russian)

23. Aniskin N.A., Tkhan' To V. Prognoz fil'tratsionnogo rezhima gruntovoy plotiny Yumaguzinskogo gidrouzla i ee osnovaniya [Prediction of Seepage Conditions of the Soil Dam of Yumaguzinskiy Hydroengineering Complex and its Foundation]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydrotechnical Construction]. 2005, no. 6, pp. 19—25. (In Russian)

24. Rasskazov L.N., Aniskin N.A., Bestuzheva A.S., Sainov M.P., Tolstikov V.V. Sangtudijskiy gidrouzel: napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie i fil'tratsiya v osnovanii plotiny i v obkhod gidrouzla [Sangtudijskiy Hydroengineering Complex: Stress-Strain State and Filtration in the Dam Foundation and Bypassing the Hydroengineering Complex]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydrotechnical Construction]. 2008, no. 5, pp. 45—58. (In Russian)

25. Rasskazov L.N., Aniskin N.A. Filtration Calculations for Hydraulic Structures and Foundation Beds. *Hydrotechnical Construction*. 2000, vol. 34, no. 11, pp. 525—530. DOI: <http://www.doi.org/10.1023/A:1017582706924>.

26. Wu J.L., He J. Determination of Volumetric Joint Count Based on 3D Fracture Network and Its Application in Engineering. *Applied Mechanics and Materials*. 2014, vols. 580—583, pp. 907—911. DOI: <http://www.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.580-583.907>.

27. Gudmundsson A., Lo Tveit I.F. Sills as Fractured Hydrocarbon Reservoirs: Examples and Models. *Geological Society Special Publication*. 2014, vol. 374 (1), pp. 251—271. DOI: <http://www.doi.org/10.1144/SP374.5>.

About the authors: **Chernyshev Sergey Nikolaevich** — Doctor of Geologo-Mineralogical Sciences, Professor, Department of Engineering Geology and Geoecology, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; +7 (499) 183-83-47, 9581148@list.ru;

Zommer Tat'yana Valentinovna — Lecturer, Department of Engineering Geology and Geoecology, head, Laboratory of Hydraulics, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ZommerTV@mgsu.ru;

Lavrusevich Andrey Aleksandrovich — Doctor of Geologo-Mineralogical Sciences, Professor, Department of Engineering Geology and Geoecology, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; +7 (499) 183-83-47; lavrusevich@yandex.ru.

For citation: Chernyshev S.N., Zommer T.V., Lavrusevich A.A. Opredelenie fil'tratsionnoy neodnorodnosti skal'nykh massivov osnovaniya gidrosooruzheniya metodom statisticheskogo analiza na primere Boguchanskoj GES [Statistical Analysis of Determining the Filtration Heterogeneity of Foundation Rock Mass of Hydraulic Structures on the Example of the Boguchanskaya HPP]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2016, no. 1, pp. 150—160. (In Russian)