

К ВОПРОСУ О ВЫПОЛНЕНИИ РАСЧЕТНЫХ ОЦЕНОК НЕОДНОРОДНОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК МАССИВОВ СКАЛЬНЫХ ПОРОД, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ЗАХОРОНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

К.С. Казаков

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (ИБРАЭ РАН),
Москва, Россия, e-mail: kks@ibrae.ac.ru

Аннотация: Вопросы безопасного захоронения радиоактивных отходов (РАО) являются одной из тех проблем, которая будет определять масштабы и динамику развития атомной отрасли в целом. На сегодняшний день мировым научным сообществом признано, что наиболее безопасным решением проблемы окончательной изоляции долгоживущих и высокоактивных РАО является их размещение в массивах горных пород на глубинах не менее 300–500 м. При этом критически важным аспектом в обосновании безопасности захоронения РАО является прогнозирование распространения радионуклидов в геологической среде. И наиболее вероятным механизмом возможного выхода радионуклидного загрязнителя за пределы захоронения является их перенос подземными водами по системам трещин в массиве скальных пород. Массивы скальных горных пород отличаются существенно большей анизотропией водопроводящих свойств по сравнению с пористыми средами, а также сверхмалыми значениями фильтрационных параметров, что усложняет процесс их оценки и создает дополнительные сложности для выполнения прогнозных гидрогеологических расчетов, выполняемых при обосновании долговременной безопасности глубинного захоронения отходов. Эти аргументы задают приоритет поиска решений для оценки водопроводящих характеристик скальных горных пород на участках планируемого размещения подземных исследовательских лабораторий (ПИЛ) пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО). Представлено описание расчетного метода определения тензора трещинной проницаемости и его компонент, позволяющего оценить неоднородность водопроводящих свойств трещиноватых участков скальных горных пород, используя в качестве исходных данных количественные параметры трещин, определенные по результатам комплекса каротажных исследований.

Ключевые слова: радиоактивные отходы, подземная исследовательская лаборатория, гидрогеологическая модель, каротажные обследования скважин, тензор проницаемости, трещиноватость скальных массивов, водопроводящие свойства, трещинная проницаемость.

Для цитирования: Казаков К. С. К вопросу о выполнении расчетных оценок неоднородности характеристик массивов скальных пород, предназначенных для захоронения радиоактивных отходов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 3. – С. 42–54. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_3_0_42.

Estimation of nonuniformity in characteristics of strong rock masses for radioactive waste disposal

K.S. Kazakov

Nuclear Safety Institute of Russian Academy of Science (IBRAE RAS), Moscow, Russia,
e-mail: kks@ibrae.ac.ru

Abstract: Safe disposal of radioactive waste is one of the challenging problems which define the scale and dynamics of the nuclear industry. Currently, the world scientific community has recognized that the safest solution to the problem of final isolation of high-level and long-lived radioactive waste is the waste disposal in rock mass at the depths not less than 300–500 m. In this case, as critical aspect of validation of radioactive waste disposal safety is prediction of radionuclides in geological environment. The most probable mechanism of potential egress a radioactive pollutant beyond the boundaries of its burial in strong rock masses is their transport with groundwater along the systems of fractures. Strong rock masses feature much higher anisotropy of the water-transmitting capabilities as compared with porous media, and super low values of permeability, which complicates its evaluation and adds up the difficulty of predictive hydrogeological calculations during validation of long-term safety of deep waste disposal. These arguments set the priority of finding methods for water transmissivity evaluation in strong rock masses, in the areas planned for the arrangement of underground research laboratories for deep radioactive waste disposals. This article describes a computational method to determine the fracture conductivity tensor and its components, which enables evaluating nonuniformity of water transmissivity in jointed areas of solid rock masses using the input data on the quantitative variables of cracks from a set of borehole logging measurements.

Key words: radioactive waste, underground research laboratory, hydrogeological model, borehole logging, permeability tensor, strong rock mass jointing, water transmissivity, crack conductivity.

For citation: Kazakov K. S. Estimation of nonuniformity in characteristics of strong rock masses for radioactive waste disposal. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(3):42–54. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_3_0_42.

Введение

В Российской Федерации начиная с 80-х годов XX в. осуществлялся поиск пригодных геологических формаций для создания ПГЗРО. По итогам выполненных работ наиболее перспективным признан массив скальных пород на участке Енисейский (Красноярский край).

Участок Енисейский сложен первично осадочными, вулканогенно-осадочными образованиями архейского возраста, метаморфизованными в условиях гранулитовой или высоких ступеней

амфиболитовой фации регионального метаморфизма. Дизъюнктивные структуры представлены зонами дробления и разрывами без смещения, в т.ч. на контактах петрографических разностей — мелкими единичными трещинами и образующими ими системами. Все они характеризуются прямолинейной или слабо извилистой формой, пересекают гнейсы и прорывающие их дайковые тела.

В части гидрогеологических условий в массиве выделяется три подразделения: горизонт четвертичных элювиально-

делювиальных отложений, трещинно-грунтовые воды зоны экзогенной трещиноватости и трещинно-жильные воды условно водонепроницаемой толщи скального массива на глубинах более 400 м. Питание трещинно-жильных подземных вод осуществляется за счет перетока из зоны экзогенной трещиноватости; уровни устанавливаются на глубинах от 0,5 до 90 м и различаются между собой иногда весьма значительно (до 80 м) на коротких расстояниях [1].

Гидрогеологическое моделирование является критически важным звеном при выполнении оценок долговременной безопасности захоронения РАО [2], а достоверность исходных данных формирует доверие к получаемым результатам. Для составления прогнозных гидрогеологических расчетов в настоящее время наиболее широко применяются модели пористых и трещиноватых сред [3]. При этом трещиноватые скальные массивы характеризуются существенно большей степенью анизотропии водопроводящих свойств, чем пористые среды, что осложняет проведение модельных оценок [4]. Трещиноватый коллектор является анизотропной средой, влечет за собой необходимость характеристики его фильтрационных свойств при помощи соответствующего тензора [5].

Методы

Большая часть методик скважинных опытно-фильтрационных исследований (прямые методы) позволяют получить количественную оценку параметров проницаемости горных пород по разрезу без учета неравномерности их распределения относительно сторон света. Помимо прямых методов существуют также и расчетные методы оценки неоднородности водопроводящих свойств скальных пород, базирующиеся на применении количественных характеристик, включая пространственное положение систем и

единичных трещин. В их число входит метод определения тензора трещинной проницаемости, а также его компонент [4, 5]. «Тензор проницаемости» впервые был предложен Дж. Феррандоном в середине XX в. [6] как характеристика неоднородности фильтрационных параметров горных пород.

Исходными данными для вычисления тензора трещинной проницаемости являются следующие количественные характеристики трещин: азимуты падения и простираания, угол падения, раскрытие. Подходы к вычислению тензора проницаемости описаны в ряде научных публикаций, изданных в течение последних нескольких десятилетий [7–12]. Необходимые количественные параметры трещин возможно получить с помощью видеокаротажных методов [13] либо соответствующих исследований ориентированного керна. Предположения о возможном участии выявленных трещин в подземных гидродинамических процессах могут быть сформированы по итогам геофизических исследований скважин (ГИС) с применением акустических, радиоизотопных методов [14, 15] и последующей верификацией результатов в ходе поинтервальных опытно-фильтрационных работ [5].

В сети скважин участка Енисейский был выполнен комплекс исследований, включающий: ГИС [16], видеокаротажные обследования открытых стволов [17], опытно-фильтрационные исследования. По итогам видеокаротажных обследований были уточнены параметры трещин, определены их пространственные положения, величины раскрытия и оценены параметры, характеризующие концентрацию трещин на различных глубинных отметках стволов. Полученные количественные характеристики трещин, используемые как исходные данные, позволили вычислить значения тензора проницаемости и его компонент. Пред-

положение о задействовании выявленных трещин в незакрепленных участках стволов обследованных скважин в подземных гидродинамических процессах было сформировано по итогам сравнения характеристик геофизических полей на непроницаемых интервалах и на подтвержденных опытно-фильтрационными исследованиями водопроницаемых интервалах ствола скважины Р-8.

Для вычисления тензора трещинной проницаемости в потенциально водопроницаемых трещиноватых интервалах стволов был применен подход, предложенный Е.С. Роммом, согласно которому модель трещиноватой горной породы представляет собой непроницаемый материал, рассеченный трещинами (системами трещин), каждая из которых характеризуется количественными значениями раскрытия и пространственной ориентировкой. С использованием параметров трещин и данных по их пространственному положению можно количественно охарактеризовать неоднородность водопроницающих свойств трещиноватого интервала через величины коэффициента трещинной проницаемости (k_n). Коэффициент трещинной проницаемости в любом совпадающем с градиентом давления направлении оценивается из выражения (1) [4]. Неравномерность распределения значений k_n (м^2 , см^2 , мм^2), полученных с помощью выражения (1), может быть продемонстрирована как в виде диаграмм-эллипсов, так и объемных графиков — эллипсоидов трещинной проницаемости.

$$k_n = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^N b_i^3 \Gamma_i \left\{ 1 - \left[\sin \omega_i (\cos \delta_i \cos \beta - \sin \delta_i \cos \alpha) + \cos \omega_i \cos \gamma \right]^2 \right\}, \quad (1)$$

где ω_i и δ_i — угол и азимут падения системы трещин i -го номера соответственно; b_i — величина раскрытия трещин; α , β и γ — углы между вектором градиента давления, совпадающим с направлением, в котором измеряется k_n , и координатными осями X , Y , Z ; Γ_i — густота трещин.

Густота трещин Γ_i (ед./м) — характеристика интенсивности трещиноватости горных пород, в которых трещины распределены по определенным системам. Густота трещин характеризуется количеством трещин на единицу длины нормали к их плоскостям, секущих участок горной породы [4, 5]. Для каждого потенциально водопроницаемого интервала, выделенного по итогам комплекса каротажных обследований в скважинах Р-1, Р-3, Р-4, Р-5, 1-Е с использованием данных о параметрах трещин, определены значения k_n . При проведении расчетов использовано допущение, что потенциально водопроницаемыми являются трещины, не имеющие минерального заполнителя на интервалах глубин, в которых наблюдались совокупные аномалии количественных параметров волнового акустического каротажа (характеризующиеся низкими скоростями прохождения упругих волн, падением амплитуд волнового пакета и уменьшением амплитуд продольной и поперечных волн), а также пониженными значениями показателей гамма- и плотностного каротажа — идентичные тем, что были получены на подтвержденных по итогам опытно-фильтрационных исследований в водопроницаемых участках ствола скважины Р-8. Расчет значений k_n производился для каждой потенциально водопроницающей трещины в интервале, а не системы трещин в целом, при этом также были определены параметры густоты трещин Γ_i , характерные для каждого интервала.

Представленные на рис. 1 диаграммы отражают зависимость значений k_n от пространственного положения трещин и направления градиента давления относительно сторон света в горизонтальной плоскости.

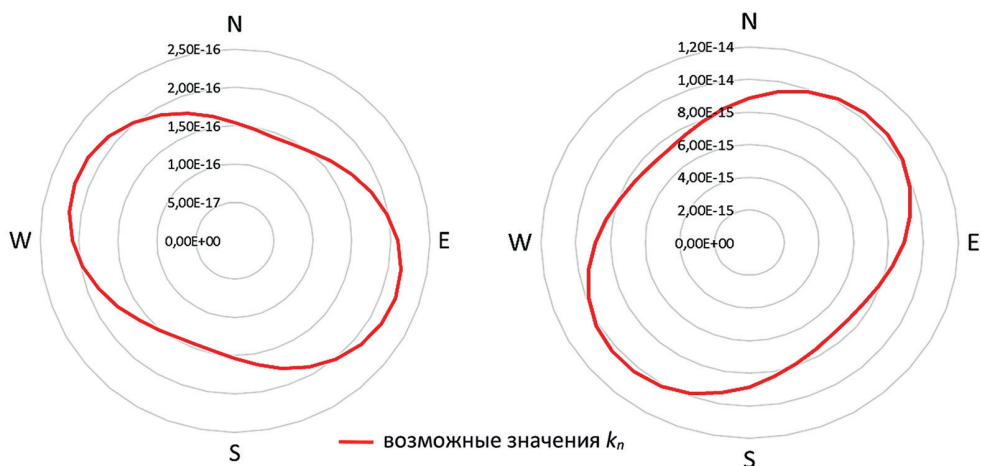


Рис. 1. Диаграммы трещинной проницаемости k_n (m^2) на потенциально водопроницающих интервалах стволов скважин: P-1, интервал 568,0–604,0 м (а); P-4, интервал 556,7–557,0 м (б)

Fig. 1. Permeability diagrams k_n (m^2) of the Investigational boreholes fractured intervals: P-1, depth interval 568,0–604,0 m (a); Investigational borehole P-4, depth interval 556,7–557,0 m (b)

Диаграммы (рис. 1) являются проекцией на горизонтальную плоскость эллипсоида трещинной проницаемости, отражающего объемную неоднородность значений k_n . Для более полного представления о неоднородности k_n , являющегося одним из показателей водопроницающих свойств трещиноватого скального массива, на рис. 2 представлены объемные графики значений (эллипсоиды) трещинной проницаемости k_n в выделенных трещиноватых интервалах.

Результаты

По результатам анализа приведенных на рис. 1, 2 диаграмм трещинной проницаемости (k_n) и статистических параметров положения трещин отмечено, что во всех выделенных водопроницающих интервалах скважин распределение значений k_n коррелирует с положением трещин. Пространственное положение трещины и ее раскрытие способны оказать существенное влияние на расчетное значение k_n , измеряемое в направлении, совпадающем с градиентом давления, что отчетливо заметно при сопоставлении данных, представленных на рис. 3.

Отмечено, что с увеличением протяженности интервала и плотности трещинной сети возрастает анизотропия значений k_n . Но вне зависимости от плотности трещинной сети и протяженности потенциально водопроницающих интервалов сохраняется возможность определения преобладающих направлений минимальных и максимальных значений k_n .

Обсуждение

Количественные параметры трещин, выявленные в ходе обследований стволов скважин на участке Енисейский, а также потенциальные направления движения подземной воды являются основой для оценки анизотропии фильтрационных характеристик значений трещинной проницаемости на потенциально водопроницающих интервалах сети скважин участка Енисейский. Принимая во внимание, что параметры трещинной сети в стволах скважин не являются исчерпывающими данными для формирования выводов о структурной неоднородности в целом по массиву, неравномерность значений k_n в потенциально водопроницающих интервалах позволяет оценить

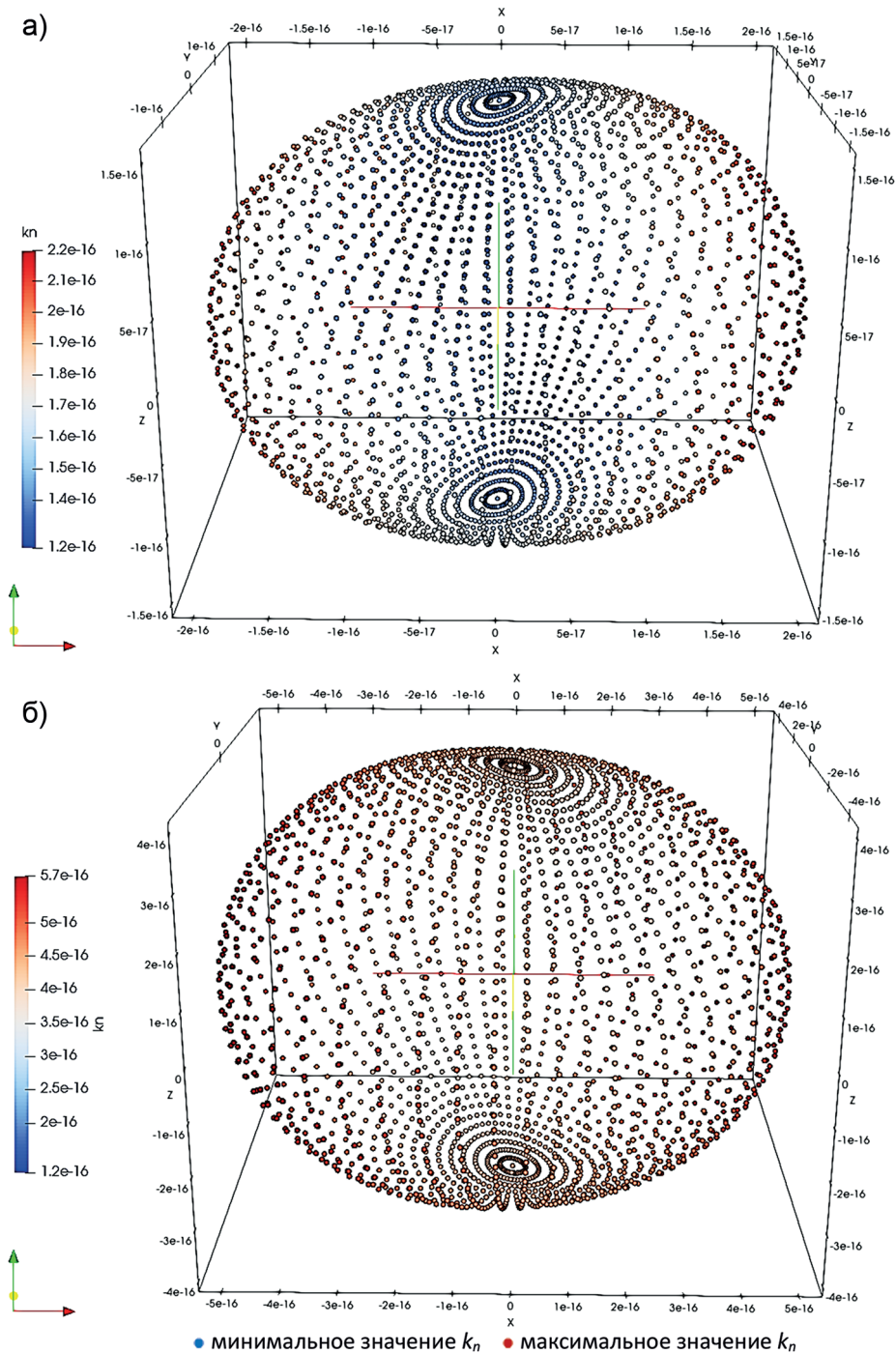


Рис. 2. Объемные графики значений k_n (m^2) для трещиноватых потенциально водопроводящих интервалов стволов скважин: P-1, интервал 568,0 – 604,0 м (а); P-4, интервал 56,7 – 557,0 м (б)

Fig. 2. Fracture permeability ellipsoids (k_n , m^2) of the fractured intervals in Investigational boreholes: P-1, depth interval 568,0 – 604,0 m (a); P-4, depth interval 556,7 – 557,0 m (b)

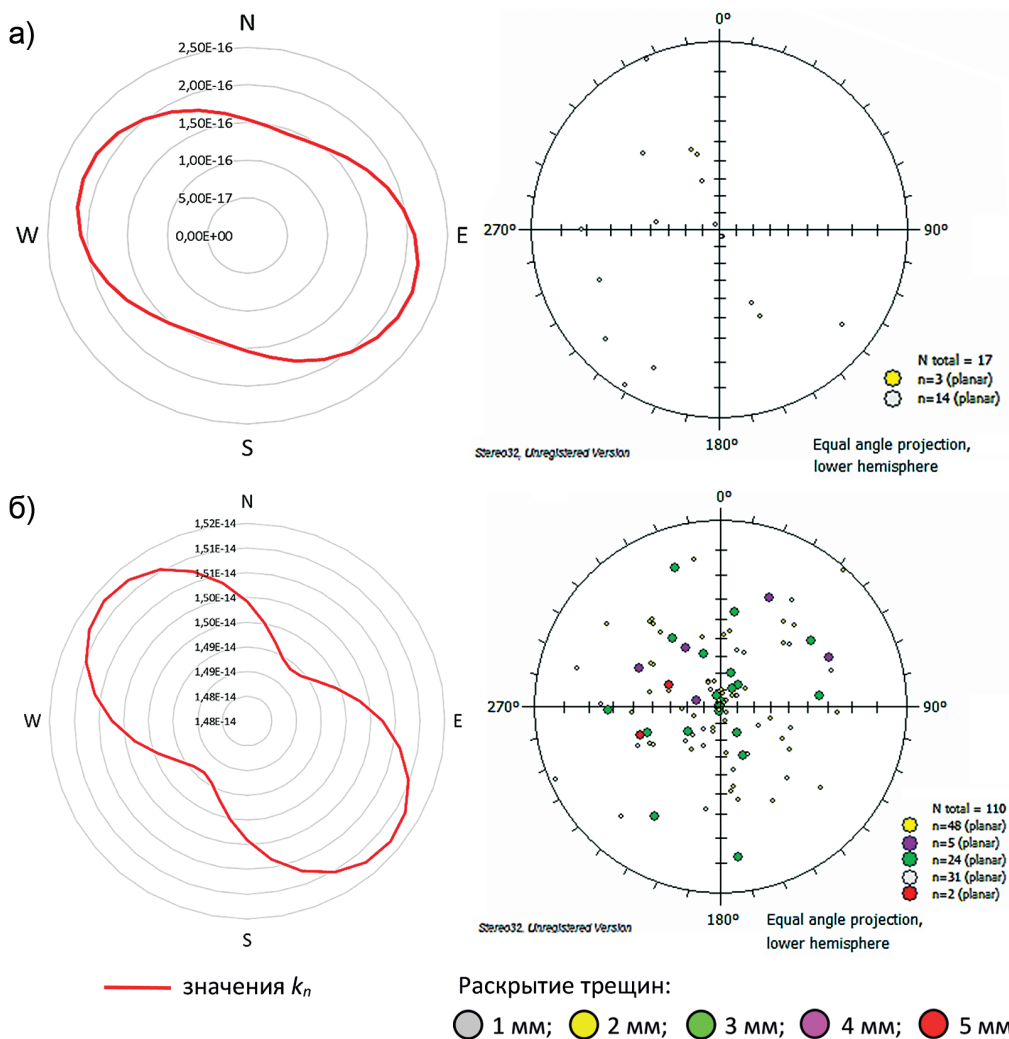


Рис. 3. Зависимость значений k_n от пространственного положения трещин и их раскрытия в потенциально водопроницаемых интервалах скважин: P-1, интервал: 568,0 – 604,0 м (а); 1-E, интервал 408,35 – 435,5 м (б)

Fig. 3. Relations between k_n , fractures orientations and apertures in the Investigational boreholes: P-1, interval 568,0 – 604,0 m (a); 1-E, interval 408,35 – 435,5 m (b)

значения коэффициента фильтрации k_ϕ (2), а также других характеристик проницаемости трещиноватых участков скальных пород, в частности: водопроницаемости T (3) и, при наличии дополнительных исходных данных, расхода воды Q (4) в водопроницающем интервале ствола скважины относительно направлений осей X, Y, Z .

$$k_\phi = k_n \frac{\gamma \cdot g}{\mu}, \quad (2)$$

где k_n – трещинная проницаемость (м^2); γ – плотность жидкости ($\text{кг}/\text{м}^3$); g – ускорение свободного падения ($\text{м}/\text{с}^2$); μ – динамическая вязкость жидкости ($\text{Па} \cdot \text{с}$).

$$T = k_\phi \cdot m, \quad (3)$$

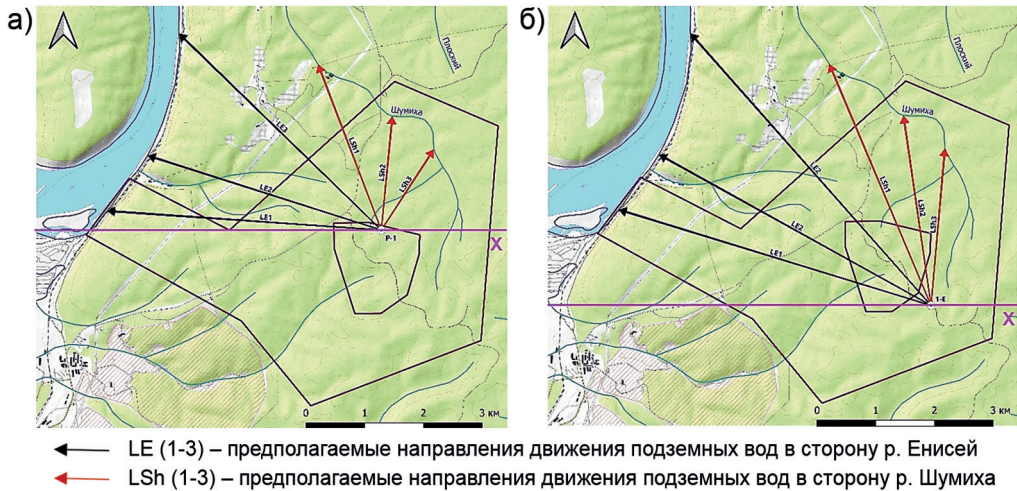


Рис. 4. Предполагаемые направления движений подземных вод в пределах участка Енисейский к зонам разгрузки от скважин P-1 (а) и 1-E (б)

Fig. 4. Expected groundwater flow directions from boreholes to discharge zones: P-1 (a) and 1-E (b)

где m – мощность водопроницающего трещиноватого интервала (м).

$$Q = k_{\phi} \frac{\Delta p F}{\mu l}, \quad (4)$$

где $\Delta p/l$ – градиент давления; F – площадь фильтрации.

Для определения закономерности распределения значений k_n в потенциально водопроницающих трещиноватых интервалах стволов скважин P-1, P-3, P-4, P-5, 1-E были заданы направления движения подземной воды от оси скважин до определенных модельными

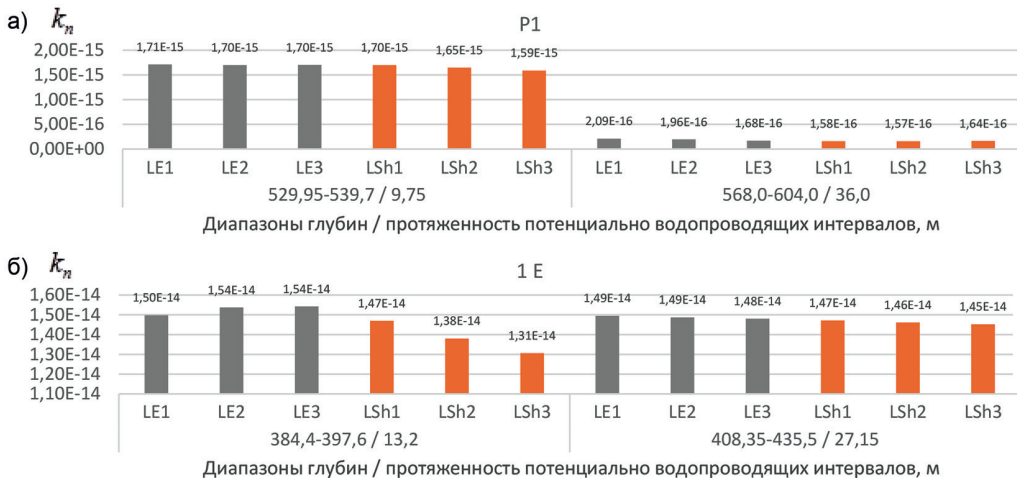


Рис. 5. Результаты оценки неравномерности распределения максимальных значений k_n на потенциально водопроницающих интервалах стволов скважин P-1, 1-E в зависимости от направлений векторов градиентов давлений, совпадающих с расчетными направлениями зон разгрузки подземных вод

Fig. 5. Results of assessing the maximum values k_n distribution in fractured intervals (The pressure gradient vector directions coinciding with the potential directions of groundwater flow to discharge zones). Boreholes: P-1, 1-E

расчетами зон разгрузки, а именно русел р. Енисей [18] и р. Шумиха [1]. На рис. 4 черными и красными стрелками показаны предполагаемые направления потоков подземных вод от скважины P-1 и 1-E до вероятных мест их разгрузки в направлениях к р. Енисей и р. Шумиха.

Длины векторов, определенные как кратчайшее расстояние между глубиной залегания потенциально водопроницающих интервалов в стволах скважин P-1, P-3, P-4, P-5, 1-E и предполагаемыми зонами разгрузки подземных вод, послужили основой для вычисления углов

векторов градиентов давлений между координатными осями X, Y, Z (α , β , γ). Далее с применением выражения (1) были вычислены значения k_n по каждому водопроницающему интервалу в направлениях LE (1-3) и LSh (1-3) (см. рис. 4).

Пример графической иллюстрации неравномерности распределения значений k_n в потенциально водопроницающем интервале ствола скважины представлен на рис. 5.

По итогам анализа полученных результатов (см. рис. 5) было установлено, что на различных глубинах, согласно

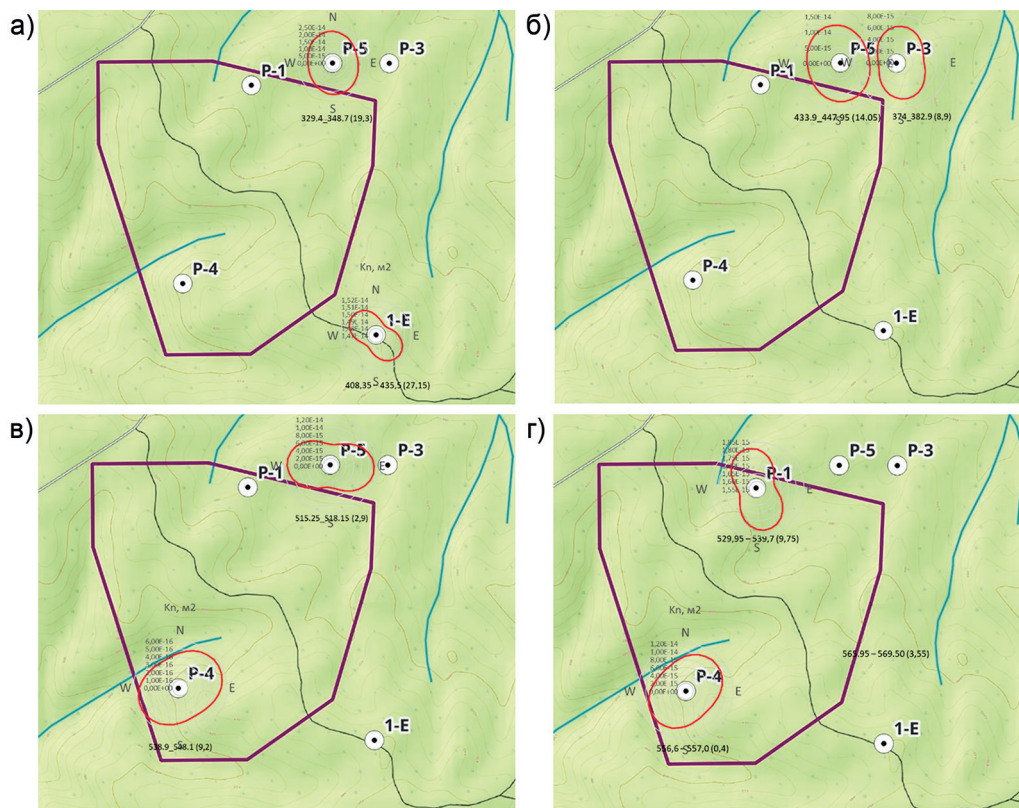


Рис. 6. Диаграммы трещинной проницаемости k_n (m^2) потенциально водопроницающих интервалов стволов скважин на схожих глубинах залегания (Балтийская система высот): интервал $+47,0 \text{ м} \div +3,0 \text{ м}$ (а); интервал $-24,0 \div -76,0 \text{ м}$ (б); интервал $-100,0 \div -145,0 \text{ м}$ (в); интервал $-150,0 \div -182,0 \text{ м}$ (г)

Fig. 6. Permeability diagrams k_n (m^2) in the fractured intervals, located at the similar depths (Baltic elevation system): interval $+47,0 \text{ m} \div +3,0 \text{ m}$ (a); interval $-24,0 \div -76,0 \text{ m}$ (b); interval: $-100,0 \div -145,0 \text{ m}$ (v); Interval $-150,0 \div -182,0 \text{ m}$ (g)

заданным расчетным направлениям векторов градиентов давлений, наблюдается неравномерное распределение минимальных и максимальных значений трещинной проницаемости k_n .

Отмечено, что с ростом глубины водопроводящего интервала наблюдается смена положения максимальных и минимальных значений трещинной проницаемости в направлениях расчетных зон разгрузки подземных вод (р. Шумиха и р. Енисей).

Вычисленные с помощью выражения (2) значения коэффициента фильтрации k_ϕ для потенциально водопроводящих интервалов находятся в диапазоне $6,3 \cdot 10^{-3}$ — $1,24 \cdot 10^{-4}$ м/сут, что соответствует значениям слабопроницаемых горных пород и совпадает с диапазоном значений k_ϕ , определенных по итогам обработки результатов скважинных опытно-фильтрационных исследований, выполненных в скважинах Р-1, Р-3, Р-4, Р-5, 1-Е, Р-8.

При этом, вне зависимости от направлений движения подземных вод (градиентов давлений), эллипсы, характеризующие возможные значения k_n для каждого водопроводящего интервала, могут быть ориентированы как в направлении р. Енисей, так и в направлении р. Шумиха.

Для наглядного представления данного вывода на схему расположения сети скважин участка Енисейский вынесены диаграммы значений трещинной проницаемости k_n (эллипсы красного цвета), составленные для соответствующих потенциально водопроводящих интервалов в стволах скважин (рис. 6). Как видно из диаграмм (эллипсы красного цвета на рис. 6), центры которых совмещены с положением осей стволов скважин, на схожих глубинных отметках положения (диапазоны глубин залегания потенциально водопроводящих интервалов представлены в Балтийской сис-

теме высот) наблюдается разнонаправленность возможных максимальных и минимальных значений k_n .

Заключение

В данной статье на примере потенциально водопроводящих трещиноватых участков массива скальных горных пород участка Енисейский представлено описание подхода к характеристике неоднородности их фильтрационных свойств с применением метода определения тензора трещинной проницаемости.

Вычисление компонент тензора трещинной проницаемости на основе количественных параметров трещинной сети, характерной для водопроводящего блока скальных горных пород, позволяет оценить неравномерность трещинной проницаемости и оценить объемную анизотропию значений коэффициента фильтрации и водопроводимости.

Исходными данными для вычисления компонент тензора трещинной проницаемости являются азимуты падения и залегания, а также углы падения и величины раскрытия трещин. Необходимые исходные данные могут быть получены по итогам обработки результатов видеокоротажных обследований стволов скважин, позволяющих получить количественные данные о пространственном положении трещин, либо определения вышеперечисленных показателей по ориентированному керну. В качестве исходных данных могут также использоваться количественные характеристики трещин и их пространственного положения, полученные по итогам замеров на породных обнажениях в горных выработках.

Предположение о взаимодействии трещин в подземных гидродинамических процессах должно быть подкреплено результатами косвенных методов оценки неоднородностей массива, а именно:

комплекса ГИС или геофизическими методами, выполняемыми на породных обнажениях в горных выработках. Для повышения достоверности расчетных фильтрационных характеристик массива и минимизации риска ошибочного отнесения выделенных трещиноватых участков к потенциально водопроницающим полученные расчетными методами результаты должны быть заверены данными поинтервальных опытно-фильтрационных исследований в незакрепленных участках скважин.

Результаты освещенных в данной статье исследований представляют практический интерес для прогнозного гидрогеологического моделирования с задействованием программных сред, аттестованных надзорными органами для практического применения при обосновании безопасности объектов использования атомной энергии [19]. Прогнозные гидрогеологические расчеты могут

быть выполнены в следующей последовательности:

- исследуемый массив скальных горных пород должен быть фрагментирован на блоки, в пределах которых параметры трещиноватости можно считать постоянными;
- для каждого блока должны быть определены компоненты тензора трещинной проницаемости и связанные с ним значения коэффициента фильтрации, а также должен быть определен коэффициент пористости горных пород;
- на основании полученных значений компонент тензора трещинной проницаемости должны быть выполнены оценки водопроницающих параметров для каждого из блоков и массива в целом.

Автор выражает признательность за помощь коллегам, друзьям, чей вклад в данную работу носил чисто технический характер.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Морозов О. А., Расторгуев А. В., Неуважаев Г. Д. Оценка состояния геологической среды участка Енисейский (Красноярский край) // Радиоактивные отходы. — 2019. — № 4(9). — С. 46—62. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-4-46-62.
2. Валетов Д. К., Неуважаев Г. Д., Свительман В. С. Разработка геофильтрационной модели для участка «Енисейский» и оптимизация ее параметров при помощи гибридного оптимизационного алгоритма // Известия РАН. Энергетика. — 2020. — № 1. — С. 128—137. DOI: 10.31857/S0002331019050170.
3. Григорьев Ф. В., Пленкин А. В., Капырин И. В. О необходимости учета конструкции пункта глубинного захоронения РАО при моделировании поступления радионуклидов в дальнюю зону // Радиоактивные отходы. — 2018. — № 3(4). — С. 95—101.
4. Ромм Е. С. Фильтрационные свойства трещиноватых пород. — М.: Недра, 1966. — 283 с.
5. Ромм Е. С. Структурные модели порового пространства горных пород. — Л.: Недра, 1985. — 240 с.
6. Ferrandon J. Les lois de l'écoulement de filtration // Genie Civil. 1948, vol. 125, no. 2, pp. 24—28.
7. He J., Chen S. H., Shahrour I. Numerical estimation and prediction of stressdependent permeability tensor for fractured rock masses // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2013, vol. 59, pp. 70—79. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2012.12.001.
8. Lei G., Dong P. C., Mo S. Y., Yang S., Wu Z. S., Gai S. H. Calculation of full permeability tensor for fractured anisotropic media // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. 2015, vol. 5, no. 2, pp. 167—176. DOI: 10.1007/s13202-014-0138-6.
9. Singhal B. B. S., Gupta R. P. Applied hydrogeology of fractured rocks, 2nd edition. Kluwer Academic Publishers (Springer), Dordrecht, Netherlands, 1999, 408 p.
10. Oda Y. Numerical experiments on permeability tensor and its application to jointed granite at stripa mine, Sweden // Journal of Geophysical Research. 1987, vol. 92, no. B8, pp. 8037—8048.

11. Zheng J., Wang X., Lü Q., Sun H., Guo J. A new determination method for the permeability tensor of fractured rock masses // *Journal of Hydrology*. 2020, vol. 585, article 124811. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.124811.
12. Miyakawa K., Tanaka K., Hirata Y., Kanauch M. Detection of hydraulic pathways in fractured rock masses and estimation of conductivity by a newly developed TV equipped flowmeter // *Engineering Geology*. 2000, vol. 56, no. 1-2, pp. 19–27.
13. Николенко П. В., Зайцев М. Г. Комплексный оптико-акустический каротаж приконтурного массива. Оборудование и физическое моделирование // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2023. – № 1. – С. 95–106. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_1_0_95.
14. Еникеев В. Н., Ташбулатов В. Д., Гайфуллин М. Я. Применение скважинных акустических методов для решения задач разработки месторождений твердых полезных ископаемых // *Каротажник*. – 2011. – № 5(203). – С. 224–237.
15. Симоненко Е. П., Долгирев С. С., Кириченко Ю. В. Возможности методов ГИС для изучения трещиноватости // *Георесурсы*. – 2018. – № 20(3). – Ч. 2. – С. 267–273. DOI: 10.18599/grs.2018.3.267-273.
16. Гупало В. С. Оценка долговременных изменений фильтрационных характеристик зоны техногенной и природной трещиноватости объектов подземной изоляции ВАО // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2017. – № 12. – С. 115–121. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-0-115-121.
17. Гупало В. С., Казаков К. С., Минаев В. А., Озерский Д. А., Устинов С. А., Нафигин И. О. Результаты исследований в существующих скважинах на участке недр «Енисейский», в т.ч. для определения основных систем трещин и анизотропии массива пород // *Радиоактивные отходы*. – 2021. – № 1 (14). – С. 76–86. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-1-76-86.
18. Румынин В. Г. Опыт изучения глинистых толщ и кристаллических массивов как геологических сред для окончательной изоляции РАО // *Радиоактивные отходы*. – 2017. – № 1(1). – С. 42–53.
19. Novikov K., Kapyrin I. Coupled surface–subsurface flow modelling using the GeRa software // *Lobachevskii Journal of Mathematics*. 2020, vol. 41, no. 4, pp. 538–551. DOI: 10.1134/S1995080220040162. **PLAB**

REFERENCES

1. Morozov O. A., Rastorguev A. V., Neuvazhaev G. D. Assessing the state of the geological environment at the Yeniseyskiy Site (Krasnoyarsk Region). *Radioactive waste*. 2019, no. 4(9), pp. 46–62. [In Russ]. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-4-46-62.
2. Valetov D. K., Neuvazhaev G. D., Svitelman V. S. Groundwater flow model development for the yeniseisky site and its parameters optimization using a hybrid optimization algorithm. *Izvestiya RAN. Energetics*. 2020, no. 1, pp. 128–137. [In Russ]. DOI: 10.31857/S0002331019050170.
3. Grigorev F. V., Plenkin A. V., Kapyrin I. V. To the necessity of taking into account the disposal's structure whilst far field waste input modeling. *Radioactive waste*. 2018, no. 3(4), pp. 95–101. [In Russ].
4. Romm E. S. *Fil'tratsionnye svoystva treshchinovatykh porod* [Fluid flow in fractured rocks], Moscow, Nedra, 1966, 283 p.
5. Romm E. S. *Strukturnye modeli porovogo prostranstva gornykh porod* [Structural models of porous media in geological massifs], Leningrad, Nedra, 1985, 240 p.
6. Ferrandon J. Les lois de l'écoulement de filtration. *Genie Civil*. 1948, vol. 125, no. 2, pp. 24–28.
7. He J., Chen S. H., Shahrour I. Numerical estimation and prediction of stressdependent permeability tensor for fractured rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2013, vol. 59, pp. 70–79. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2012.12.001.
8. Lei G., Dong P. C., Mo S. Y., Yang S., Wu Z. S., Gai S. H. Calculation of full permeability tensor for fractured anisotropic media. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2015, vol. 5, no. 2, pp. 167–176. DOI: 10.1007/s13202-014-0138-6.
9. Singhal B. B. S., Gupta R. P. *Applied hydrogeology of fractured rocks*, 2nd edition. Kluwer Academic Publishers (Springer), Dordrecht, Netherlands, 1999, 408 p.
10. Oda Y. Numerical experiments on permeability tensor and its application to jointed granite at stripa mine, Sweden. *Journal of Geophysical Research*. 1987, vol. 92, no. B8, pp. 8037–8048.

11. Zheng J., Wang X., Lü Q., Sun H., Guo J. A new determination method for the permeability tensor of fractured rock masses. *Journal of Hydrology*. 2020, vol. 585, article 124811. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.124811.
12. Miyakawa K., Tanaka K., Hirata Y., Kanauch M. Detection of hydraulic pathways in fractured rock masses and estimation of conductivity by a newly developed TV equipped flowmeter. *Engineering Geology*. 2000, vol. 56, no. 1-2, pp. 19–27.
13. Nikolenko P. V., Zaitsev M. G. Integrated acoustic and optical logging in adjacent rock mass. Equipment and physical modeling. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 1, pp. 95–106. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_1_0_95.
14. Enikeev B. N., Tashbulatov V. D., Gaifullin M. Ya. Application of borehole acoustic methods to solve problems in the development of solid mineral deposits. *Karotazhnik*. 2011, no. 5(203), pp. 224–237. [In Russ].
15. Simonenko E. P., Dolgirev S. S., Kirichenko Yu. V. The possibilities of well logging data methods for studying fractures. *Georesursy*. 2018, no. 20(3), part 2, pp. 267–273. [In Russ]. DOI: 10.18599/grs.2018.3.267-273.
16. Gupalo V. S. Assessment of long-term change in penetrability in the induced and natural jointing zone near underground high-active waste disposal. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2017, no. 12, pp. 115–121. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-0-115-121.
17. Gupalo V. S., Kazakov K. S., Minaev V. A., Ozerskiy D. A., Ustinov S. A., Nafigin I. O. Results of studies in the existing wells of the Yeniseyskiy subsurface site including those performed to identify the main fracture systems and rock anisotropy. *Radioactive waste*. 2021, no. 1 (14), pp. 76–86. [In Russ]. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-1-76-86.
18. Rumynin V. G. Experience of studying the clay masses and crystalline core-areas as geological environment for RW final isolation. *Radioactive waste*. 2017, no. 1(1), pp. 42–53. [In Russ].
19. Novikov K., Kapyrin I. Coupled surface–subsurface flow modelling using the GeRa software. *Lobachevskii Journal of Mathematics*. 2020, vol. 41, no. 4, pp. 538–551. [In Russ]. DOI: 10.1134/S1995080220040162.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Казakov Константин Сергеевич — заместитель заведующего лабораторией Методологии обоснования безопасности, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (ИБРАЭ РАН), e-mail: kks@ibrae.ac.ru, ORCID ID: 0000-0001-6755-0021.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

K.S. Kazakov, Deputy Chief of the Safety Justification Methodologies Laboratory, Nuclear Safety Institute of Russian Academy of Science (IBRAE RAS), 115191, Moscow, Russia, e-mail: kks@ibrae.ac.ru, ORCID ID: 0000-0001-6755-0021.

Получена редакцией 18.12.2023; получена после рецензии 29.01.2024; принята к печати 10.02.2024.
Received by the editors 18.12.2023; received after the review 29.01.2024; accepted for printing 10.02.2024.

