

Таблица 1

Характеристика степени трещиноватости флишевых пород
в зонах тектонических разломов и вне их
(применительно к вышеприведенному фрагменту трассы тоннеля)

Возраст	Название пород	Длина пробуренного интервала, м	Выход керна, м	Общая длина сохранных кусков керна, м	RQD, %	Общее число трещин на интервал, шт	Модуль трещиноватости M_j	Степень трещиноватости*
В зонах тектонических нарушений								
$K_{2,an}$	Флишевое переслаивание мергелей и песчаников	2,2	2,0	0,5	22,5	38	19,0	Очень сильно-трещиноватые
K_{2,nt^2}	Флишевое переслаивание мергелей, песчаников, известняка и аргиллита	4,5	4,5	0,6	13,3	20	4,4	Очень сильно-трещиноватые
K_{2,nt^1}	Флишевое переслаивание мергелей и песчаников	26,5	26,1	3,1	11,6	385	14,8	Очень сильно-трещиноватые
$K_{2,kr}$	Флишевое переслаивание мергелей и песчаников	9,0	9,0	1,3	14,1	157	17,4	Очень сильно-трещиноватые
	Флишевое переслаивание мергелей, песчаников и аргиллитов	9,0	9,0	0,7	7,9	240	26,7	Очень сильно-трещиноватые
Вне зон тектонических нарушений								
$K_{2,an}$	Флишевое переслаивание мергелей и песчаников	72,0	72,0	60,9	84,7	375	5,2	Слабо-трещиноватые
K_{2,nt^2}	Флишевое переслаивание мергелей,	274,5	274,3	221,2	80,6	1243	4,5	Слабо-трещиноватые
K_{2,nt^1}	песчаников, известняка и аргиллита	177,0	177,0	137,8	77,9	1108	6,2	Слабо-трещиноватые
$K_{2,kr}$	Флишевое переслаивание мергелей и песчаников	149,0	149,0	119,2	80,0	921	6,2	Слабо-трещиноватые
	Флишевое переслаивание мергелей, песчаников и аргиллитов	63,0	63,0	48,0	76,2	517	8,2	Слабо-трещиноватые

Примечание: при оценке степени трещиноватости за основу был принят показатель RQD.

В соответствии с указанной классификацией сотрудниками кафедры гидрогеологии и инженерной геологии Санкт-Петербургского горного университета была проведена сравнительная оценка степени трещиноватости вмещающих пород как в пределах зон тектонических нарушений, так и вне их (табл. 1).

Таблица 2

Полученные величины водопритока
в пределах выделенного фрагмента трассы тоннеля

Возраст	Название пород	Радиус депрессии r_d , м	Средняя глубина фильтрационного потока h , м	Напор над линией тоннеля S , м	Коэффициент Φ	Водоприток на 100-й интервал, $m^3/сут$
В зонах тектонических нарушений						
K_{2an}	Флишевое переслаивание мергелей и песчаников	956,5	103,1	73,8	10,2	223,1
K_{2nt}^2	Флишевое переслаивание мергелей, песчаников, известняка и аргиллита	975,4	100,1	75,8	10,3	219,9
K_{2nt}^1	Флишевое переслаивание мергелей и песчаников	871,8	95,1	69,8	9,3	214,3
K_{2kr}	Флишевое переслаивание мергелей и песчаников	1003,3	108,1	75,8	10,7	228,4
	Флишевое переслаивание мергелей, песчаников и аргиллитов					
Вне зон тектонических нарушений						
K_{2an}	Флишевое переслаивание мергелей и песчаников	786,5	114,1	71,8	8,7	187,5
K_{2nt}^2	Флишевое переслаивание мергелей, песчаников, известняка и аргиллита	767,8	111,6	70,8	8,5	185,5
K_{2nt}^1	Флишевое переслаивание мергелей, известняка и аргиллита	762,5	109,6	70,8	8,4	184,1
K_{2kr}	Флишевое переслаивание мергелей и песчаников	683,9	85,1	69,8	7,2	163,8
K_{2kr}	Флишевое переслаивание мергелей, песчаников и аргиллитов	680,8	78,1	59,8	7,2	194,0

В соответствии с данными табл. 1 по показателю качества керна RQD вмещающие породы в пределах зон тектонических нарушений характеризовались как очень сильно-трещиноватые, вне указанных зон – как сла-

ботрещиноватые. Особенностью указанной трещиноватости, выявленной в полевых условиях, являлось наличие систем трещин северо-западного и северо-восточного простирания, связанных с региональными раз-

ломами и осложненных более мелкой трещиноватостью разной направленности.

Интенсивная степень дезинтеграции вмещающих пород послужила фактором формирования в них грунтового водоносного горизонта верхнемеловых отложений, уровень которого расположен выше проектных отметок тоннеля и варьирует от 1,0 м до 76,0 м. Для оценки влияния подземных вод на производство горнопроходческих работ выполнен расчет возможного водопритока в проектируемый тоннель [6–8]. На основе гидродинамической схемы, выбранной производственной организацией, сотрудниками Горного университета Санкт-Петербурга были выполнены расчеты с использованием формул (1), (2):

$$Q = \frac{k \cdot h \cdot S}{\Phi}, \quad (1)$$

где k – коэффициент фильтрации пород, м/сут; h – средняя глубина фильтрационного потока, м; S – напор воды над сводом тоннеля, м; Φ – коэффициент, рассчитываемый по формуле

$$\Phi = \frac{2h}{l \left[\frac{S}{r_d} + \frac{1}{\frac{r_d}{2y_1} + \frac{1}{\pi} \ln \frac{y_1}{\pi r_h}} \right]}, \quad (2)$$

где l – расчетная длина трассы тоннеля, м; r_d – радиус влияния воронки депрессии, м; r_h – радиус тоннеля, м; y_1 – мощность водоносного горизонта в рассчитываемом интервале, м;

Выполненные расчеты показали, что в пределах выделенного фрагмента трассы (рис. 1), величина водопритока в тоннель может варьировать от 163,8 до 228,4 м³/сут (табл. 2).

В соответствии с данными, приведенными в табл. 2, наибольшие значения водопритока были получены для пород в зонах тектонических нарушений, вне их – водоприток несколько ниже.

Наличие сильнотрещиноватых, обводненных пород, приуроченных к зонам тектонических нарушений, поставило под сомнение их устойчивость при проходке проектируемого тоннеля. Вполне вероятно, что при строительстве в указанных зонах возможно возникновение вывалообразования [9]. Для прогноза развития указанного процесса сотрудниками кафедры были прове-

дены расчеты с использованием формулы Н.С. Булычева [10]:

$$S = f \cdot \frac{K_M \cdot K_R \cdot K_W}{K_N \cdot K_t \cdot K_A \cdot K_\alpha}, \quad (3)$$

где S – эмпирический показатель устойчивости; f – коэффициент крепости пород по М.М. Протодьяконову; K_M и K_N – коэффициенты, учитывающие влияние степени трещиноватости пород и число систем трещин соответственно; K_R – коэффициент, зависящий от характера поверхности стенок; K_W – коэффициент, зависящий от увлажнения пород; K_t – коэффициент, оценивающий степень раскрытия незаполненных трещин; K_A и K_α – коэффициенты, зависящие от характера заполнителя трещин и от угла α между осью выработки и основным направлением трещины соответственно.

В зависимости от показателя устойчивости S породы по их предрасположенности к вывалообразованию делятся на пять групп: I – вполне устойчивые (> 70); II – устойчивые (5–70); III – средней устойчивости (1–5); IV – неустойчивые (1–0,05); V – весьма неустойчивые ($< 0,05$).

Результаты расчетов устойчивости пород к вывалообразованию приведены в табл. 3.

Из табл. 3 видно, что в пределах зон тектонических нарушений показатель S изменялся от 0,05 до 0,64 (неустойчивые породы), вне – от 0,5 (неустойчивые) до 1,2 (средней устойчивости). Наличие неустойчивых пород вне зон тектонических разломов можно объяснить их высокой обводненностью безнапорными водами верхнемелового горизонта.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты оценки трещиноватости флишевых пород, величин возможного водопритока, а также устойчивости вмещающей толщ к вывалообразованию были использованы в качестве основных критериев для создания схемы инженерно-геологического зонирования трассы тоннеля, основная цель которой – правильность выбора типа проходки и технологии производства работ [11]. Всего по трассе тоннеля были выделены три зоны по степени благоприятности осуществления горнопроходческих работ (табл. 4).

Согласно критериям, представленным в табл. 4, было выполнено инженерно-геологическое зонирование трассы на примере фрагмента проектируемого тоннеля (рис. 2).

Стоит отметить, что в соответствии со схемой инженерно-геологического зонирования основная часть выделенного фрагмента состояла из неблагоприятных и весьма неблагоприятных зон [12].

Применительно ко всей трассе проектируемого тоннеля общая протяженность таких зон составила более 3,5 км (свыше 80% от общей протяженности).

Таблица 3

Результаты расчетов устойчивости пород к вывалообразованию
в пределах выделенного фрагмента трассы

Возраст	Название пород	Коэффициент крепости f	Коэффициенты							Показатель S	Категория устойчивости
			K_M	K_N	K_R	K_W	K_t	K_A	K_a		
В зонах тектонических нарушений											
K_{2an}	Флишевое переслаивание мергелей и песчаников	4	0,5	6,0	0,5	0,8	1,0	1,0	1,0	0,13	Неустойчивые
K_{2nt^2}	Флишевое переслаивание мергелей, песчаников, известняка и аргиллита	5,8	2,5	6,0	0,5	0,8	1,0	1,0	1,5	0,64	Неустойчивые
K_{2nt^1}	Флишевое переслаивание мергелей и песчаников	5,4	0,5	6,0	0,5	0,8	1,0	1,0	1,0	0,18	Неустойчивые
K_{2kr}	Флишевое переслаивание мергелей и песчаников	3,0	0,5	6,0	0,5	0,8	1,0	1,0	1,5	0,07	Неустойчивые
	Флишевое переслаивание мергелей, песчаников и аргиллитов	3,0	0,5	6,0	0,5	0,8	1,0	1,0	2,0	0,05	Неустойчивые
Вне зон тектонических нарушений											
K_{2an}	Флишевое переслаивание мергелей и песчаников	4,0	4,5	6,0	0,5	0,8	1,0	1,0	1,0	1,2	Средней устойчивости
K_{2nt^2}	Флишевое переслаивание мергелей,	5,8	4,5	6,0	0,5	0,8	1,0	1,0	1,5	1,2	Средней устойчивости
K_{2nt^1}	песчаников, известняка и аргиллита	5,4	3,0	6,0	0,5	0,8	1,0	1,0	1,0	1,0	Средней устойчивости
K_{2kr}	Флишевое переслаивание мергелей и песчаников	3,0	3,0	6,0	0,5	0,8	1,0	1,0	1,0	0,6	Неустойчивые
K_{2kr}	Флишевое переслаивание мергелей, песчаников и аргиллитов	3,0	2,5	6,0	0,5	0,8	1,0	1,0	1,0	0,5	Неустойчивые

Таблица 4

Основные критерии инженерно-геологического зонирования
в пределах выбранного фрагмента трассы

Номер и название инженерно-геологической зоны	Основные критерии*			
	Наличие тектонических нарушений	Степень трещиноватости пород	Величина водопритока, м ³ /сут	Категория устойчивости пород
I – Благоприятная	Нет	Слаботрещиноватые	Менее 190	Средней устойчивости
II – Неблагоприятная	Нет	Слаботрещиноватые	190–200	Неустойчивые
III – Весьма неблагоприятная	Да	Очень сильнотрещиноватые	Более 200	Неустойчивые

Примечание: *при различии критериев в рамках одной зоны за основу принималась категория устойчивости пород.

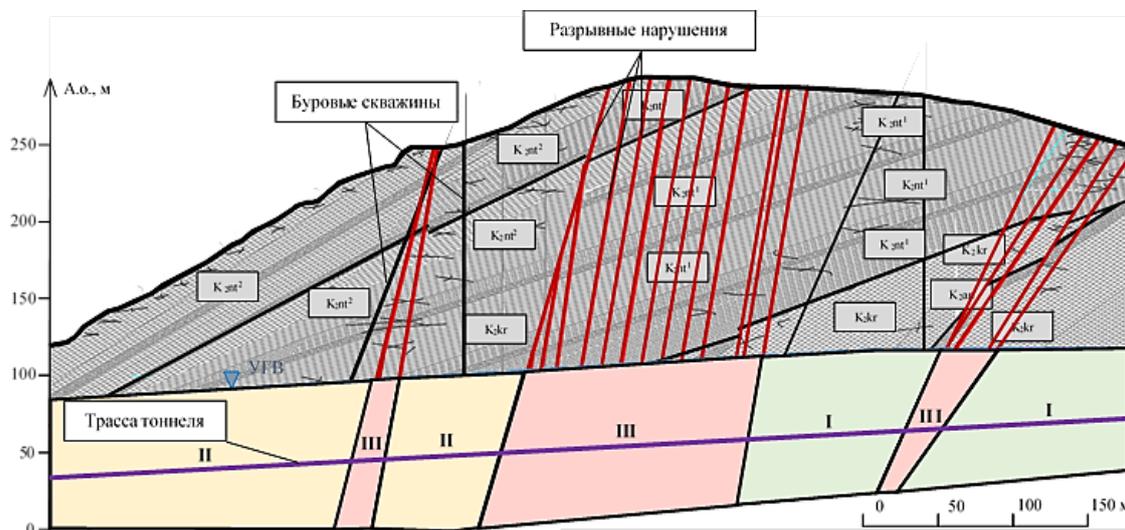


Рис. 2. Схема инженерно-геологического зонирования трассы проектируемого тоннеля (фрагмент).

Инженерно-геологические зоны:

I – благоприятная; II – неблагоприятная; III – весьма неблагоприятная

Выводы

На основе полученных результатов могут быть сделаны следующие выводы:

1. При проектировании тоннеля в сложных структурно-тектонических условиях необходимо учитывать сейсмичность рассматриваемой территории и особенности её геологического строения – формы залегания горных пород, наличие разрывных нарушений, подземных вод и др.

2. Проведению строительных работ по трассе проектируемого тоннеля должна предшествовать комплексная инженерно-геологическая оценка вмещающих пород. При этом особое внимание должно быть уделено изучению их трещиноватости, её влиянию на физико-механические свойства, ширину

раскрытия, наличие заполнителя и его характер, водообильность, а также возможность возникновения опасных инженерно-геологических процессов (вывалообразования и др.).

3. Результаты комплексной оценки пород по трассе тоннеля могут быть представлены в виде схемы инженерно-геологического зонирования, в основу которой должны быть заложены критерии, необходимые для выбора наиболее рационального типа проходки и безопасного производства строительных работ.

Список литературы

1. Palyanitsina A., Safullina E., Byazrov R., Podoprigena D., Alekseenko A. Environmentally Safe Technology to Increase Efficiency of High-Viscosity Oil Production for the Objects with Advanced Water Cut. Energies. 2022. No. 3. P. 753–753. DOI: 10.3390/en15030753.

2. Храпов В.Г., Демешко Е.А., Наумов С.Н. Тоннели и метрополитены: учебник для вузов. М.: Транспорт, 1989. 383 с.
3. Дашко Р.Э., Лохматиков Г.А. Верхнекотлинские глины Санкт-Петербургского региона как основание и среда уникальных сооружений: инженерно-геологический и геотехнический анализ // Записки Горного института. 2022. Т. 254. С. 180–190. DOI: 10.31897/PMI.2022.13.
4. Iakovleva E.V., Belova M.V., Soares A.O. Allocation of Potentially Environmentally Hazardous Sections on Pipelines. *Geosciences*. 2021. No. 11. P. 1–11. DOI: 10.3390/geosciences11010003.
5. Яковлева Э.В., Белова М.В., Попов А.Л. Прогноз развития опасных геодинамических процессов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. № 7. С. 360–369.
6. СП 103.13330.2012. Защита горных выработок от подземных и поверхностных вод. М.: Минрегион России, 2012. 61 с.
7. Golovina E.I. Problems of groundwater extraction from transboundary aquifers and complexes. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018. Vol. 4. No. 151. P. 1–8.
8. Golovina E.I., Pasternak S.N., Tsiglianu P.P., Tselishev N.A. Sustainable management of transboundary groundwater resources: Past and future. *Sustainability*. 2021. No. 13. P. 1–16. DOI: 10.3390/su132112102.
9. Дашко Р.Э., Романов И.С. Прогнозирование горно-геологических процессов на основе анализа подземного пространства рудника Купол как многокомпонентной системы (Чукотский автономный округ, Анадырский р-н) // Записки Горного института. 2021. Т. 247. С. 20–32. DOI: org/10.31897/PMI.2021.1.3.
10. Дашко Р.Э. Механика горных пород: учебник для вузов. М.: Недра, 1987. 264 с.
11. Dolzhikov V.V., Marinin M.A., Isheyskiy V.A. Method of calculation of strain wave field for the boreholes blasting considering the blasting direction *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2018. № 13. P. 217–223.
12. Васильева Н.В., Бойков А.В., Ерохина О.О., Трифонов А.Ю. Автоматизированная оцифровка круговых диаграмм // Записки Горного института. 2021. Т. 247. С. 82–87. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.9.