

ГЕОТЕХНОЛОГИЯ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ GEOTECHNOLOGY FOR DEVELOPMENT OF SOLID MINING FIELDS

УДК 624.131:551.3

Р.Э.ДАШКО, д-р геол.-минерал. наук, профессор, *regda2002@mail.ru*
П.В.КОТЮКОВ, канд. геол.-минерал. наук, ассистент, *pavel_spmi@mail.ru*
А.В.ШИДЛОВСКАЯ, канд. геол.-минерал. наук, доцент, *shidanna@bk.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург

R.E.DASHKO, Dr. in geol. & min. sc., professor, *regda2002@mail.ru*
P.V.KOTYUKOV, PhD. in geol. & min. sc., assistant lecturer, *pavel_spmi@mail.ru*
A.V.SHIDLOVSKAYA PhD. in geol. & min. sc., associate professor, *shidanna@bk.ru*
National Mineral Resources University (Mining University), Saint Petersburg

ВЛИЯНИЕ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА БЕЗОПАСНОСТЬ ОСВОЕНИЯ ПОДЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ

Выполнена оценка основных факторов надежности работы системы тоннель – подземная среда. Показано, что гидрогеологические условия имеют особое значение при строительстве и эксплуатации подземных сооружений в Санкт-Петербурге. Проанализировано гидродинамическое воздействие региональных и локальных водоносных горизонтов на развитие и активизацию таких процессов, как перетекание подземных вод, плывуны, прорывы напорных вод, деформации подземных сооружений. Установлено влияние гидрохимических условий на формирование агрессивности подземной среды по отношению к конструкционным и гидроизоляционным материалам подземных сооружений. Показано негативное воздействие деятельности подземной микробиоты на разрушение железобетонных и чугунных обделок.

Ключевые слова: подземные воды, грунты, горные породы, безопасность, освоение подземного пространства, строительство транспортных тоннелей, загрязнение подземных вод, плывуны, прорывы напорных вод, коррозия, биокоррозия.

HYDROGEOLOGICAL CONDITIONS EFFECT ON SAFETY OF UNDERGROUND SPACE EXPANSION DURING TRANSPORT TUNNEL CONSTRUCTION

The estimation of main factors which exerts influence upon functioning reliability of system «tunnels – underground space» is executed. It is shown that hydrogeological conditions have a special importance for construction and maintenance of subway tunnels in Saint-Petersburg. The hydrodynamic effect of regional and local water-bearing horizons on development and activation of different processes such as groundwaters flow, quicksands, head water inrush, underground constructions' deformation is analyzed. The influence of hydrochemical

conditions on formation of underground space aggressiveness to constructional and waterproofing materials of the tunnels is established. The negative effect of underground microbiota activity on degradation of reinforced concrete and cast-iron tunnel lining is shown.

Key words: groundwaters, soils, rocks, safety, underground space expansion, transport tunnels construction, groundwaters contamination, quicksands, head water inrush, corrosion, biocorrosion.

Подземные транспортные сооружения в Санкт-Петербурге, прежде всего перегонные и эскалаторные тоннели метрополитена, построены и эксплуатируются в сложных инженерно-геологических и гидрогеологических условиях подземного пространства города, при развитии ряда неблагоприятных процессов, вызванных действием различных природных и техногенных факторов, среди которых особое значение имеют специфика химического состава подземных вод и степень их контаминации (при участии микробиоты), формирование агрессивности вод по отношению к гидроизоляционным и конструкционным материалам тоннелей, газодинамические явления, а также особенности гидродинамического режима водоносных горизонтов и комплексов, влияющие на вертикальные перемещения тоннелей во времени и по длине трассы, и наличие трещиноватых глин. Систематизация факторов и их

взаимосвязь при анализе эксплуатационной надежности рассматриваемых сооружений приведены на рис. 1.

В разрезе Санкт-Петербурга известны и изучены пять водоносных горизонтов, оказывающих влияние на условия строительства и эксплуатации подземных транспортных сооружений метрополитена. В толще четвертичных отложений, где размещены эскалаторные тоннели и часть перегонных тоннелей неглубокого заложения, выделяют до трех водоносных горизонтов – это грунтовые воды, верхний межморенный (полустровский) и нижний межморенный водоносные горизонты, прослеживаемые в пределах разреза погребенных долин. В толще коренных пород, служащих средой размещения сети перегонных тоннелей глубокого заложения, подземных станций и вестибюлей метрополитена, выделяют нижнекотлинский (устаревшее название – гдовский) водоносный горизонт,

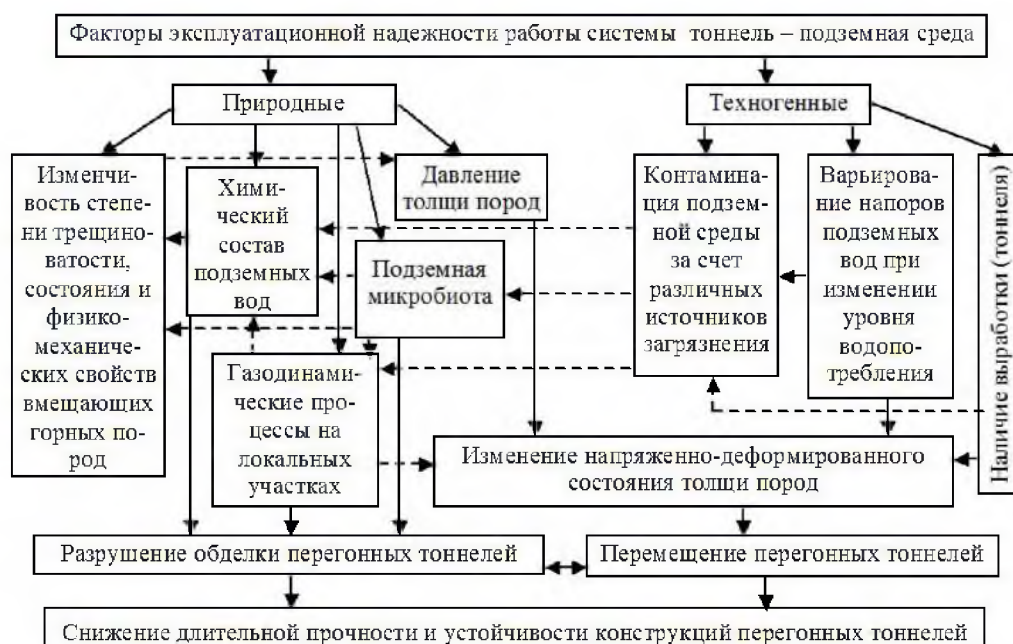


Рис. 1. Схема воздействия природных и техногенных факторов на эксплуатационную надежность работы системы транспортный тоннель – подземное пространство [2]

Химический анализ грунтовых вод в исторической части города (по данным [1])

Элементы анализа и их размерность	Петроградский остров	Казанский остров	Васильевский остров	Адмиралтейский остров	Безымянный остров (Александров-Невская лава)
Ca^{2+} , мг/дм ³	60,0	248,5	80,0	80,0	150,0
Mg^{2+} , мг/дм ³	26,4	126,5	51,6	43,2	116,4
$\text{K}^+ + \text{Na}^+$, мг/дм ³	1,17	301,3	0	434,7	7,09
NH_4^+ , мг/дм ³	0,29	1,5	0,52	1,39	125,0
SO_4^{2-} , мг/дм ³	55,0	38,4	53,0	24,6	176,0
Cl^- , мг/дм ³	40,0	775,6	35,0	709,6	40,0
HCO_3^- , мг/дм ³	255,1	811,5	378,2	366,0	1189,5
NO_3^- , мг/дм ³	25,5	сл	1,0	отс.	1,2
NO_2^- , мг/дм ³	0,06	сл	0,577	0,1	0,03
Минерализация, мг/дм ³	458,57	2303,3	601,5	1679,6	1804,65
Жесткость общая, мг-экв/дм ³	5,2	63,8	8,3	7,6	19,5
$\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+}$, мг/дм ³	1,05	0	1,6	20,0	1,66
Окисляемость перманганатная, мг O_2 /дм ³	14,1	Не опр.	16,0	112,2	35,2
ХПК, мг O_2 /дм ³	116,4	Не опр.	77,6	Не опр.	310,4
БПК ₅ , мг O_2 /дм ³	7,0	Не опр.	3,5	Не опр.	27,2
CO_2 агрес., мг/дм ³	6,6	15,4	11,0	отс.	59,4
Нефтепродукты, мг/дм ³	0,034	Не опр.	0,047	Не опр.	0,023
pH, ед. pH	7,84	7,16	7,22	7,23	6,89
Eh, mV	-39,2	Не опр.	-3,1	Не опр.	+10,8

входящий в состав вендского водоносного комплекса, и ломоносовский водоносный горизонт, приуроченный к ломоносовским песчанкам нижнего кембрия, которые появляются в разрезе на юге города в районе станций «Обухово», «Рыбацкое», «Автово» и южнее. Грунтовые воды и вендский водоносный комплекс распространены повсеместно, все остальные водоносные горизонты имеют локальное распространение. Таким образом, подземные транспортные сооружения метрополитена, в зависимости от глубины их заложения и расположения в пределах территории города, находятся в различных по сложности гидрогеологических условиях, что необходимо учитывать при решении вопросов обеспечения безопасности их функционирования.

Грунтовые воды приурочены к поздне- и послеледниковым отложениям различного генезиса, их уровень на территории Санкт-Петербурга отмечается на глубинах 1,5-3,0 м, реже больше. В исторической части города грунтовые воды характеризуются высокой степенью загрязнения за счет различных источников контаминации, в том числе утечек из систем водоотведения, миграции органических соединений из погребенных болот и за-

торфованных грунтов, а также жидкой фазы свалок хозяйственно-бытовых отходов, кладбищ и др. [3]. В химическом составе таких вод фиксируются повышенные содержания хлоридов, сульфатов, аммония, органических компонентов природного и техногенного генезиса, а также диоксида углерода. При этом минерализация вод часто превышает 1 г/дм³ (см. таблицу), а в отдельных случаях достигает 3-5 г/дм³, как, например, в промышленных районах на севере города, в северо-западной части Васильевского острова и др.

Присутствие органики в грунтовых водах предопределяет существование восстановительной обстановки, что отмечается по величине окислительно-восстановительного потенциала Eh, которая в ряде случаев снижается до -100 mV и менее, как например, в районе Заячьего острова. При наличии соединений серы и богатого биоценоза в грунтовых водах происходит биохимическая генерация сероводорода, который хорошо растворим в воде. Жизнедеятельность микроорганизмов сопровождается образованием диоксида углерода. Сероводород способствует подкислению вод, а образование CO_2 формирует углекислую агрессивность.

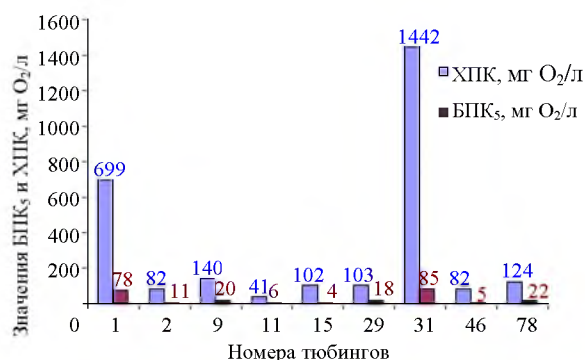


Рис.2. Изменение значений ХПК и БПК₅ водных вытяжек деградированных конструкционных материалов и натечных форм по протяженности эскалаторного тоннеля

Об агрессивности загрязненных грунтовых вод по отношению к конструкциям подземных транспортных сооружений можно судить по результатам обследования эскалаторного тоннеля станции «Площадь Александра Невского I» (2009), в ходе которого было зафиксировано растворение и выщелачивание гидроизоляционного слоя, сопровождающееся образованием различных натечных форм (высолов, сталактитов, наростов и др.) в местах стыков и на поверхности обделки, а также графитизация (расслоение) чугунных тюбингов со снижением их прочности и ростом проницаемости [1]. Анализ полученных данных показал, что содержание органических соединений биогенного и абиогенного характера (рис.2) и других компонентов (рис.3) в водных вытяжках* из разрушенных материалов коррелирует с химическим составом водоносных горизонтов в разрезе.

Тюбинги верхней части эскалаторного тоннеля находятся в зоне влияния наиболее загрязненных грунтовых вод за счет различных источников контаминации, в том числе утечек из регионального канализационного коллектора, проходящего в непосредственной близости от тоннеля, и миграции контаминантов в грунтовые воды в пределах площадей трех кладбищ Александро-Невской лавры и др. Максимальное содержание гидрокарбонатов и сульфатов натрия, а также величины ХПК и БПК₅ (тюбинг 31) четко увязывается с

положением регионального канализационного коллектора средней глубины заложения. Высокое содержание сульфатов (до 834 мг/дм³) в водных вытяжках свидетельствует о растворении и выщелачивании гипса и гидросульфата алюмината кальция в гидроизоляционном слое. Кроме того, ион SO_4^{2-} образуется за счет деятельности тионовых бактерий. Как показали микробиологические исследования, выполненные в СПбГУ под руководством д-ра биол. наук Д.Ю.Власова, в пробах разрушенных чугунов и бетонов из эскалаторного тоннеля станции «Площадь Александра Невского I» содержится более 40 видов микромицетов, относящихся к активным и особо активным деструкторам конструкционных материалов, численностью до 5800 КОЕ/г, а также актиномицеты, тионовые, нитрифицирующие и железобактерии численностью 10^5 - 10^6 КОЕ/г и более, что свидетельствует об активно протекающих процессах коррозии и биокоррозии. Наиболее высокое значение КОЕ зафиксировано в разрушенных тюбингах на глубинах, соответствующих заложению коллектора системы водоотведения.

С грунтовыми водами связано развитие таких процессов, как прорывы пливунгов в горные выработки, в том числе шахтные стволы, а также тиксотропия глинистых грунтов. Так, например, еще ранее при проходке перегонного тоннеля в толще четвертичных отложений юго-западной части Санкт-Петербурга (район станции «Авто-

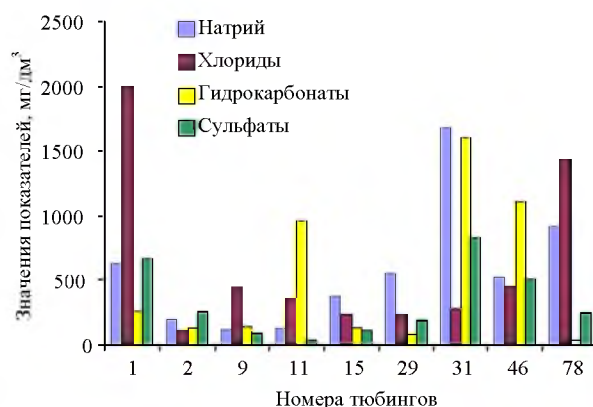


Рис.3. Химический состав водных вытяжек, приготовленных из корродированного чугуна и натечных форм, отобранных по всей протяженности эскалаторного тоннеля станции «Площадь Александра Невского I»

* Приготовление водных вытяжек проводилось согласно ГОСТ 27753.2-88.

во») отмечались прорывы плывунов из линз напорных вод в лужской морене, представленных мелко- и среднезернистыми песками. Следует отметить, что пески любого состава могут переходить в состояние истинных плывунов при их микробиотическом загрязнении и содержании бактериальной массы более 50 мкг/г. Сорбция микробных клеток и продуктов их метаболизма на поверхности песчаных частиц снимает трение между ними, а заполнение пор грунтов приводит к снижению коэффициента фильтрации до 10^{-3} - 10^{-4} м/сут и менее, что необходимо учитывать при прогнозе условий строительства и эксплуатации тоннелей. При биохимической генерации малорастворимых газов (CH_4 , N_2 , H_2) способность водонасыщенных песков переходить в плывунное состояние усиливается.

Водоупором между грунтовыми водами и нижележащими водоносными горизонтами служит глинистая морена лужского возраста, характеризующаяся неоднородным гранулометрическим составом и плотностью, что предопределяет варьирование ее водопроницаемости и существование «гидрогеологических окон», через которые наблюдается нисходящая фильтрация загрязненных вод при определенных гидродинамических условиях.

В настоящее время значительное влияние на напряженно-деформированное состояние вмещающей толщи верхнекотлинских глин верхнего венда, где проходит большая часть перегонных тоннелей метрополитена, оказывает напорный вендский водоносный комплекс (нижнекотлинский водоносный горизонт), который прослеживается в разрезе подземного пространства на всей территории города. Химический состав вод вендского комплекса характеризуется высоким содержанием хлоридов (от 2,0 до 2,9 г/дм³), ионов калия и натрия (от 1,2 до 1,7 г/дм³) и общей минерализацией от 3,5 до 5,0 г/дм³, что необходимо учитывать при оценке степени агрессивности этих вод, перетекающих под действием высоких градиентов напора через трещиноватые верхнекотлинские глины, по отношению к конструкционным и гидроизоляционным материалам

перегонных тоннелей. Следует подчеркнуть, что область питания вендского водоносного комплекса находится в районе Выборга на высоких абсолютных отметках по сравнению с уровнем грунтовых вод.

Необходимо отметить, что в практике проектирования подземных транспортных сооружений в Санкт-Петербурге к коренным глинам верхнего венда подходят как к абсолютным водоупорам, вместе с тем, по результатам исследований, проведенных в Горном университете, установлено, что толщу верхнекотлинских глин необходимо рассматривать как трещиновато-блочную среду, в которой фильтрация идет по трещинам с гораздо более высокой скоростью, чем сквозь слабопроницаемые глинистые блоки (Р.Э.Дашко, 1984). Трещиноватость литифицированных коренных глин сформировалась под действием тектонических и нетектонических факторов. Наибольшая степень дезинтеграции и проницаемости верхнекотлинских глин отмечается в зонах тектонических разломов, к которым приурочены палеодолины. В пределах тальвегов палеодолин значение коэффициента фильтрации нарушенной тектонической и нетектонической трещиноватостью глинистой толщи достигает 10^{-1} - 10^{-2} м/сут. О высокой проницаемости верхнекотлинских глин свидетельствуют многочисленные водопроявления (течи, капез, увлажнение и др.), которые наблюдаются в эксплуатируемых перегонных тоннелях Петербургского метрополитена, размещенных в этих отложениях.

Положение перегонных тоннелей в толще верхнекотлинских глин по глубине во многом определяется расстоянием от свода тоннеля до кровли глин, рельеф которой зависит от наличия в разрезе погребенных долин. Глубина вреза палеодолин в коренные породы варьирует в широких пределах от 15-20 м до 90 м. На участках глубоких врезов транспортные тоннели обычно проходят ниже подземного контура погребенной долины в непосредственной близости от вендского водоносного комплекса.

Вендский водоносный комплекс характеризуется нестабильным гидродинамическим режимом. В настоящее время его на-

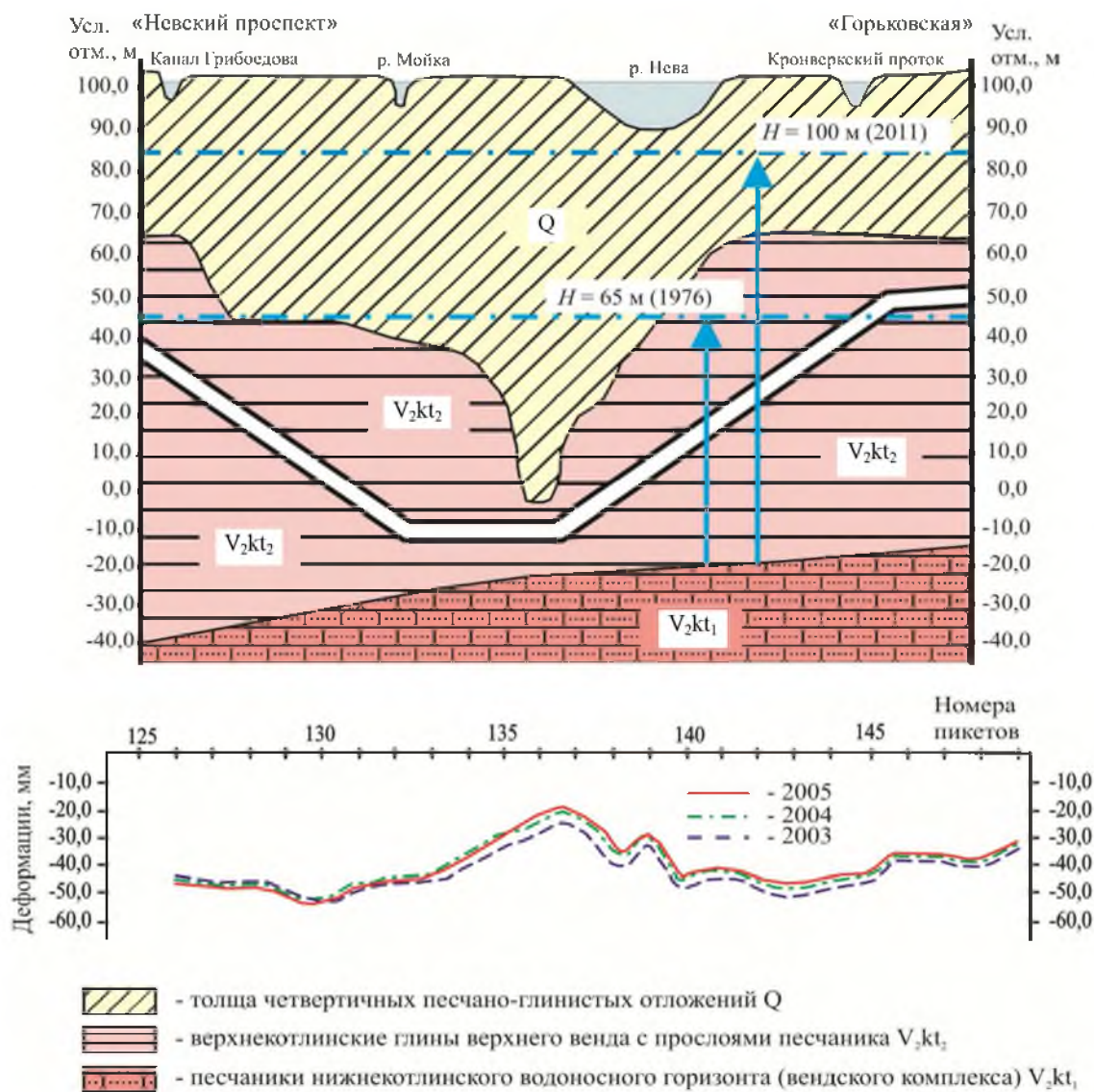


Рис.4. Схематический геолого-литологический разрез с элементами гидрогеологии и графиками развития перемещений тоннелей по трассе «Невский проспект» – «Горьковская»

поры в пределах города составляют 95-100 м и продолжают подниматься со скоростью 1,5-2,0 м в год. Фильтрующиеся по трещинам подземные воды оказывают взвешивающий эффект на верхнекотлинскую толщу и на расположенные в ней конструкции тоннелей. Такие тенденции можно проследить по характеру перемещений перегонных тоннелей одной из трасс Петербургского метрополитена (рис.4). Существенные снижения величины вертикальных перемещений тоннелей отчетливо прослеживаются в зоне тальвега, при их проложении на минимальном расстоянии от кровли напорного

вендского водоносного комплекса, где действуют наибольшие градиенты напора (свыше 9,0), определяющие величину гидродинамического давления при восходящем перетекании хлоридных натриевых вод через трещиноватую толщу водоупоров.

Рост градиентов напора способствует интенсификации восходящего перетекания вод вендского водоносного комплекса через трещиноватую толщу водоупора верхнекотлинских глин. Химический состав вод вендского комплекса агрессивен по отношению к различным гидроизоляционным и конструкционным материалам, в том числе желе-

зобетону и чугуны. Известно, что даже плотные бетоны при давлении более 3 атм становятся проницаемыми за счет диффузии ионов хлора и натрия.

Коррозия бетона и железобетона связана с разрушением структуры цементного камня, состоящего из гидросиликатов и гидроалюминатов кальция с образованием на поверхности конструкций натечных форм в виде сталактитов, наростов и высолов, что увеличивает проницаемость конструкции и снижает ее прочность. Анализы водных вытяжек разрушенных конструктивных материалов дали возможность убедиться в сложном характере природы их деградации: химические и физико-химические процессы протекают одновременно с биокоррозией. Установлено, что в пробах разрушенного бетона, отобранных с поверхности отделки некоторых перегонных тоннелей, проложенных ниже контура погребенных долин в зоне восходящего перетекания хлоридных натриевых вод вендского комплекса, содержание хлоридов может достигать $45,3 \text{ г/дм}^3$, а ионов натрия и калия – $28,9 \text{ г/дм}^3$ и более. В образцах сталактитов и других натечных форм содержание хлоридов повышается до $112,0 \text{ г/дм}^3$, а ионов натрия и калия – до $85,6\text{--}87,6 \text{ г/дм}^3$. Аномально высокие значения ХПК (до $17960 \text{ мг O}_2/\text{дм}^3$) и БПК₅ (до $9114 \text{ мг O}_2/\text{дм}^3$) в водных вытяжках, приготовленных из деградированного железобетона и чугуна отделок, служат доказательством активной микробной деятельности, вызывающей биокоррозию.

Микробиологические исследования показали, что видовой и родовой состав микроорганизмов-деструкторов довольно разнообразен. В деградированных материалах некоторых перегонных тоннелей под погребенными долинами обнаружено более 60 видов микромицетов численностью до 1400 колониеобразующих единиц (КОЕ), которые зафиксированы через несколько месяцев после ремонтных работ. Высокие значения КОЕ отмечаются в пределах участков перегонных тоннелей, где наблюдается наибольшая интенсивность водопроявлений [2].

Водоносные горизонты, распространенные локально, также оказывают негативное влияние на условия строительства и

эксплуатации подземных транспортных сооружений.

Верхний межморенный (полюстровский) водоносный горизонт развит в северо-восточной части Санкт-Петербурга, с ним связано Полюстровское месторождение минеральных вод. В результате прекращения эксплуатации полюстровских вод как минеральной пьезометрической поверхности горизонта начала подниматься и в настоящее время превышает уровень земной поверхности (напоры достигают 42–44 м), что приводит к восходящему перетеканию вод этого горизонта с образованием на поверхности земли грифонов, фиксируемых в районе ул. Ключевой. Влияние напоров верхнего межморенного водоносного горизонта необходимо учитывать при строительстве (проходке) котлованов и транспортных тоннелей в случае возникновения реальной угрозы прорывов напорных вод в выработки.

Необходимо отметить, что в районе распространения верхнего межморенного водоносного горизонта и Полюстровского месторождения подземных вод предполагается строительство Орловского тоннеля, часть которого пройдет под р. Большая Нева. По проекту на правом берегу реки предполагается строительство монтажной камеры диаметром 52 м и глубиной 58 м. Предварительные расчеты по формуле В.А.Мироненко – В.М.Шестакова показывают, что при заложении котлована под монтажно-щитовую камеру на глубину более 15,5 м существует высокая вероятность прорывов вод полюстровского горизонта. Предварительное снижение напоров горизонта приведет к формированию мульды оседания земной поверхности, в пределах которой размещается застроенная территория. Альтернативой могут служить только специальные методы проходки. Защитная конструкция «стена в грунте» не даст должного эффекта из-за наличия в разрезе слабых водонасыщенных грунтов и плавунцов, что будет вызывать эффект наплыва грунта.

Химический состав вод полюстровского горизонта изменился за счет подтока грунтовых вод при массовых водопонижениях, из-за

проводившихся строительных работ в этом районе в 70-80-х годах прошлого века. В настоящее время воды характеризуются как сульфатно-гидрокарбонатные кальциевые и натриевые с содержанием двухвалентного железа. Принимая во внимание, что в водах полостровского горизонта содержится богатая анаэробная микрофлора (Б.Л.Исаченко, 1962), следует ожидать активное развитие биокоррозии строительных материалов.

С нижним межморенным водоносным горизонтом, который приурочен к тонко- и мелкозернистым пылеватым пескам, часто обладающими плавунными свойствами, связаны наиболее крупные аварийные ситуации при строительстве и эксплуатации Петербургского метрополитена на участке трассы «Площадь Мужества» – «Лесная». Величина напора нижнего межморенного водоносного горизонта достигает 60 м.

Ломоносовский водоносный горизонт, распространенный в южной части Санкт-Петербурга, оказывает активное коррозионное воздействие на гидроизоляционный слой и обделку перегонных тоннелей, находящихся в зоне влияния этого горизонта. По химическому составу воды гидрокарбонатно-хлоридные натриевые слабоминерализованные (до 1,2-1,5 г/дм³), их напор составляет 20-30 м в пределах города.

Проектирование подземных транспортных сооружений глубокого заложения в Санкт-Петербурге должно сопровождаться прогнозированием гидродинамической ситуации, вызванной действием высоконапорных водоносных горизонтов, в том числе вендского водоносного комплекса. Особое внимание необходимо обращать на развитие перетекания минерализованных хлоридных натриевых вод, особенно под тальвегом погребенных долин. При этом следует учитывать снижение прочности тоннельной об-

делки при длительном воздействии минерализованных вод. При использовании конструкционных материалов, в том числе для гидроизоляции, а также проведения ремонтных работ необходима их проверка на биоустойчивость с учетом особенностей метаболизма тех микроорганизмов, которые характерны для исследованного участка подземной среды, принимая во внимание возможности ее контаминации в период эксплуатации тоннеля и изменение гидродинамического режима водоносных горизонтов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Власов Д.Ю. Воздействие геобиологических и гидрогеохимических процессов на развитие коррозии конструкционных материалов в эскалаторном тоннеле Петербургского метрополитена / Д.Ю.Власов, А.В.Шидловская, О.Ю.Александрова // Записки Горного института. СПб, 2011. Т.190.

2. Дашко Р.Э. Инженерно-геологическое обеспечение эксплуатационной надежности подземных транспортных сооружений в Санкт-Петербурге / Р.Э.Дашко, П.В.Котюков // Записки Горного института. СПб, 2011. Т.190.

3. Дашко Р.Э. Эволюция геоэкологического состояния подземного пространства Санкт-Петербурга / Р.Э.Дашко, Л.П.Норова, Е.С.Руденко // Разведка и охрана недр. 1998. № 7-8.

REFERENCES

1. Vlasov D.Yu. Geobiological and hydrogeochemical impact on underground escalator tunnel constructions determining intensification of corrosion material processes in Saint-Petersburg / D.Yu.Vlasov, A.V.Shidlovskaya, O.Yu.Alexandrova // The Proceedings of the Mining Institute. Saint Petersburg, 2011. Vol.190.

2. Dashko R.E. The engineering geological control of underground transport tunnels exploitation reliability in Saint-Petersburg / R.E.Dashko, P.V.Kotyukov // The Proceedings of the Mining Institute. Saint Petersburg, 2011. Vol. 190.

3. Dashko R.E. Evolution of geoecological conditions of Saint-Petersburg underground space / R.E.Dashko, L.P.Norova, E.S.Rudenko // Exploration and conservation of mineral resources. 1998. № 7-8.