

АНАЛИЗ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В ПОДЗЕМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА КАК ФАКТОРА БЕЗОПАСНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА И ДЛИТЕЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Земсков А.И. Email: Zemskov17102@scientifictext.ru

*Земсков Алексей Игоревич – аспирант,
кафедра гидрогеологии и инженерной геологии,
Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург*

Аннотация: в статье рассмотрены особенности инженерно-геологического и гидрогеологического строения территории Санкт-Петербурга. Особое внимание уделено характеристике гидродинамического режима и влиянию напорных водоносных горизонтов на различные подземные и наземные сооружения, описаны нежелательные последствия, связанные с воздействием подземных вод, отмечена важность изучения физико-химических условий и биохимии подземных вод, рассмотрены вопросы их восходящего перетекания в трещиноватых водоупорных толщах, даны рекомендации по комплексному подходу к оценке безопасности и устойчивости различных сооружений.

Ключевые слова: подземное пространство, водоносный горизонт, гидростатический напор, напряженно-деформированное состояние, восходящее перетекание, гидродинамический режим, вендский водоносный комплекс, межморенный водоносный горизонт, физико-химические условия подземных вод, коррозионная агрессивность, биокоррозия.

THE ASSESSMENT OF HYDROGEOLOGICAL CONDITIONS IN UNDERGROUND SPACE OF THE CITY OF SAINT-PETERSBURG FOR PROVIDING SAFETY CONSTRUCTION AND LONG-TERM STABILITY OF UNDERGROUND STRUCTURES

Zemskov A.I.

*Zemskov Aleksey Igorevich – PhD student,
HYDROGEOLOGY AND GEOLOGICAL ENGINEERING DEPARTMENT,
SAINT-PETERSBURG MINING UNIVERSITY, SAINT-PETERSBURG*

Abstract: features of geotechnical and hydrogeological conditions of Saint-Petersburg territory were analyzed in this paper. Special attention was given to characteristic of hydrodynamic regime and impact of confined aquifers to various subsurface and surface constructions. Undesirable consequences associated with impact of underground waters were described. Importance of chemical and biochemical underground water composition was noted. Deal with upflow filtration in aquicludes was concerned. Comprehensive approach recommendations were given to estimate safety and stability of various constructions.

Keywords: underground space, aquifer, hydrostatic thrust, stress-strained state, upflow infiltration, hydrodynamic regime, Vendian aquifer system, intermoraine aquifer, physical-chemical conditions of aquifers, corrosiveness, biocorrosion.

УДК [556.3+624.131]

1. Введение. В настоящее время, наряду со стремительным темпом развития технологического прогресса, ведется активное освоение и использование подземного пространства крупных городов и мегаполисов. Размещаются различные транспортные сооружения с глубиной заложения до 100 м и более, расширяются действующие и проектируются новые линии метрополитена, ведется строительство и эксплуатация различных инженерных коммуникаций, глубоких коллекторов, подземных паркингов и торговых центров, гражданских сооружений, растущих не только ввысь, но и вглубь до отметок минус 32 м от уровня дневной поверхности. Все это сопряжено с большой нагрузкой на подземное пространство города и определенными трудностями при строительстве. В Санкт-Петербурге, на сегодняшний день, накоплен достаточно большой опыт освоения и использования подземного пространства, как негативного, так и позитивного характера. Одной из причин нежелательных последствий освоения подземного пространства является некорректная оценка влияния особенностей гидрогеологических, инженерно-геологических и геоэкологических условий на условия строительства и эксплуатации различных зданий и инженерных сооружений, влекущая за собой некорректные проектные решения и отсутствие прогнозирования опасных процессов и явлений.

2. Гидрогеологические и инженерно-геологические особенности территории города. Подземное пространство Санкт-Петербурга отличается достаточно сложными инженерно-геологическими и гидрогеологическими условиями. Специфической особенностью разреза является наличие палеодолин, заложенных вдоль тектонических разломов и определяющих подземный рельеф коренных пород осадочной толщи: верхнекотлинских глин венда на большей части территории города (северная и центральная часть) и «синих» кембрийских глин нижнего кембрия (в его южной части). Глубина погребенных долин, заполненных четвертичными осадками различного генезиса, в самой нижней точке может достигать 40-120 м, ширина варьирует в пределах 1800-3500 м с достаточно небольшим углом наклона бортов порядка 2-18°. Вне погребенных долин отложения венда и кембрия залегают на глубине 15-25 м и перекрываются толщей отложений четвертичного возраста (Рис. 1).

Наличие в кристаллическом фундаменте систем региональных тектонических разломов северо-восточного, северо-западного и субширотного простирания, а также отдельные блоки более мелких разрывных нарушений также являются важной особенностью строения территории. Здесь необходимо отметить, что разломные зоны и трещины, унаследованные от пород кристаллического фундамента, прослеживаются в породах осадочной дочетвертичной толщи, сложенной плотными глинами и песчаниками, способствуя их дезинтеграции и снижению водоупорных свойств глин. Наличие тектонической трещиноватости в коренных глинах подтверждается различными исследованиями в подземных выработках Петербургского метрополитена и исследованиями интенсивности трещиноватости в карьерах нижнекембрийских глин в Ленинградской области [3].

Красное село

пос. Кузьмолowo

Условные обозначения:

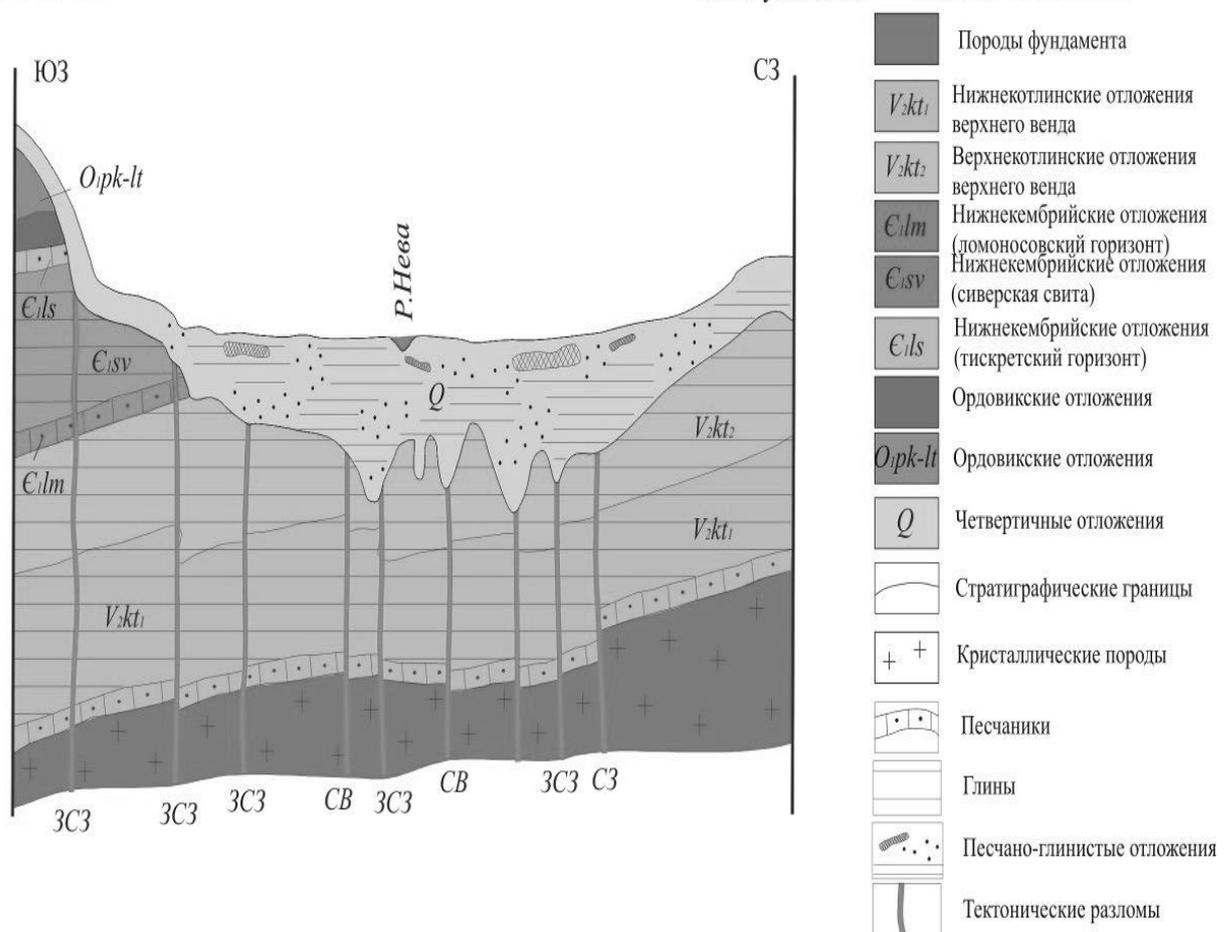


Рис. 1. Схематический геолого-литологический разрез Санкт-Петербурга с элементами тектоники (по Мельникову Е.К.) [3]

В гидрогеологическом отношении в пределах территории Санкт-Петербурга выделяется до 5 водоносных горизонтов и комплексов, приуроченных к трещиноватым песчаникам нижнекотлинского и ломоносоского горизонтов, а также разноразмерным пескам и супесям четвертичного возраста. Все водоносные горизонты и комплексы в разрезе города, кроме водоносного горизонта грунтовых вод, имеют напорный характер и разделены между собой толщей водоупорных и условно водоупорных пород, представленных глинистыми разностями.

В четвертичной толще прослеживается до 3-х водоносных горизонтов – напорные нижний межморенный (вологодско-московский), верхний межморенный (московско-осташковский или полостровский), а также безнапорный горизонт грунтовых вод поздне- и послеледниковых отложений.

Водоносный горизонт грунтовых вод является первым от поверхности, распространен на большей части территории города. Сложен песками тонко- и мелкозернистыми, супесями и торфяниками. Мощность горизонта 3-5 м и более. Уровненный режим грунтовых вод относится к природно-техногенному. На площади города воды горизонта повсеместно загрязнены (Таб. 1). На специфику химического состава оказывает влияние поступление вод из различных источников контаминации приповерхностной зоны, определяющих высокую степень техногенной нагрузки на подземную среду. Минерализация варьирует в широких пределах, достигая 3-5 г/дм³ и более в центральной части города и промышленных зонах. В водах отмечается повышенное содержание хлоридов, сульфатов, аммония, органических компонентов и растворенной углекислоты. Практически на всей территории города, воды имеют отрицательные значения окислительно-восстановительного потенциала, что указывает на восстановительные условия подземной среды. Поступление сточных вод вследствие утечек из инженерных сетей, наличие погребенных болотных отложений и благоприятные условия среды способствуют накоплению микробной массы в грунтах, что предопределяет их высокую биокоррозионную способность [2]. Воды грунтового водоносного горизонта чрезвычайно агрессивны по отношению к конструкционным материалам канализационных систем и фундаментов неглубокого заложения. Горизонт подстилается толщей относительно водоупорной осташковской морены, в которой часто встречаются линзы пылеватых песков, содержащих напорные воды, что создает риски прорыва пльвунов в горные выработки при проходке этих отложений.

Таблица 1. Химический состав и окислительно-восстановительный потенциал в грунтовых водах островной части Санкт-Петербурга под влиянием стоков [2]

Элементы	Адмиралтейский	Коломенский	Васильевский	Заячий	Петроградский	Безымянный
pH*	6,85-7,23	7,21-7,38	6,84-7,29	6,88-7,47	7,21-7,68	6,85-7,69
Eh, мВ*	(+68)-(-55)	(-61)-(-93)	(+63)-(-105)	(-68)-(-107)	(+85)-(+17)	(-61)-(-127)
NH ₄ ⁺ , мг/л	1,4-25,3	2,3-4,0	1,8-33,0	1,9-2,7	2,4-5,0	1,5-9,8
SO ₄ ²⁻ , мг/л	24,6-65,7	16,0-41,1	16,0-164,4	8,0-57,5	22,0-123,3	13,8-657,6
Cl ⁻ , мг/л	39,0-709,6	42,5-60,4	35,4-857,9	35,4-226,9	32,0-71,2	28,7-531,0
HCO ₃ ⁻ , мг/л	122,0-1384,5	463,6-573,4	244,0-1723,0	183,0-427,0	97,6-488,1	158,6-1220,0
Минерализация, мг/л	577,1-2484,5	895,2-723,6	449,1-2780,4	418,4-897,8	361,2-956,9	482,8-2725,5
Перманганатная окисляемость, мгО ₂ /л	24,7-112,2	25,6-112,0	13,2-80,0	16,6-64,0	14,8-80,0	19,0-144,0
СО ₂ агр., мг/л	17,6-24,2	до 2,2	до 48,8	2,2-13,2	2,2-22,0	2,2-103,4
Нефтепродукты, мг/л	0,14	0,12	0,04-0,92	0,12-0,26	0,07	0,08-0,91

Верхний межморенный московско-осташковский водоносный горизонт развит в северной и северо-восточной части города и приурочен к озерно-ледниковым и флювиогляциальным мелкозернистым и пылеватым пескам. Горизонт залегает между верхней осташковской и нижней московской моренами. Мощность водовмещающей толщи изменяется в пределах 0,3-33 м. Воды напорные, величина напора варьирует от 2 до 38 метров. Уровень подземных вод устанавливается на глубине 2-5 м и более. В настоящее время фиксируется подъем пьезометрической поверхности водоносного горизонта. На части территории города уровень фиксируется на отметках выше дневной поверхности. На большей части территории города воды пресные, гидрокарбонатные натриевые с минерализацией 0,1-0,5 г/дм³. Вода характеризуется повышенным содержанием двухвалентного железа, содержание которого в настоящее время достигает 60 мг/дм³. Напорные воды верхнего межморенного водоносного горизонта представляют потенциальную опасность с точки зрения подтопления на участках с высоким пьезометрическим уровнем и малой мощностью перекрывающей осташковской водоупорной толщи. В настоящее время фиксируется подъем пьезометрической поверхности водоносного горизонта. На части территории города (в районе Полустрово – ул. Ключевая, Антоновская, пр. Металлистов, Полустровский пр-т) уровень фиксируется на отметках выше дневной поверхности, где происходит разгрузка водоносного горизонта в виде родников («грифонов») (Рис. 2). Кроме того, в пределах таких участков, при производстве строительных работ, возможны прорывы вод в котлованы, образование

процессов восходящего перетекания напорных вод по сваям, затопление подвалов и деформации зданий [3, 4].



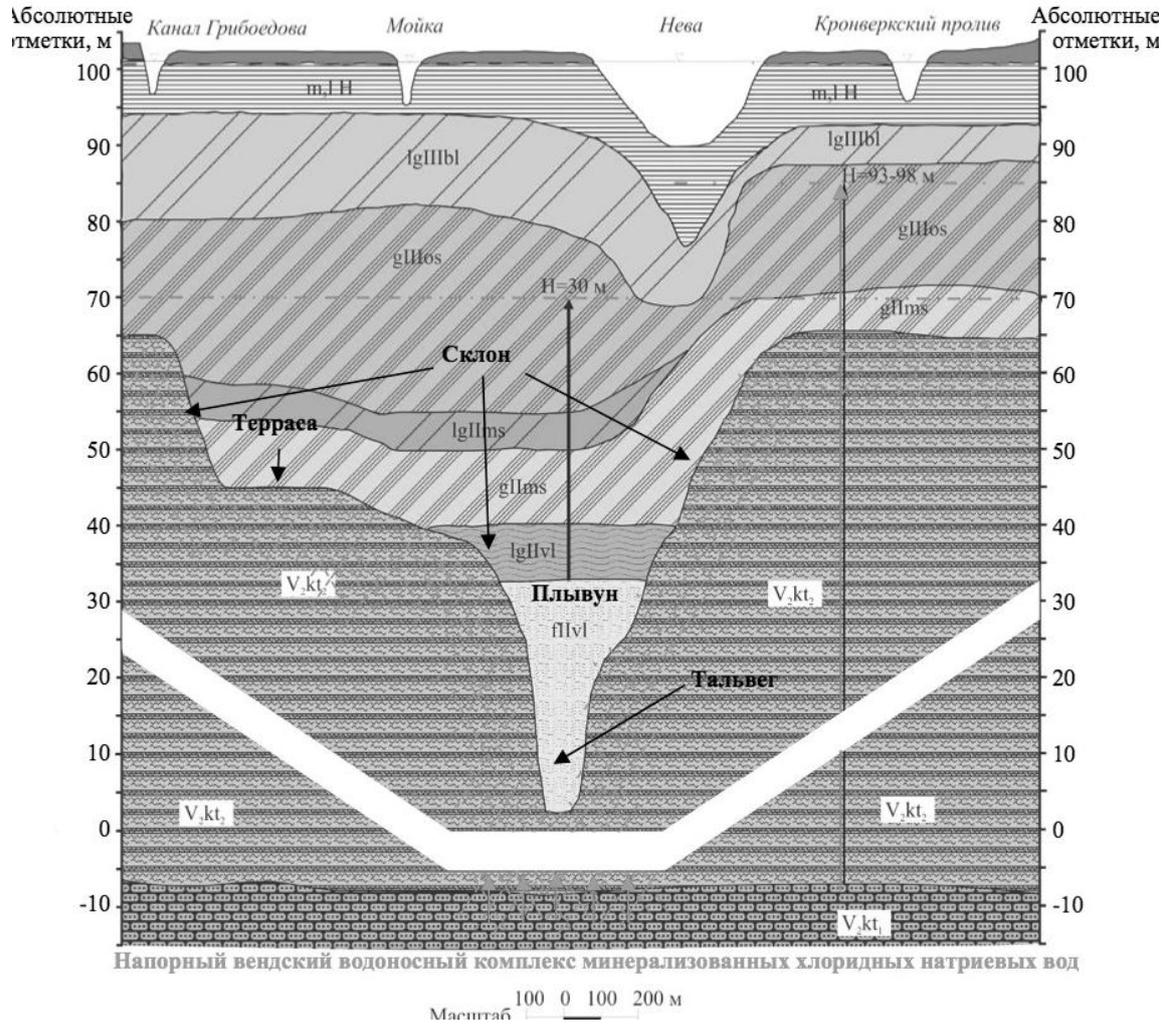
Рис. 2. Подтопление территории водами Полюстровского водоносного горизонта в районе Пр. Металлистов (слева) и ул. Антоновской (справа)

Нижний межморенный водоносный горизонт распространен в северной и южной частях территории города в толще, между днепровской и московской моренами. Представлен разнородными песками с включениями гравия и гальки, мощностью от 1-2 до 30-70 метров в погребенных долинах. Глубина залегания кровли комплекса составляет 40-60 метров, иногда достигая 70-80 метров. Воды высоконапорные, что имеет принципиальное значение для подземного строительства. Величина напора составляет 20-70 м. Пьезометрическая поверхность фиксируется на глубине 5-10 м. Часто среди водовмещающих отложений встречаются пески, обладающие пльвунными свойствами, что делает невозможным даже их частичное осушение. Проходка тоннелей при наличии в разрезе напорных вод данного водоносного комплекса должна вестись с применением проходческих щитов с гидропригрузом, т.к. метод замораживания грунтов не гарантирует устойчивость конструкций на этапе эксплуатации при оттаивании пород. В качестве примера неэффективности применения заморозки в грунтах можно упомянуть аварию 1974 года на участке перегонного тоннеля между станциями «Лесная – Пл. Мужества». Опыт проходки тоннелей Петербургского метрополитена в нижней межморенной толще показал сопряженность с рисками возникновения аварийных ситуаций, влекущих за собой колоссальные материальные потери. Считается, что химический состав обладает низкой степенью агрессивности по отношению к железобетонным конструкциям. Воды в основном гидрокарбонатные, хлоридно-гидрокарбонатные и сульфатно-гидрокарбонатные натриевые с минерализацией от 0,1 до 0,7 г/дм³.

Практически вся толща четвертичных отложений может рассматриваться как неустойчивая среда, что способствует оплыванию или прорыву водонасыщенных песчаных грунтов в подземные выработки при нарушении или неправильном выборе технологии ведения горных работ. Обоснование технологии ведения работ должно быть определено в соответствии с обязательным учетом наличия подземных вод, оценке их гидродинамического режима и коррозионной способности. Для безопасной проходки котлованов, тоннелей и шахтных стволов в зонах развития водоносных горизонтов необходимо иметь точные сведения о возможности прорывов напорных вод и пльвунов в горные выработки. Прорывы подземных вод через водоупорную глинистую толщу возникают под действием гидростатического давления и зависят от мощности и прочности водоупора, формы и размеров выработки, а также величины безопасного напора. Для предупреждения подобных явлений необходимо выполнение расчетов возможности прорывов с целью определения безопасной величины заглубления фундаментов или шахтных стволов, либо рекомендации по выполнению предварительного водопонижения. Здесь необходимо отметить, что в условиях плотной городской застройки, возможность осушения водоносных горизонтов исключается. В результате понижения уровня происходит снижение напоров и взвешивающего эффекта воды. Следствием этого является существенный рост эффективных напряжений в грунтах и их последующее уплотнение, что может приводить к значительным деформациям наземных и подземных сооружений, переводя их в предаварийное и/или аварийное состояние при наличии слабых отложений в основании. По результатам расчетов прорывов можно оконтурить зону безопасного проведения работ без устройства дренажных мероприятий, а также разработать рекомендации по предупреждению прорывов в период проходки горных выработок.

В Санкт-Петербурге, согласно общепринятому подходу, трассы глубоких перегонных тоннелей прокладываются в водоупорной толще верхнекотлинских глин, что, теоретически, должно гарантировать отсутствие непосредственного влияния высоконапорных вод нижележащего вендского (нижнекотлинского) водоносного комплекса. Однако, как было отмечено ранее, из-за высокой степени трещиноватости глин тектонической и нетектонической природы, верхнекотлинская толща не может

считаться абсолютным водоупором (Рис. 3). Вендский водоносный комплекс развит на всей территории Санкт-Петербурга и в настоящее время рассматривается как Петербургское месторождение минеральных вод. Его кровля прослеживается на абсолютных отметках от минус 100 м до минус 125 м в центральной части города, с плавным погружением на юго-восток. Водоносный комплекс представлен переслаиванием песчаников, алевролитов и глин суммарной мощностью 45-90 м. Водообильность комплекса зависит от мощности водовмещающей толщи песчаников. Удельные дебиты скважин составляют 1,2-2,5 л/с. Значения коэффициента фильтрации изменяется от 3 до 5 м/сут, возрастая в узлах тектонических разломов. Минерализация воды в пределах территории города изменяется от 3,5 до 5 г/дм³, а в зонах тектонических разломов может превышать 5-6 г/дм³ [3].



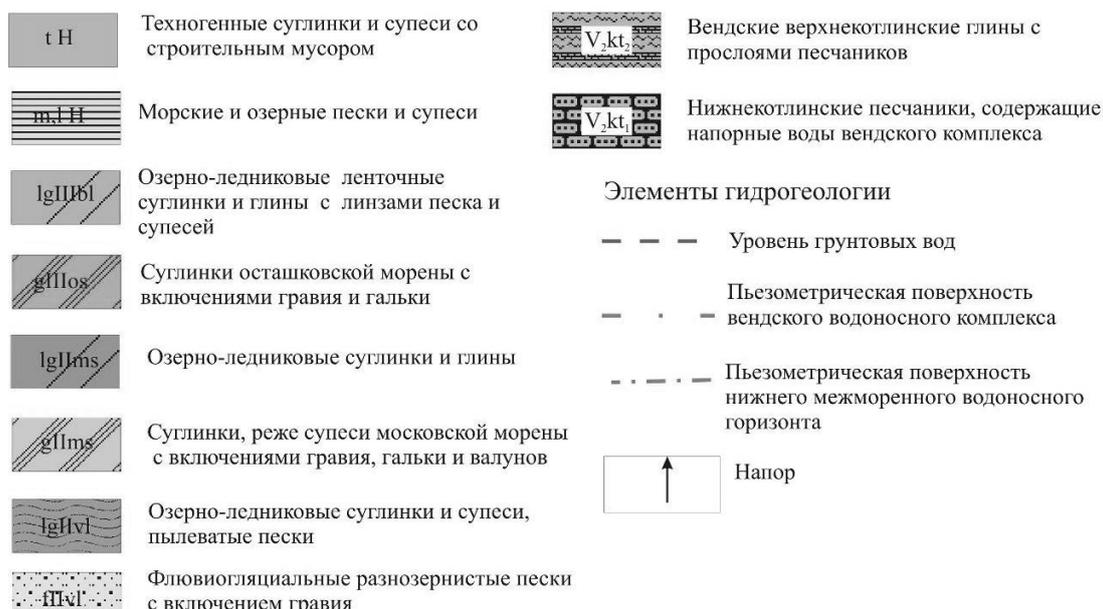


Рис.3. Схематический геолого-литологический разрез погребенной долины (с элементами гидрогеологии) [3].

Состав воды хлоридно-натриевый. Под воздействием градопромышленного комплекса в послевоенный период произошло существенное нарушение гидродинамического равновесия водоносного комплекса за счет активной эксплуатации подземных вод в Санкт-Петербурге, что способствовало развитию обширной пьезометрической депрессии. К 1977 году было зафиксировано максимальное снижение уровня до 70 метров при годовом водоотборе 32 тыс. м³/сут. С конца 80-х годов водоотбор сократился из-за введения ограничений на использование подземных вод комплекса. Пьезометрическая поверхность начала восстанавливаться и темп восстановления резко усилился после 1990 года. В настоящее время уровень подземных вод устанавливается на глубине 15-20 метров от земной поверхности и продолжает расти со скоростью, предположительно 1,5-2,0 метра в год. Таким образом, при сохранении такого темпа подъема, уровень достигнет дневной поверхности уже через 8-10 лет, а через 2-4 года сравняется с первоначальным естественным положением.

Такое повышение уровня негативно сказывается на наземных и подземных сооружениях, особенно перегонных тоннелях метрополитена и фундаментах глубокого заложения. Взвешивающий эффект, который оказывают напоры, изменяет напряженно-деформируемое состояние пород вышележащей толщи, увеличивает давление на тоннельную конструкцию. При подъеме пьезометрической поверхности взвешивающий эффект будет увеличиваться, что приведет к более интенсивному вертикальному перемещению тоннелей.

Наличие дезинтегрированности в коренных глинах, о чем упоминалось ранее, предопределяет повышение их проницаемости на несколько порядков, снижая их сопротивление сдвигу и увеличивая деформационную способность. Рост водопроницаемости верхнекотлинских глин приводит к возможности восходящего перетекания высоконапорных минерализованных вод нижнекотлинского водоносного комплекса. Особенно остро вопрос восходящей инфильтрации стоит в пределах тальвегов погребенных долин, под которыми проложены некоторые участки трасс метрополитена, где расстояние между кровлей водоносного комплекса и телом выработки перегонного тоннеля минимально и составляет 14-15 м. О высокой проницаемости глин свидетельствуют многочисленные водопоявления в эксплуатируемых перегонных тоннелях (течи, капез, увлажнение и др.). Отдельно следует отметить особенности химического состава подземных вод комплекса, которые характеризуются специфической агрессивностью по отношению к конструкционным материалам обделок, гидроизоляции тоннелей и другим материалам, в том числе чугуну. В подземных водах фиксируется высокое содержание хлоридов (от 2,0 до 2,9 г/дм³, а также ионов натрия и калия от 1,2 до 1,7 г/дм³). Известно, что даже плотные бетоны при давлении более 3 атм. (30 метров напора) становятся диффузионно проницаемыми для ионов хлора и натрия, приводя к разрушению структуры цементного камня, состоящего из гидросиликатов и гидроалюмосиликатов кальция. Постоянное увлажнение бетонных конструкций тоннелей минерализованными хлоридно-натриевыми водами будет способствовать деградации бетонов и их прогрессирующему разрушению. Кроме того, хлориды относятся к одним из самых сильных активаторов электрохимической коррозии металлов, даже в условиях высокой щелочности жидкой фазы бетона. Таким образом, учитывая благоприятные условия для накопления хлорид-ионов в поровых

пространства бетона, можно предположить, что стальная арматура также будет находиться под постоянным агрессивным воздействием критических концентраций хлоридов.

3. Заключение. Таким образом, на основании вышеперечисленного, к оценке влияния гидрогеологического фактора с точки зрения безопасности строительства и длительной устойчивости различных сооружений, необходимо подходить с учетом следующих трех позиций:

- анализа и оценки инженерно-геологических и гидрогеологических условий территории с учетом особенностей локального и регионального гидродинамического режима водоносных горизонтов, воздействия напорных вод на формирование напряженно-деформированного состояния толщи пород;
- выявления и прогнозирования нежелательных явлений, связанных с воздействием подземных вод при проектировании, строительстве и эксплуатации наземных и подземных сооружений;
- специфики химического и биохимического состава подземных вод и степени их агрессивности по отношению к различным конструкционным материалам, в том числе и биокоррозионной.

Однако, на сегодняшний день, в практике освоения и использования подземного пространства Санкт-Петербурга, такой комплексный подход к оценке влияния подземных вод при проектировании и строительстве различных наземных и подземных сооружений мало применяется.

Список литературы / References

1. ГОСТ 23732-2011. Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия. М, Стандартинформ, 2012.
2. Дашко Р.Э., Власов Д.Ю., Шидловская А.В. Геотехника и подземная микробиота. СПб. Институт «ПИ Геореконструкция», 2014. 279 с.
3. Дашко Р.Э., Александрова О.Ю., Котюков П.В. и др. Особенности инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга // Развитие городов и геотехническое строительство, выпуск № 1/2011. С. 1-34.
4. Дашко Р.Э., Жукова А.М. и др. Инженерная геология и геоэкология подземного пространства Санкт-Петербурга: проблемы его освоения и использования // Геология крупных городов. Материалы международной конференции. СПб, «Геоинформ», 2009. С. 18-19.
5. СП 28.13330.2012. Свод правил. Защита строительных конструкций от коррозии. М. Минрегион России, 2012.