

МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 624.131.1

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПОДХОДОВ К ОЦЕНКЕ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В СОСТАВЕ ИНЖЕНЕРНЫХ ИЗЫСКАНИЙ НА ТЕРРИТОРИЯХ МЕГАПОЛИСОВ (НА ПРИМЕРЕ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА)

© 2016 г. Р. Э. Дашко, Я. А. Карпова

ФГБОУ ВПО Национальный минерально-сырьевой университет “Горный”,
21-я линия, д.2, г. Санкт-Петербург, В.О., 199106 Россия. E-mail: regda2002@mail.ru

Поступила в редакцию 20.06.2015 г.

Подземное пространство городов рассматривается как динамичная многокомпонентная система, в составе которой присутствуют песчано-глинистые грунты, вмещающие подземные воды в различном состоянии, микробиоту, газы и подземные конструкции, несущие либо ограждающие (фундаменты, стены подвалов), или сооружения (тоннели различного назначения, хранилища опасных промышленных отходов). Особое внимание уделено значимости гидрогеологических исследований, прежде всего влиянию гидродинамических условий, физико-химической обстановки и химического состава водоносных горизонтов на грунты, напряженно-деформированное состояние толщи, деформации сооружений, формирование агрессивности подземной среды. Проанализированы факторы, определяющие компонентный состав подземных вод в пределах зон с различной степенью контаминации на территории мегаполиса. Представлены результаты исследований влияния различных водоносных горизонтов на условия строительства и эксплуатации наземных и подземных сооружений. Даны рекомендации по оценке гидрогеологических условий в составе инженерно-геологических исследований.

Ключевые слова: подземное пространство, песчано-глинистые грунты, безнапорные и напорные водоносные горизонты, химический состав вод, трещиновато-блочная среда, напряженно-деформированное состояние, коррозия и биокоррозия, устойчивость сооружений.

ВВЕДЕНИЕ

Освоение и использование подземного пространства городских инфраструктур позволяют решить многие социальные, экономические и экологические проблемы. При этом современное развитие городов должно проходить по сценариям, предполагающим ограничение прокладки инженерных коммуникаций, транспортных магистралей, хозяйственных помещений различного назначения, что будет способствовать существенному снижению материальных затрат (экстенсивный путь развития городов). Подземное пространство во многих странах мира рассматривается как природный ресурс, цивилизованное использование которого дает возможность сохранить архитектурно-исторический облик старинных городов в условиях внедрения современных технологий строительства, адекватных специфике инженерно-геологических условий подземной среды.

Необходимость освоения подземного пространства при возведении небоскребов по экономическим мотивам и соображениям устойчивости сооружений была предложена еще в конце XIX в. при застройке Манхэттена в Нью-Йорке. В середине 50-х годов XX в. французские урбанисты обосновали реальность городского строительства на семь этажей ниже земной поверхности [2].

В Ленинграде – Санкт-Петербурге освоение подземного пространства на глубину более 100 м связано со строительством перегонных тоннелей и подземных станций метрополитена, которые были пройдены в высоколитифицированных глинах верхнего венда, рассматриваемых при проектировании сооружений как надежная водоупорная толща. Мощность такого водоупора определяется положением вреза палеодолин, обычно трассируемых по направлению тектонических разломов. В конце XX – начале XXI в. стали внедряться в практику строительства проекты высотных зда-



Рис. 1. Подземное пространство Санкт-Петербурга как многокомпонентная система и разрезы по трассе перегонных тоннелей метрополитена.

ний с глубиной котлованов 10–12 м и более. Кроме того, строительство очистных сооружений города еще в середине XX в. потребовало устройства подземных сооружений на глубине 60–70 м также в толще верхнекотлинских глин верхнего венда (Северная и Центральная станции) и в синих нижнекембрийских глинах (юго-западные очистные сооружения). Для строительства небоскреба МК “Лахта-центр” до верхнекотлинских глин был пройден котлован глубиной 20 м.

АНАЛИЗ МАТЕРИАЛОВ ДЕЙСТВУЮЩИХ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ/РАЗРАБОТКИ МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Безопасность освоения и использования подземного пространства мегаполисов в целях реализации строительства наземных сооружений (типовых гражданских и транспортных), в том числе уникальных высотных зданий, а также подземных сооружений (метрополитена и канализационных коллекторов различной глубины заложения) должна базироваться на комплексной оценке подземного пространства как многокомпонентной системы. Наиболее значимые составляющие этой сложной системы – горные породы/грун-

ты и подземные воды напорных и безнапорных водоносных горизонтов, изучению которых в настоящее время не уделяется должное внимание (рис. 1), хотя эксплуатационная надежность сооружений во многом определяется динамикой напоров во времени и изменением химизма вод.

Существующая нормативная база, регламентирующая необходимые виды гидрогеологических исследований в составе инженерно-геологических изысканий, включает ряд документов. Часть из них относится к территориально-строительным нормам и рассматривает особенности того или иного региона России (в данном случае Санкт-Петербурга), в других сформулированы общие требования к проведению инженерно-геологических исследований в пределах зоны строительства [4].

Основные нормативные документы [5–9], согласно которым проводятся инженерно-геологические исследования территории Санкт-Петербурга:

ТСН 31-332-2006 “Жилые и общественные высотные здания”;

ТСН 50-302-2004 “Проектирование фундаментов зданий и сооружений в Санкт-Петербурге”

и документы общего плана:

СП 11-105-97 “Инженерно-геологические изыскания для строительства (Ч1-Ч6)”;

Таблица 1. Содержание гидрогеологических исследований в структуре нормативных документов

Основные положения изучения инженерно-геологических условий	Наименование нормативного документа	Согласно нормативному документу
Анализ гидрогеологических условий Гидродинамический режим Гидрохимический режим	ТСН 31-332-2006 “Жилые и общественные высотные здания в Санкт-Петербурге”	Наличие водоносных горизонтов при проходке шурфов и скважин с выделением напорных горизонтов, выявление природных и искусственных источников питания и условий снятия (разгрузки) напоров, определение коэффициента фильтрации грунта; установление степени агрессивности подземных вод к бетону и коррозионную активность к металлу
	ТСН 50-302-2004 “Проектирование фундаментов зданий и сооружений в Санкт-Петербурге” СП 11-105-97 Часть 1 “Инженерно-геологические изыскания для строительства” СП 47.13330.2012 “Инженерные изыскания для строительства. Общие положения”	Агрессивность подземных вод или агрессивность грунтов по отношению к бетону и металлам, которые будут использованы для устройства фундаментов и подвальных помещений

СП 47.13330.2012 “Инженерные изыскания для строительства. Основные положения”;

СП 11-102-97 “Инженерно-экологические изыскания для строительства”;

ГОСТ 31384-2008 “Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Общие технические требования”.

Основные положения нормативных документов, касающиеся проведения гидрогеологических исследований в системе инженерных изысканий, приведены в табл. 1. Экспертиза аварий зданий и сооружений различного назначения, либо их переход в предаварийное состояние, изучение материалов инженерно-геологических исследований на различных этапах проектирования показывает, что в современной практике изысканий оценка гидрогеологических условий часто проводится формализованно: отмечается наличие вод, в первую очередь, грунтовых, их химический состав по ограниченному числу компонентов; прогнозирование влияния гидрогеологических условий на обеспечение длительной устойчивости сооружений не выполняется.

Многолетние исследования кафедры гидрогеологии и инженерной геологии Горного университета под руководством профессора Р.Э. Дашко показали, что при решении проблемы повышения безопасности освоения и использования подземного пространства города воздействие подземных вод должно рассматриваться со следующих пози-

ций: 1) влияние изменения гидродинамического режима водоносных горизонтов на напряженно-деформированное состояние (НДС) грунтов, служащих основанием и/или вмещающей средой сооружений различного назначения; 2) влияние восходящего или нисходящего перетекания подземных вод напорных водоносных горизонтов на устойчивость несущих конструкций; 3) прогнозирование развития абсолютных и относительных осадок сооружений, а также земной поверхности за счет изменения НДС при варьировании величины напоров подземных вод, особенно при их понижении; 4) оценка химического состава подземных вод по расширенному перечню элементов, при этом определение содержания органического вещества следует проводить не только по величине легко окисляемой органики (перманганатная окисляемость, $\text{мгO}_2/\text{дм}^3$), но и по общему содержанию органики (химическое потребление кислорода, ХПК), а также необходимо знать величину биологического потребления кислорода (БПК₅), показывающую относительную численность аэробных форм микроорганизмов; 5) выделение устойчивых и неустойчивых компонентов подземных вод для характеристики реального состояния их окислительно-восстановительных и кислотно-щелочных условий, а также содержание соединений азота, серы в зависимости от величины Eh; 6) влияние напорных вод на несущую способность свайных фундаментов за счет снижения трения по боковой поверхности свай при восхо-

дящем перетекании подземных вод с обязательным учетом их химического состава; 7) определение значений Eh и pH, аммония, сероводорода, сульфатов непосредственно *in situ* (в скважинах и шурфах). Оценка состава подземных вод с использованием замеренных показателей, в первую очередь, pH и Eh, даст возможность сделать вывод об условиях твердения бетонов при устройстве буронабивных свай, “стены в грунте” и др. [1].

СПЕЦИФИКА ВОЗДЕЙСТВИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ И ГИДРОХИМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ВОДОНОСНЫХ ГОРИЗОНТОВ НА УСЛОВИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ СООРУЖЕНИЙ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Согласно гидрогеологической стратификации, в разрезе подземного пространства Санкт-Петербурга выделяются следующие водоносные горизонты: грунтовые воды, верхний и нижний межморенный, ордовикский, кембро-ордовикский, ломоносовский водоносные горизонты, а также вендский водоносный комплекс (рис. 2). Грунтовый горизонт и вендский комплекс имеют региональное распространение в пределах Санкт-Петербурга. Верхний межморенный водоносный горизонт (полуостровский) развит в северной и северо-восточной части города, нижний межморенный горизонт – локально в пределах погребенной долины, протягивающейся от Ладожского озера практически до Карельского перешейка, где он используется в качестве источника водоснабжения, кембро-ордовикский, ордовикский и ломоносовский водоносные горизонты распространены в южной и юго-западной частях города, при этом ордовикский горизонт – только в пределах Ижорского плато (Красносельский район).

Грунтовые воды

Первый от поверхности водоносный горизонт – грунтовые воды, формирование состава и физико-химических условий которых происходит не только за счет атмосферных осадков и наличия погребенных и действующих болот, но и за счет техногенных факторов: утечек из систем водоотведения, жидкой фазы свалок, кладбищ и др. Следует отметить, что застойный режим грунтовых вод определяется наличием непроницаемых конструкций набережных рек и каналов, которые считаются потенциальными областями дренирования грунтовых вод.

В связи с интенсивным и длительным техногенным загрязнением подземной среды в грун-

товых водах отмечается повышенное содержание соединений серы, азота, хлоридов, величина окислительно-восстановительного потенциала (Eh) в большинстве районов имеет отрицательные значения за счет повышенного и высокого содержания природной и техногенной органики, что способствует формированию анаэробных условий с наиболее низкими значениями Eh.

Вместе с тем по результатам комплексного анализа компонентного состава грунтовых вод в исторической части Санкт-Петербурга установлено, что специфика их химического состава позволяет определить возможность разрушения подземных конструкций за счет процессов растворения и выщелачивания бута известняка и растворов кирпичной кладки фундаментов старинных зданий, а также оценить устойчивость цементных минералов бетонов, которые широко используются при реставрации фундаментов. Так, в составе грунтовых вод исторической части города отмечается повышенное содержание щелочно-земельных элементов (Ca^{2+} и Mg^{2+}) (табл. 2) [3].

Грунтовые воды в пределах города повсеместно загрязнены утечками из систем водоотведения, о чем свидетельствуют повышенные содержания трудноокисляемой органики, которая представляет собой разность между ХПК и перманганатной окисляемостью. Значительная часть трудно окисляемой органики представлена белковыми соединениями, преобразованными липидами и продуктами деятельности микроорганизмов. Величина БПК₅ характеризует грунтовые воды как имеющие высокий уровень пораженности аэробной микробиотой [1].

В 2014 г. были получены данные уникального химического состава грунтовых вод в разрезе площадки строительства жилого комплекса “Ил-матар”, расположенного в юго-западной части Васильевского острова, освоение территории которого началось более 300 лет тому назад. Следует отметить, что ранее на территории строительства размещались болотные отложения, о чем свидетельствуют старинные карты XVII в. При анализе химического состава грунтовых вод отмечались весьма высокие значения легко окисляемой органики ($390 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$), общее содержание органических соединений по величине ХПК составило $770 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$ (табл. 3). Зафиксировано аномально высокая величина БПК₅, свидетельствующая об активной микробной деятельности в разрезе водонасыщенных грунтов, что подтвердилось прямыми определениями численности микроорганизмов путем посевов на различные питательные среды.

Функционирование с конца XIX в. и в течение XX в. на рассматриваемой территории промыш-

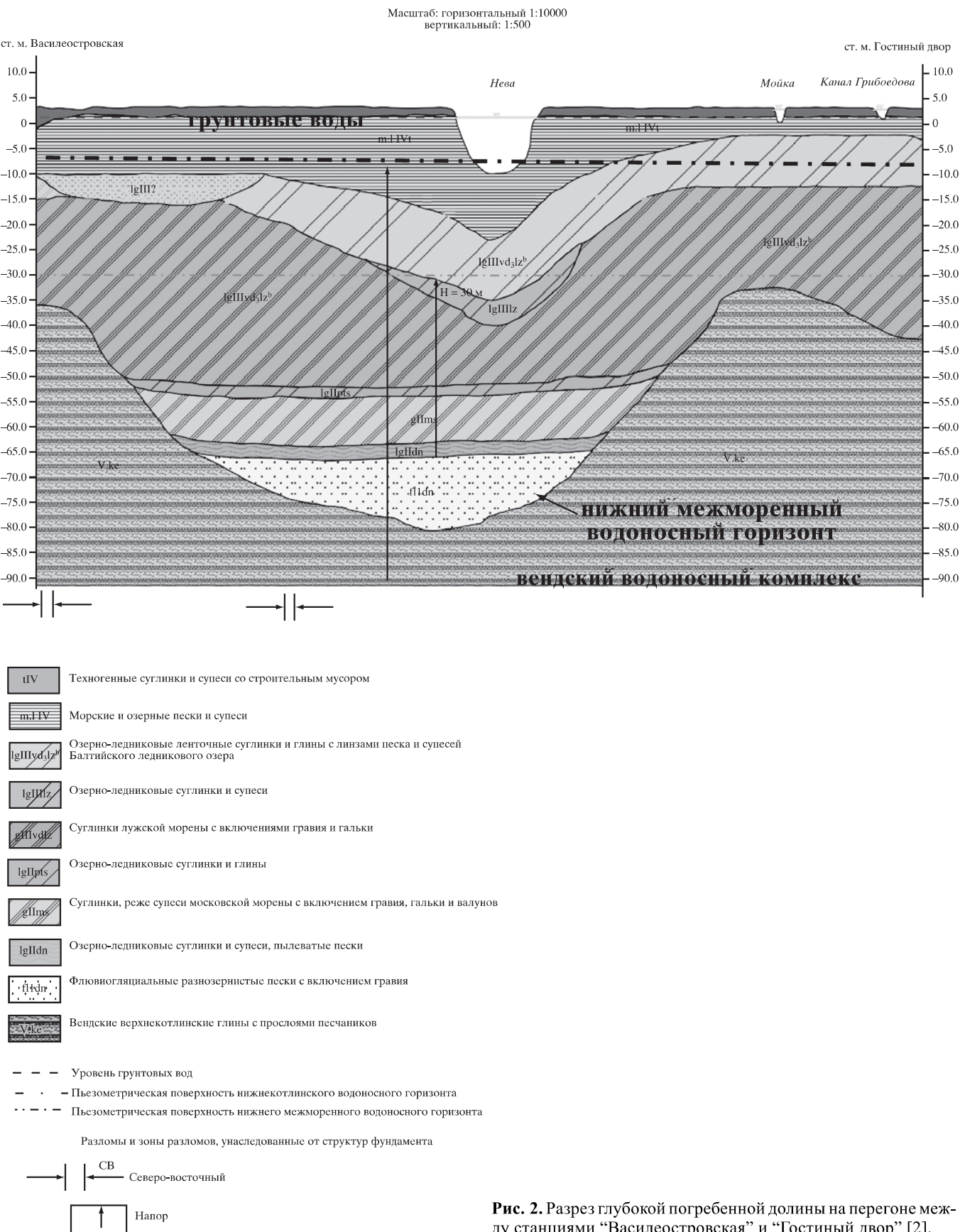


Рис. 2. Разрез глубокой погребенной долины на перегоне между станциями “Василеостровская” и “Гостиный двор” [2].

Таблица 2. Химический состав грунтовых вод в зоне исторического центра Санкт-Петербурга

Элементы	I	II	III	IV	V	VI
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/дм ³	1.4–25.2	2.3–4.0	1.8–33.0	1.9–2.7	2.4–5.0	1.5–9.8
SO ₄ ^{2–} , мг/дм ³	24.6–65.7	16.0–41.1	16.0–164.4	8.0–57.5	22.0–123.3	13.8–657.6
Ca ²⁺ , мг/дм ³	128.3–140.2	92.2–114.7	20.1–130.3	56.1–112.2	54.1–74.2	84.2–172.3
Mg ²⁺ , мг/дм ³	36.0–54.2	31.2–52.1	24.0–69.0	24.0–36.0	9.6–34.1	19.2–199.2
Na ⁺ +K ⁺ , мг/дм ³	152.7–833.0	55.2–61.4	159.0–366.0	46.0–120.0	34.5–47.3	131.0–370.0
Cl [–] , мг/дм ³	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/дм ³	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/дм ³	577.1–2484.5	895.2–723.6	449.1–2780.4	418.4–897.8	361.2–956.9	482.8–2725.5
ХПК, мгО ₂ /дм ³	24.7–112.2	44.0–112.0	34.2–80.0	20.0–64.0	20.0–80.0	40.0–320.0
Перманганатная окисляемость, мгО ₂ /дм ³	12.3–74.3	25.6–81.2	13.2–57.0	16.6–36.0	14.8–61.2	19.0–144.0
БПК ₅ , мгО ₂ /дм ³	4.0–12.3	6.0–7.2	0.5–2.8	6.6–8.4	5.8–10.2	6.6–30.2
СО ₂ агрессивное, мг/дм ³	17.6–24.2	до 2.2	до 48.8	2.2–13.2	2.2–22.0	2.2–103.4

Примечание. * Значения pH и Eh – по результатам измерений в полевых условиях. Острова: I – Адмиралтейский; II – Коломенский; III – Васильевский, IV – Заячий, V – Петроградский, VI – Безымянный.

ленных предприятий, для энергетического снабжения которых использовались нефтепродукты, предопределило наличие остаточного содержания нефтепродуктов, равное 55 мг/дм³. Нефтепродукты служат источником питательных и энергетических субстратов, что способствует активному развитию гетеротрофных микроорганизмов.

Присутствие весьма высокого содержания Ca²⁺ и Mg²⁺, а также кремнезема говорит о разрушении конструкционных материалов – бетонов и растворов при подкислении воды (pH < 7) органическими кислотами как результата микробной деятельности. Кислая среда при наличии анаэробных условий предопределяет активное протекание электрохимических процессов разрушения стали – содержание железа в грунтовых водах достигает 270 мг/дм³ [3]. Биохимическая генерация органических кислот может полностью нейтрализовать присутствие щелочно-земельных элементов и формировать aggressively кислые среды.

Высокое содержание в составе грунтовых вод сульфат-ионов (560 мг/дм³) – результат окисления сероводорода (H₂S), который генерируется в анаэробной среде сульфатредуцирующими бактериями. Наличие сероводорода фиксировалось в процессе опробования скважин по запаху и наличию в грунтах гидротроилита (FeS · nH₂O) в виде черной порошкообразной массы, который под воздействием кислоты разрушается с выделением H₂S. Сероводород подкисляет грунтовую воду и негативно воздействует

на цементы и растворы, а также на стальные конструкции. Учет такого негативного воздействия, к сожалению, отсутствует в нормативных документах на агрессивность подземных вод [1].

Верхний межморенный водоносный горизонт

Верхний межморенный напорный водоносный горизонт, к которому приурочено “Полюстровское месторождение” минеральных вод, расположенное в северо-восточной части Санкт-Петербурга, имеет локальное развитие в пределах города.

В середине 1960-х годов при строительстве зданий в зоне развития этого горизонта наблюдались прорывы подземных вод в строительные котлованы, в связи с чем было принято решение о снижении напоров. Следует отметить, что в эти же годы все проекты строительства были согласованы без учета негативного влияния напоров полюстровского водоносного горизонта на строительство и эксплуатацию сооружений. Снятие напоров с помощью эрлифтов способствовало изменению гидродинамических условий и вызвало нисходящее перетекание загрязненных грунтовых вод в полюстровский горизонт. Это привело к существенной трансформации состава железистых вод за счет повышения содержания соединений серы, азота, нефтепродуктов, а также к росту содержания бальнеологического компонента закисного железа. С конца 1970-х годов месторождение не эксплуатируется [4].

Таблица 3. Результаты химического анализа грунтовых вод, отобранных на территории строительного объекта (26 линия Васильевского острова)

№ п/п	Определяемые показатели	Результаты исследований	Единицы измерения
1.	Натрий	68	мг/дм ³
2.	Калий	9.1	мг/дм ³
3.	Кальций	270	мг/дм ³
4.	Магний	57	мг/дм ³
5.	Аммоний-ион	0.83	мг/дм ³
6.	Железо ⁺²	7.3	мг/дм ³
7.	Железо общее	235	мг/дм ³
8.	Сульфат-ион	560	мг/дм ³
9.	Гидрокарбонат-ион	380	мг/дм ³
10.	Хлорид-ион	105	мг/дм ³
11.	Нитрит-ион	0.086	мг/дм ³
12.	Нитрат-ион	2.3	мг/дм ³
13.	Кремниевая кислота (по Si)	5.1	мг/дм ³
14.	Перманганатная окисляемость	390	мгО ₂ /дм ³
15.	ХПК	770	мгО ₂ /дм ³
16.	БПК ₅	310	мгО ₂ /дм ³
17.	Жесткость общая	19	°Ж
18.	pH	6.7	ед. pH
19.	Сухой остаток	1323	мг/дм ³
20.	Нефтепродукты	55	мг/дм ³

Прекращение эксплуатации Полюстровского месторождения минеральных вод привело к постепенному восстановлению пьезометрической поверхности водоносного горизонта до начальных значений – выше уровня земной поверхности. В зоне ул. Ключевой наблюдаются грифоны за счет формирования восходящих источников, затопление подвалов подземными водами, изменение НДС грунтов в основании эксплуатируемых сооружений и их переход в предаварийное состояние (рис. 3). Следует отметить, что при проведении инженерно-геологических изысканий в районе распространения Полюстровского водоносного горизонта не уделяется особое внимание на восстановление напоров в период проведения полевых работ. Игнорирование гидродинамического фактора (восходящего перетекания) при оценке несущей способности свай приводит к ее завышению. Тогда как за счет изменения НДС при варьировании величины напоров подземных вод происходят большие и неравномерные осадки сооружений, и эксплуатируемые здания переходят в предаварийное состояние уже в первые годы их функционирования. Кроме того, воды этого горизонта обладают высокой углекислотной агрессивностью и биокоррозионной способностью по отношению к конструкционным материалам, что отмечалось еще микробиологом акад. Б.Л. Исаченко при изучении микробного сообщества Полюстровского месторождения минеральных вод.

Нижний межморенный водоносный горизонт

Нижний межморенный водоносный горизонт развит в тальвеговой части глубоких погребенных долин (см. рис. 2). Следует отметить, что в пределах субширотной погребенной долины, протягивающейся от Ладожского озера до Карельского перешейка, этот горизонт развит повсеместно с напорами более 60 м. Известно, что с этим горизонтом связаны две крупные аварии на перегоне между станциями “Лесная” – “Пл. Мужества” 1975 и 1995 гг. В целях экономии денежных средств проходку перегонных тоннелей решили вести один над другим на расстоянии 15 м друг от друга для снижения объемов замораживающего вещества. Горные работы велись в ледогрунтовой целике, который был создан рассольным способом. Известно, что рассольный способ замораживания песков дает позитивный эффект при застойном гидродинамическом режиме подземных вод, что не соблюдалось в случае проходки тоннеля при относительно высоких скоростях фильтрации в этом горизонте. Прорывы вод и песка при проходке тоннеля привели к оседанию земной поверхности и формированию обширной мульды сдвижения. Замораживание водонасыщенной грунтовой толщи жидким азотом и подъем территории потребовали вложения значительных материальных средств. При проектировании перегонных тоннелей после ликвидации аварии также не



Рис. 3. Затопление территории в районе ул. Ключевой за счет восходящего перетекания вод полостровского горизонта (фото В.П. Вершинина).

были учтены гидродинамические условия. В расчетах НДС вмещающей тоннели толщ были допущены принципиальные ошибки – влияние подземных вод учитывалось за счет взвешивающих (архимедовых) сил, а затем в расчетную схему НДС было введено воздействие напоров нижнего межморенного водоносного горизонта. Результат такого некорректного подхода – вывод о плавучести тоннеля: восходящая составляющая превышала на 1% давление от действия гравитационных сил. Как показали замеры деформаций обделки тоннелей, после оттаивания ледогрунтового целика началось активное оседание тоннелей с максимумом деформаций в его центральной части по отношению к бортам погребенной долины. Активизация развития деформаций оседания кровли привела к переходу тоннельной конструкции в аварийное состояние за счет формирования течей при прогрессирующем разрушении обделки тоннелей.

Вендский водоносный комплекс

Для обеспечения устойчивости зданий и подземных сооружений в Санкт-Петербурге важен учет наличия вендского водоносного комплекса, который в настоящее время характеризуется высокими напорами [1]. В 1930-х – начале 1940-х гг. положение пьезометрического уровня горизонта отмечалось выше земной поверхности, что соответствовало положению его области питания вблизи Выборга, где породы венда перекрыты маломощным чехлом четвертичных отложений. Воды вендского комплекса в пределах города имеют хлоридно-натриевый состав и повышенную минерализацию (от 2.5 до 4.0 г/дм³), в зонах тектонических разломов их минерализация может повышаться до 5.0–6.0 г/дм³.

В послевоенный период началась интенсивная эксплуатация вод комплекса, которая привела к образованию депрессионной воронки площадью свыше 20 тыс. км² и снижению напоров в 1976–1978 гг. на 70 м. С 1978 г. в связи с введением ограничений на потребление вод вендского водоносного комплекса наблюдается восстановление его пьезометрического уровня со скоростью около 1.0–1.5 м/год до значений, близких к естественным. В настоящее время его напоры, считая от кровли комплекса, в пределах города составляют 95–105 м и продолжают повышаться.

Варьирование положения пьезометрической поверхности водоносного комплекса формирует изменение напряженного состояния пород толщи, что прослеживается по характеру перемещений тоннелей в различные годы наблюдений. В качестве примера можно привести особенности изменения деформаций перегонных тоннелей по трассе “Черная речка – Пионерская”, расположенной в пределах северной части города, которая в 1970-е гг. оказалась в зоне развития глубокой депрессионной воронки водоносного комплекса (рис. 4).

Как видно из рис. 4, перегонные тоннели, пройденные вне контура погребенной долины в относительно слаботрешиноватых верхнекотлинских глинах, испытывают преимущественно перемещения оседания небольшой величины до 24 мм за счет неравномерного сжатия вмещающих пород. Под склонами палеодолины трасса погружается на значительную глубину и располагается ближе к кровле вендского водоносного комплекса, в результате чего усиливается взвешивающий эффект, оказываемый напорными водами этого комплекса на обделку. За счет восходящего потока напорных вод наблюдается постепенный подъем

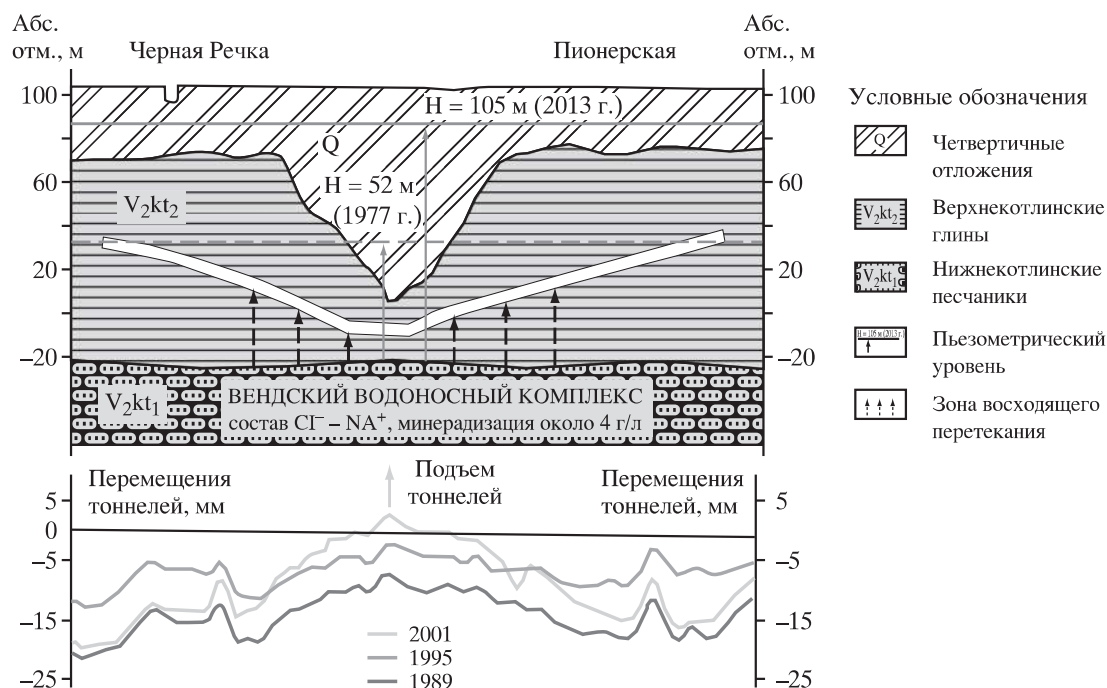


Рис. 4. Схематический геолого-литологический разрез по трассе «Черная речка – Пионерская» с графиками перемещений перегонных тоннелей.

тоннелей во времени при постоянном росте напоров. На участке перегонных тоннелей, пройденном под тальвегом палеовреза, подошва тоннелей находится на минимальном расстоянии (15 м) от кровли вендского водоносного комплекса, что определило максимальный взвешивающий эффект подземных вод и привело к подъему тоннельных конструкций выше первоначальной отметки их заложения [1].

Рост градиентов напора при снижении мощности водоупорной толщи способствует интенсификации восходящего перетекания вод вендского водоносного комплекса через трещиноватую толщу водоупора верхнекотлинских глин и их активному взаимодействию с глинистыми блоками и обделкой тоннелей.

Заполнение трещин минерализованными водами приводит к развитию диффузионно-осмотических процессов между фильтрующей водой и пористыми блоками при отсутствии набухания глин. В результате обменных реакций происходит замещение ионов кальция и магния диффузионного слоя глин на ионы натрия, что вызывает диспергирование глины и повышение ее гидрофильности. По результатам лабораторных исследований установлено, что действие хлоридно-натриевых растворов с минерализацией 3.8 г/дм^3 переводит верхнекотлинские глины в квазипластичное состояние ($\phi = 0$, $c \neq 0$), при этом наблюдается снижение их параметров проч-

ности почти в 2 раза (табл. 4). Следует отметить, что в массиве сцепление трещиноватых глин с учетом коэффициента структурного ослабления может уменьшаться в 2.0–2.5 раза.

Особенно следует остановиться на специфике влияния минерализованных хлоридных натриевых вод на конструкционные материалы обделок и гидроизоляционного слоя перегонных тоннелей. Постоянное увлажнение гидроизоляционной рубашки минерализованными хлоридными натриевыми водами способствует их прогрессирующему разрушению. Известно, что даже плотные бетоны при давлении более 3 атм становятся диффузионно-проницаемыми для гидратированных ионов хлора и натрия.

Кафедрой гидрогеологии и инженерной геологии совместно с кафедрой строительства горных предприятий Горного университета проведено обследование состояния несущих обделок перегонных тоннелей Петербургского метрополитена, располагающихся в различных инженерно-геологических условиях. Было установлено, что максимальное количество дефектов в несущих конструкциях наблюдается в перегонных тоннелях, пройденных под тальвегом погребенных долин, в зонах максимального влияния вендского водоносного комплекса. Снижение количества дефектов отмечено в обделке тоннелей, приуроченных к склоновой части долины, а минимальное их количество характерно для тоннелей, пройденных вне палеодолин (рис. 5) [1].

Таблица 4. Изменение параметров физико-механических свойств образцов верхнекотлинских глин при их взаимодействии с хлоридными натриевыми растворами

Образцы глин	Плотность скелета, г/см ³	Влажность, %	Параметры сопротивления сдвигу	
			сцепление, МПа	угол внутреннего трения, град
До взаимодействия с растворами	1.95	12.5	0.70	12
После взаимодействия с растворами		14.2	0.36	0–2

Примечание. Продолжительность опытов составила 375 дней.

Анализ химического состава водных вытяжек более чем 100 проб, приготовленных из различных натечных форм и разрушенных конструкционных материалов, показал, что почти во всех пробах высокое содержание хлоридов – до 112.0 г/дм³, натрия и калия – до 85.6 г/дм³. В пробах разрушенных железобетонных обделок часто фиксируются повышенные содержания кремниевой кислоты (до 300 мг/дм³) и алюминия, что свидетельствует об интенсивном выщелачивании компонентов цементного камня. Во многих случаях наблюдались значительные концентрации сульфатов (до 34.5 г/дм³), которые связаны с разрушением и выносом гидросульфалюмината кальция из гидроизоляционного слоя, а также с деятельностью тионовых бактерий. Подтверждением активной микробной деятельности служат аномально высокие значения ХПК (до 17960 мгО₂/дм³) и БПК₅ (до 9114 мгО₂/дм³) в водных вытяжках.

В перегонных тоннелях под тальвегами глубоких палеодолин отмечается интенсивное разрушение чугуна тубингов, в котором активное участие принимают микроорганизмы, что доказывается формой его разрушения – расслоением в результате процессов графитизации. Расслоенный чугун становится проницаемым для подземных вод, за счет чего происходит его обогащение хлоридными натриевыми солями. В пробах коррозированного чугуна обращают на себя внимание высокие содержания хлоридов – до 4.3 г/дм³, ионов натрия и калия – до 5.2 г/дм³, а также сульфатов – до 2.73 г/дм³ (перегонный тоннель “Черная речка – Пионерская”) [1].

Кроме того, воздействие вендского водоносного комплекса необходимо учитывать при устройстве глубоких свайных фундаментов с позиции возможности снижения их несущей способности за счет уменьшения величины трения по боковой поверхности сваи и под ее пятой при восходящей фильтрации хлоридных натриевых вод через трещиноватую

глинистую толщу, что не было учтено при проектировании высотного здания “Лахта-центр”.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Совершенствование системы инженерных изысканий в плане корректировки и пересмотра положений по методологии изучения гидрогеологических условий и использования результатов исследований в процессе проектирования сооружений различного назначения необходимо осуществлять, базирясь на следующих положениях.

1. Изучение гидродинамических условий следует проводить на основе анализа с учетом природных и техногенных факторов, определяющих их изменение во времени, по площади и глубине разреза. При этом в обязательном порядке необходимо исследовать трансформацию гидродинамических условий при строительстве и эксплуатации сооружений за счет явных и скрытых источников подтопления, в том числе утечек из систем водоотведения, включая промышленные стоки, а также условий тепловлагообмена и др.

2. Влияние изменения напряженно-деформированного состояния грунтов в процессе преобразования гидродинамического режима при эксплуатации сооружения должно сопровождаться прогнозом развития абсолютных и относительных осадок зданий либо знакопеременных перемещений тоннельных конструкций.

3. При моделировании взаимодействия сооружения – грунтовая толща подземные воды должны анализироваться как один из действенных параметров, определяющий не только напряженно-деформированное состояние грунтов, но и оказывающий негативное воздействие на них при формировании новых окислительно-восстановительных и кислотно-щелочных условий при протекании физико-химических процессов.

4. Определение химического состава подземных вод должно выполняться с расширением диа-

пазона параметров и элементов для анализа процессов, протекающих в подземных водах при их взаимодействии с подземными конструкциями, с учетом влияния не только агрессивности вод, декларируемой в нормативных документах, но и активности микробной деятельности, приводящей к генерации органических и неорганических кислот, а также к образованию биохимических газов: малорастворимых – азота, метана, водорода; и хорошо растворимых: аммиак, сероводород и диоксид углерода (CO_2). При этом следует рассматривать CO_2 как продукт дыхания микроорганизмов и учитывать, что H_2S способствует подкислению вод и агрессивен по отношению к цементам и растворам, а H_2 повышает хрупкость металлов. Определения значений окислительно-восстановительного (Eh) и кислотно-щелочного (pH) параметров должны выполняться только в полевых условиях.

5. Следует учитывать, что образование и депонирование малорастворимых газов в водонасыщенных грунтах приводят к появлению и развитию газодинамического давления, под действием которого наблюдаются миграция газов и микроорганизмов в перекрывающие и подстилающие грунты, а также формирование грязевых выбросов из скважин либо в горных выработках.

6. Необходимо проводить прогнозирование изменения химического состава подземных вод в период эксплуатации сооружений с “мокрым” технологическим режимом при сбросе промышленных вод определенного состава. Особое внимание следует обращать на увеличение содержания органических соединений, которые резко снижают величину окислительно-восстановительного потенциала. Многие органические соединения служат питательным и энергетическим субстратом для гетерогенных микроорганизмов, что приводит к накоплению биомассы, которая сорбируется на дисперсных частицах и заполняет поровое пространство. Содержание биомассы (по величине микробного белка) более 50 мкг/г в песчаном грунте способствует его переходу в плывуны.

7. Влияние изменения химического состава подземных вод и биохимических условий в водонасыщенной грунтовой толще следует анализировать с позиции негативного преобразования песчано-глинистых грунтов, развития и/или активизации инженерно-геологических процессов, реконсолидации глинистых грунтов при накоплении малорастворимых газов в виде “твердых” пузырьков, и их перехода в квазипластичное состояние. Необходимо отметить также развитие биокоррозионных процессов в подземной среде по отношению к конструкционным материалам. Подобные измене-



Рис. 5. Количество выявленных течей в перегонных тоннелях “Черная речка – Пионерская” в зависимости от их расположения относительно элементов погребенных долин (по данным: 2000–2006 гг. – ТОИС ГУП “Петербургский метрополитен”, 2009 г. – СПГТИ (ТУ)).

ния водонасыщенных песчано-глинистых грунтов в основании сооружений либо во вмещающей среде тоннельных конструкций, а также разрушение несущих конструкций способствуют их переходу в предаварийное либо аварийное состояние.

Статья подготовлена при поддержке РНФ, соглашение № 16-17-00117

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дашко Р.Э., Власов Д.Ю., Шидловская А.В. Геотехника и подземная микробиота. СПб.: Институт “ПИ Георекострукция”, 2014. 280 с.
2. Дашко Р.Э. Инженерно-геологическая интерпретация подземного пространства как многокомпонентной среды – повышение безопасности его освоения и использования (на примере Санкт-Петербурга) // Сергеевские чтения “Инженерно-геологические и геоэкологические проблемы городских агломераций”. Молодежная конференция. Вып. 17. М.: РУДН, 2015. С. 128–134.
3. Дашко Р.Э. Особенности разрушения подземных конструкций архитектурно-исторических памятников при агрессивном воздействии компонентов подземной среды Санкт-Петербурга // Опыт сохранения культурного наследия: проблемы реставрации камня: Сборник материалов междунар. научно-практ. конф. /Под ред. Л.В. Никифоровой. СПб.: Астерион, 2015. С. 76–87.
4. Дашко Р.Э., Карпова Я.А. К вопросу комплексного подхода инженерно-геологического и геотехнического обеспечения и оценки условий строительства и эксплуатации зданий и сооружений в Санкт-Петербурге // Тр. Междунар. конф. по геотехнике Технического Комитета 207 ISSMGE. Изд-во ин-та Георекострукция. Т. 2. 2014. С. 197–207.
5. СП 11-102-97. Инженерно-экологические изыскания в строительстве. М.: Госстрой России, 1997. 44 с.
6. СП 11-105-97 Ч.1. Инженерно-геологические изыскания для строительства. М.: Госстрой России, 1997. 53 с.
7. СП 47.13330.2012. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. М.: Госстрой, 2013. 115 с.

8. ТСН 31-332-2006 Санкт-Петербург. Жилые и общественные высотные здания. СПб.: ОАО Изд-во Стройиздат СПб., 2006. 63 с.
9. ТСН 50-302-2004 Санкт-Петербург. Проектирование фундаментов зданий и сооружений в Санкт-Петербурге. СПб.: ОАО Изд-во Стройиздат СПб., 2004. 63 с.

REFERENCES

1. Dashko, R.E., Vlasov, D.Yu., Shidlovskaya, A.V. *Geotekhnika i podzemnaya mikrobiota* [Geotechnics and subsurface microbiota]. St. Petersburg, Institute PI Georekonstruktsiya, 2014, 280 pp. (in Russian).
2. Dashko, R.E. [Engineering-geological interpretation of underground space as a multicomponent system – improving safety of its development and use (the case of St. Petersburg)] *Sergeevskie chteniya. Inzhenerno-geologicheskie i geoekologicheskie problemy gorodskikh aglomeratsiy* [Proc. Sci. Conf. in comm. of acad. E.M. Sergeev. Engineering geological and geoecological problems in urban agglomerations]. Issue 17, Moscow, RUDN Publ., 2015, pp. 128–134 (in Russian).
3. Dashko, R.E. [Damaging pattern of historical monuments subsurface structures due to the aggressive action of underground space components of St. Petersburg] *Opyt sokhraneniya kul'turnogo naslediya: problemy restavratsii kamnya. Sb. materialov mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Proc. Intern. Sci. and Pract. Conference on Cultural heritage preservation experience: masonry restoration issues]. L.V. Nikiforova, Ed., St. Petersburg, Asterion, 2015, pp. 76–87 (in Russian).
4. Dashko, R.E., Karpova, Ya.A. [The complex approach to engineering-geological and geotechnical maintenance and evaluation of structures and facilities in St. Petersburg]. *Trudy Mezhdunar. Konf. po geotekhnike Tekhnicheskogo Komiteta 207 ISSMGE* [Proc. Intern. Conf. on Geotechnics TC 207 ISSMGE], St. Petersburg, Institute Georekonstruktsiya, 2014, vol. 2, pp. 197–207 (in Russian).
5. *SP 11-102-97. Inzhenerno-ekologicheskie izyskaniya v stroitel'stve*. [Construction rules 11-102-97. Engineering ecological survey for construction]. Moscow, Gosstroj Rossii, 1997 (in Russian).
6. *SP 11-105-97. Chast' I. Inzhenerno-geologicheskie izyskaniya dlya stroitel'stva*. [Construction Rules 11-105-97. Part. I. Engineering and geological survey for construction]. Moscow, Gosstroj Rossii, 1997 (in Russian).
7. *SP 47.13330.2012. Inzhenernye izyskaniya dlya stroitel'stva. Osnovnye polozheniya*. [Construction Rules 47.13330.2011. Engineering survey for construction. General issues]. Moscow, Gosstroj Rossii, 1997. (in Russian).
8. *ТСН 31-332-2006. Санкт-Петербург. Жилые и общественные высотные здания*. [Territorial Construction Rules 31-332-2006. St. Petersburg. Residential and public high-rise buildings]. St. Petersburg, ОАО Издат'ство Стройиздат СПб, 2006, 63 p.
9. *ТСН 50-302-2004. Санкт-Петербург. Проектирование фундаментов зданий и сооружений в Санкт-Петербурге*. [Territorial Construction Rules 50-302-2004. St. Petersburg. Designing buildings and structures foundations in St. Petersburg]. St. Petersburg, ОАО Издат'ство Стройиздат СПб, 2006, 63 p.

IMPROVING APPROACHES TO THE ESTIMATION OF HYDROGEOLOGICAL INVESTIGATIONS AS A PART OF ENGINEERING SURVEY IN MEGACITIES (THE CASE OF ST. PETERSBURG)

R. E. Dashko, Ya. A. Karpova

*National mineral resources university (Mining university), VO line 21, 2,
St. Petersburg, 199106 Russia. E-mail: regda2002@mail.ru*

Urban subsurface is considered to be a dynamic, multicomponent system that includes sandy-clayey soils containing groundwater in different state, microbiota, gases, underground facilities (either load-bearing foundations or surrounding walls), or engineering structures (tunnels of different purpose, hazardous industrial waste storages, etc.). The paper emphasizes the significance of hydrogeological investigations, predominantly in terms of the influence on buildings and structural materials of hydrodynamic, physical-chemical conditions and aquifer chemistry. The main factors controlling the groundwater composition within the zones of different contamination degree within megacity areas are analyzed. Results of studying the influence of the Vendian aquifer system on the bearing lining of tunnels running in fractured aquiclude, are presented. Recommendations for evaluating hydrogeological conditions as a part of engineering-geological survey are given.

Keywords: *underground space, sandy-clayey soils, non-artesian and artesian groundwater, chemical composition, fissured-block structure, strain-stress state, corrosion and biocorrosion, structure stability.*