УДК:624.131:551.435:556.3:624.131.43

ТЕХНОГЕННАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ПОДЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА САНКТ-ПЕТЕРБУРГА: ПРИЧИНЫ И ПОСЛЕДСТВИЯ

Анализируются природные и техногенные факторы, определяющие эволюцию и дестабилизацию геоэкологического состояния подземного пространства Санкт-Петербурга. Особое внимание уделено влиянию погребенных болот, гидрографической сети и загрязнению грунтовых вод как наименее стабильному компоненту подземного пространства. Основными контаминантами в период функционирования города служат канализационные стоки и захороненные хозяйственно-бытовые отходы, которые привносят в подземное пространство не только большое количество легко утилизируемых микроорганизмами органических соединений, но и дополнительную микрофлору. С середины XX столетия к числу активных загрязнителей подземной среды отнесены также нефтяные углеводороды.

Высокое содержание органических соединений в подземном пространстве города приводит к формированию восстановительной среды и активизации микробиологической деятельности. Проведенные массовые замеры окислительно-востановительного потенциала, определение специфики химического состава подземных вод, а также оценка величины бактериальной массы в песчано-глинистых отложениях разреза свидетельствуют о значительной роли физико-химических и биохимических процессов в эволюции и дестабилизации подземного пространства города. Под воздействием таких процессов наблюдается негативное преобразование дисперсных грунтов, приводящее к генерации плывунов, активно развиваются газодинамические явления, формируется высокий уровень агрессивности среды.

Проанализирован особый тип коррозии строительных материалов, связанный с деятельностью микроорганизмов, – биокоррозия, которая усиливает химическое, электрохимическое и другие виды воздействия подземной среды. Установлено, что более 50 % всех потерь от разрушения подземных трубопроводов, фундаментов и стен подвалов происходит за счет биокоррозии.

Natural and man-caused factors that determine evolution and destabilisation of geo-ecological condition of subterranean space of Saint-Petersburg are analysed. A special attention is paid to buried marshes, drainage network and subterranean water pollution as to the least stable parts of subterranean space. The main contaminants of the city are sewage and buried waste that introduce not only a large quantity of organic matter, easily digestible by micro-organisms, but additional microflora too. Since the middle of the XX century oil hydrocarbons have been considered to be active pollutants of the subterranean space. A large quantity of organic matter in subterranean space leads to formation of reducing environment and microbiological activation. Carried out mass sampling of redox potential, determination of chemical composition specificity of subterranean waters, as well as bacterial mass evaluation in sandy-argillaceous sediments of the cut indicate the importance of physico-chemical and biochemical processes in the evolution and destabilisation of the subterranean space of the city. As results of these processes we witness negative transformation of disperse soils leading to floating earth formation, active development of gas-dynamic phenomena, and high-level of environmental aggression. A special form of construction material corrosion due to micro-organic activity (bio-corrosion), which increases chemical, electrochemical and other types of subterranean impact has been analysed. It was determined that more that 50 percent of the total loss of underground piping, foundations and basement walls is the result of bio-corrosion.

* * *

При разработке стратегии освоения и использования подземного пространства (ПП) в пределах развитых городских инфраструктур, жизнедеятельность которых происходит на протяжении нескольких веков, принципиальное значение имеет анализ его геоэкологического состояния. Длительный период развития и функционирования мегаполисов приводит к значительному и негативному преобразованию всех компонентов их подземного пространства. Характер и интенсивность такой эволюции во многом определяются геолого-структурным положением города, спецификой инженерно-геологических и гидрогеологических условий, а также особенностями и длительностью тех-

ногенной нагрузки. При этом изучение процессов контаминации ПП города следует рассматривать как одно из приоритетных направлений его эволюционного развития при техногенных воздействиях.

Основное внимание в вопросах загрязнения обычно уделялось подземным водам, в то же время горные породы рассматривались как относительно стабильный компонент подземного пространства. Однако, загрязнение ПП, особенно органическими соединениями, способствует преобразованию физико-химических и биохимических условий, развитию ряда негативных геологических процессов за счет изменения не только напряженно-деформированного состояния пород, но и их состава, состояния и свойств. Аварийное и предаварийное состояние ряда сооружений различного назначения, особенно в историческом центре Санкт-Петербурга, требует повышения уровня инженерно-геологических и геоэкологических знаний о негативных процессах, происходящих в ПП города под воздействием его длительной контаминации.

Следует отметить, что инженерно-геологическую и геоэкологическую оценку условий строительства, эксплуатации и реконструкции отдельных зданий и сооружений, а также районов и микрорайонов в пределах городской инфраструктуры необходимо проводить на основе комплексного анализа не только природной обстановки, но и влияния особенностей инженерно-хозяйственного освоения рассматриваемой территории во времени.

Санкт-Петербургский регион расположен в зоне сопряжения двух крупных структур (Балтийского щита и Русской плиты), в пределах которой наблюдаются малоамплитудные движения блоков с общей тенденцией к опусканию территории (ГГП «Севзапгеология», Б.Г.Дверницкий и др., 1999, 2000). Развитие сложной системы тектонических разломов различного направления определяет блоковое строение ПП города, а также повышенную газо- и водопроницаемость дочетвертичных пород в зонах нарушений.

Характерной чертой подземного рельефа поверхности дочетвертичных пород является наличие погребенных долин (неоген-раннечетвертичного возраста) различной глубины и протяженности, в которых наблюдается наиболее полный разрез четвертичных отложений мощностью до 120 м. Общая площадь, занятая такими палеодолинами в пределах города, составляет более 20 %.

Необходимо подчеркнуть основные особенности инженерно-геологических и гидрогеологических разрезов ПП города.

1. Скальные породы архея и протерозоя вскрываются на глубине более 180 м.

2. Коренные глинистые отложения (верхнекотлинские глины венда и синие глины нижнего кембрия) имеют зональное строение по глубине и характеризуются наличием трещиноватости, которую необходимо учитывать при оценке их прочности и деформируемости, а также водопроницаемости и, соответственно, степени защищенности ломоносовского и нижнекотлинского (гдовского) водоносных горизонтов [9].

3. Четвертичный разрез представлен песчано-глинистыми отложениями различного генезиса, состояние и свойства которых определяются совместным воздействием природных и техногенных факторов. Среди них особое место занимают породы со значительным содержанием органики (болотные), либо с рассеянной органической компонентой (литориновые, анциловые и др.), которые предопределяют специфику физико-химических и биохимических условий в обводненной толще.

4. Для гидрогеологического разреза Санкт-Петербурга характерно наличие шести водоносных горизонтов с различными гидродинамическими режимами и химическим составом подземных вод, приуроченных к коренным породам и четвертичным отложениям. Знание гидродинамической ситуации в ПП в процессе изменения пьезометрической поверхности глубоких водоносных горизонтов, в первую очередь нижнекотлинского, позволяет прогнозировать напряженно-деформированное состояние толщи пород, которое влияет на устойчивость наземных и подземных сооружений. Для грунтовых вод на большей части терри-

тории города отмечается техногенный, реже природно-техногенный режим, определяемый утечками из систем водоснабжения и водоотведения, а также наличием непроницаемых шпунтовых ограждений и набережных.

Геоэкологическое состояние ПП разреза городской инфраструктуры во многом зависит от интенсивности и длительности загрязнения. При этом следует анализировать не только современные тенденции контаминации, но и ее развитие во времени, что дает возможность оценить специфику трансформации ПП, повысить степень достоверности изучения развития природно-техногенных и техногенных процессов, возникающих при строительстве и эксплуатации сооружений в сложных инженерно-геологических условиях.

История загрязнения территории современного Санкт-Петербурга насчитывает более 300 лет, начиная еще с допетровских времен. По результатам исследований истории развития городской инфраструктуры выделены и проанализированы основные этапы региональной контаминации ПП с учетом инженерно-хозяйственного развития инфраструктуры города (табл.1). Особенности историко-инженерного развития островной части, отсутствие канализационной сети с момента основания Петербурга, а позднее – несовершенство этой системы и медленный ввод ее в эксплуатацию, а также существование других источников загрязнения (табл.1) способствовали прогрессирующему загрязнению подземной гидросферы, которая продолжается и в настоящее время.

Таблица 1

Этапы загрязнения подземного пространства Санкт-Петербурга

Этап	Период	Особенности освоения территории	Характер и степень загрязнения территории	Природное и техногенное воздействие на грунтовые воды и породы
I	XIV-XVII вв.	Существование деревень, пахотных, охотничьих угодий, поместий землевладельцев. Неорганизованный сброс бытовых и фекальных стоков	Локальное приповерхностное загрязнение геологической среды. «Земля, смешанная с навозом» – шведские данные	Воздействие природной микрофлоры и органических соединений за счет болот, появление биоценозов, связанных с жизнедеятельностью человека
II	XVIII – начало XIX в.	Период интенсивного строительства и роста города. Система дворовых выгребных ям для нечистот. Первая ливнево-дренажная сеть – 95 км	Переход к региональному загрязнению по площади и по глубине. Сброс сточных вод без очистки в водотоки города. Начало прогрессирующего загрязнения грунтовых вод и верхней толщи пород	Хозяйственно-бытовое загрязнение, активизация микробиологической деятельности, существование восстановительной обстановки
III	Середина XIX в. – начало XX в.	Интенсивное развитие городской инфраструктуры и промышленного производства широкого спектра. 1864-1917 гг. – первые нереализованные проекты систем канализации. 1/3 территории города не имеет канализационной сети	Хозяйственно-бытовое загрязнение, существование смешанных свалок. Усложнение состава загрязняющих компонентов. Инфильтрация нечистот из выгребных ям. Более 100 км городских водостоков – открытые канализационные коллекторы	Повышение содержания органических и неорганических соединений, дополнительный привнос микрофлоры. Сохранение анаэробной обстановки в ПП, активная микробиологическая деятельность, развитие негативных экзогенных процессов
IV	XX в. – настоящее время	Дальнейшее развитие города, промышленности, транспорта. 1925 г начало строительства региональной канализационной системы города	Интенсификация загрязнения нефтепродуктами, промышленными стоками и канализационно-бытовыми утечками. Глубина зоны загрязнения – десятки метров	Загрязнение канализационными стоками, нефтепродуктами, повышение содержания органических и неорганических соединений, привнос специфической микробиоты, сохранение анаэробной обстановки в ПП

Следует отметить, что на протяжении всего периода существования города сброс хозяйственно-бытовых стоков производился непосредственно в речную систему Невы и каналы. В 1864 г. городской Думой был поднят вопрос о создании в Петербурге системы для отвода нечистот. До 1917 г. было разработано 65 проектов различных систем канализирования города. Однако ни один из этих проектов не был реализован. Даже к 1918 г. более трети территории города вообще не имела водостоков, а из 537 км существовавшей к тому времени канализационной уличной сети 70 % (374 км) составляли деревянные трубы; количество дворовых выгребов достигло 40000, а число выпусков сточных вод в реки и каналы возросло до 1000. Свыше 100 км городских водотоков были превращены в открытые канализационные коллекторы [4]. Анализы грунтов, проведенные в 20-е годы XX столетия на центральных улицах Санкт-Петербурга, в частности, на Невском проспекте, показали, что по содержанию органических веществ и аммиака они не уступают грунтам старых кладбищ.

Только в середине 30-х годов XX столетия начала вводиться в эксплуатацию региональная канализационная система. Первым, в 1935 г., был канализирован Васильевский остров. К 1938 г. протяженность канализационной сети достигла 1120 км, однако из них 370 км (33 %) оставалась деревянной. Реализации планов канализирования города помешала война. Еще в 1950 г. во дворах сохранилось 80000 выгребных колодцев [1]. Развернутое строительство канализации началось только в семидесятые годы. При этом наиболее приемлемой была признана комбинированная система канализации общесплавная (на 70 % территории города) и полная раздельная (на 30 % территории в периферийных районах). В настоящее время согласно официальным данным общая протяженность канализационной сети насчитывает 6000 км, из них около1200 км коммуникаций находятся в предаварийном, а 130 км – в критическом состоянии. В первую очередь, это относится к территории исторического центра, где строительство велось с использованием старых уличных и дворовых сетей, эксплуатируемых в отдельных микрорайонах 50 лет и более.

Следует отметить, что канализационные стоки характеризуются достаточно стабильным и специфическим составом (табл.2). В анаэробной среде основными неорганическими поллютантами канализационных стоков являются аммоний, хлориды, восстановленные формы серы, среди органических компонентов – белки, жиры, углеводы, относящиеся к легкоокисляемым веществам. Стоки содержат также микрофлору: бактерии, грибковые культуры, актиномицеты, микроводоросли и др. в количестве 10^7-10^8 клеток в 1 мл воды.

Таблица 2

Химический состав канализационных стоков [5]

Загрязняющий компонент	Содержание, мг/л	Примечание
Взвешенные вещества	300–416	Содержание минеральных веществ во взвесях – 42 %, органических – 58 %.
Азот аммонийный	60-130	
Хлориды	70-90	
Фосфаты (P_2O_5)	12,5–16,0	В 1 мл стоков 10^7-10^8 клеток бактерий
Калий (K_2O)	25,0	
Окисляемость (O_2)	35-120	
$БПК_{20}$	291–416	

К числу активных загрязнителей подземной гидросферы с середины 20-х гг. XX столетия относятся нефтяные углеводороды (НУ), значительное количество которых попадает в грунтовые воды из дренажно-ливневой сети. Согласно данным Регионального геоэкологического центра «Невскгеология» (1999), высокое содержание НУ и других органических загрязнителей (бенз(а)пирен, полихлорированный бифинил (ПХБ), хлорорганические пестициды и др.) в зоне аэрации территории Санкт-Петербурга наблюдается как в историческом центре, так и окраинных районах города (табл.3), причем интенсивность загрязнения этими поллютантами иногда на несколько порядков превосходит нормы, установленные мэрией Санкт-Петербурга.

Таблица 3

Распределение содержания органических поллютантов на территории Санкт-Петербурга [2]

Органические поллютанты	ПДК, ОДК	Исторический центр (n = 60)		Окраинные районы (n = 243)	
		Среднее значение	Максимальное значение	Среднее значение	Максимальное значение
Бенз(а)пирен, мкг/кг	20,0	89,4	940	133,8	2662
Полихлорированные бифенилы, мкг/кг	60,0	115,0	2640	30,0	850
∑ДДТ, мкг/кг	100,0	98,2	1689	99,8	4780
Нефтепродукты, мг/кг	180-275	1430	15896	433	5595

Таблица 4

Содержание некоторых компонентов в грунтовых водах островной части Санкт-Петербурга (1997-2000 гг.)

Компоненты	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/л	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/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
Перм. окисл., мгO_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
CO_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

Примечание. 1. Значения pH и Eh – по результатам измерений в полевых условиях.
2. Острова: I – Адмиралтейский, II – Коломенский, III – Васильевский, IV – Заячий, V – Петроградский, VI – Безымянный.

Почти во всех районах города существуют захороненные свалки бытового мусора и отходов производства, жидкая фаза которых обогащена органическими соединениями. В историческом центре Санкт-Петербурга (Адмиралтейский и Центральный районы) на каждом квадратном километре площади захоронено от 2 до 3 тыс.т таких отходов. В городе зарегистрировано более 200 несанкционированных свалок объемом свыше 5 млн м^3

При нисходящем движении загрязненных грунтовых вод контаминанты разного состава и генезиса могут быть встречены на различных глубинах. В процессе медленной фильтрации, а также диффузионного переноса вещества наблюдается сорбция поллютантов на дисперсных частицах. Аммоний (NH_4^+) в глинистых грунтах действует как диспергатор, повышая их гидрофильность и, соответственно, влагосодержание, что негативно сказывается на консистенции и физико-механических свойствах грунтов. Из-за слабой аэрации и низкой сорбционной способности нефтяных углеводородов в водонасыщенной среде нефтепродукты в условиях

нисходящей фильтрации также способны мигрировать на большие глубины при наличии гидрогеологических окон, а также трещиноватости в региональных водоупорах. НУ повсеместно присутствуют в грунтовых водах, а в зонах длительного и интенсивного загрязнения могут фиксироваться и в более глубоких водоносных горизонтах.

Одним из основных последствий загрязнения ПП органическими соединениями является формирование восстановительной среды за счет окисления органического вещества. Подтверждением этому служат результаты замеров окислительно-восстановительного потенциала (Eh) in situ в грунтовых водах на территории исторического центра города (табл.4). При коэффициенте фильтрации водовмещающих пород менее 1 м/сут и наличии в разрезе торфов значение Eh может снижаться до –200 мВ и ниже.

Следует сказать, что грунтовые воды, приуроченные к литориновым отложениям, на незагрязненных территориях отличаются малой минерализацией (ниже 0,3 г/л), гидрокарбонатно-натриевым составом при полном отсутствии сульфатов и аммония. На большей части территории Санкт-Петербурга компонентный состав и минерализация грунтовых вод резко отличаются от вышеприведенных характеристик; существует широкий разброс их минерализации по площади; отмечаются значительные количества хлоридов, повсеместное присутствие аммония, содержание которого вблизи старых канализационных коллекторов может достигать 100 мг/л и более, повышенные значения перманганатной окисляемости (см. табл.4). В условиях существования нисходящей фильтрации высокая степень загрязненности отмечается и в нижележащих водоносных горизонтах четвертичной толщи. Поллютанты, характерные для грунтовых вод, фиксировались неоднократно на глубинах от 30 до 50 м и более в разрезе погребенных долин Васильевского острова и пра-Невы.

Техногенный привнос органической компоненты в ПП в сочетании с погребенными болотными отложениями способствует также значительной активизации микробиологической деятельности отдельных физиологических групп (ФГ) микроорганизмов либо микробиоты в целом. Важным условием жизнеспособности микробиоты в ПП города служат застойный гидродинамический режим верхних водоносных горизонтов, отепляющее воздействие наземных сооружений и подземных коммуникаций.

Следовательно, оценка геоэкологических условий в пределах ПП города имеет весьма важное и принципиальное значение. Она должна быть увязана с техногенным преобразованием грунтов и их переходом в категорию более слабых и деформируемых.

Формирование восстановительных условий повсеместно в ПП Санкт-Петербурга предопределяет отсутствие либо разрушение цементационных связей за счет соединений трехвалентного железа, которые, как известно, служат основным цементирующим материалом четвертичных отложений Северо-Запада. Трехвалентное железо обладает агрегирующим действием; восстановление Fe^{3+} способствует переходу его соединений в растворимые формы, а также диспергации глинистых агрегатов в грунтах и, соответственно, повышению их гидрофильности, снижению фильтрационной способности, прочности и модуля общей деформации тонкодисперсных отложений.

Дополнительным фактором негативного преобразования физико-механических свойств грунтов служит деятельность микробиоты. Основными природными и техногенными источниками поступления микроорганизмов в подземные воды и дисперсные породы являются погребенные болота и заторфованные грунты, захороненные свалки, участки ликвидированных водотоков и водоемов, кладбища, утечки из канализационной сети и др. Необходимо принимать во внимание круглогодичный отепляющий эффект наземных сооружений, подземных коммуникаций – тепло- и канализационной сети.

Наименее изучен таксонометрический и количественный состав микробиоты в болотных экосистемах. Так, данные по численности различных физиологических групп микроорганизмов торфа, заторфованных песчано-глинистых отложений по ранним исследованиям проф. Л.И.Рубенчика приведены в табл.5 [7].

Таблица 5

Численность характерной микрофлоры низинных болот

Формы бактерий	Физиологические группы	Численность, клетки/г
Анаэробные	Аммонифицирующие	10^6–10^7
	Сульфатредуцирующие	10^6
	Целлюлозоразлагающие	10^3–10^4
	Метанообразующие	10^2–10^4
Факультативные	Денитрифицирующие	10^6
Аэробные	Нитрифицирующие	10^4
	Тионовые	10^4–10^5
	Целлюлозообразующие	10^2

Более поздние исследования болотного биогеоценоза, проведенные в МГУ, свидетельствуют о весьма существенной величине биомассы торфов, а также о разнообразии различных типов микроорганизмов. Вес сухой микробной массы может достигать сотен тонн на гектар (в зависимости от мощности болотной толщи), биомасса эукариот (82-99 %) значительно превышает биомассу прокариот, а актиномицетный мицелий составляет 25 % от биомассы бактерий (табл.6).

Деятельность микробиоты обычно сопровождается накоплением живых и мертвых клеток микроорганизмов, продуктов их метаболизма, среди которых наиболее активное воздействие оказывают ферменты, органические кислоты, а также генерируемые ими газы. Основным продуктом «дыхания» микроорганизмов является CO_2. Достаточно часто в ПП города наблюдается биогеннная сульфатредукция, которая обычно протекает согласно уравнению:

$$2SO_4^{2-} + 5C_{орг} + 2H_2O \rightarrow 2H_2S + 5CO_2.$$

В результате этой реакции выделяющийся сероводород даже в небольших концентрациях (3 мг/л) приводит к резкому снижению Eh среды. Генерация сероводорода способствует образованию вторичного сульфидного минерала гидротроилита ($FeS{\cdot}nH_2O$). Сероводородное проявление отмечалось во многих обследованных зонах ПП исторического центра Санкт-Петербурга. Газы CO_2 и H_2S хорошо растворяются в воде и повышают ее агрессивность по отношению к строительным материалам подземных конструкций зданий и сооружений.

При наличии условий для биохимической генерации метана происходит накопление этого малорастворимого газа в грунтах, что приводит к их разуплотнению, а также предопределяет возможность для газодинамических явлений выброса и возгорания метана. Подобные случаи в Санкт-Петербурге имели место и изучались еще в 30-е годы XX века; в конце 90-х годов газогрязевые выбросы и возгорания CH_4 фиксировались в Центральном, Фрунзенском и Красногвардейском районах. Явления биохимического газовыделения требуют специального изучения для прогноза и предупреждения.

Таблица 6

Вес микробной биомассы и соотношение ее компонентов в различных торфяниках (А.В.Головченко, 1993)

Тип торфяника		Мощность торфяника, м	Общий вес сухой биомассы, т/га	Микробная биомасса, %			
				Грибной мицелий	Споры грибов	Актиномицеты	Бактерии
Низинный высоко зольный	*а*	1,0	56	96,8	2,1	0,2	0,4
	б	3,0	435	98,9	0,7	0,1	0,3
Низинный нормально зольный	*а*	1,0	21	89,7	7,0	0,6	2,6
	б	7,0	81	84,8	10,7	0,7	3,8
Верховой	*а*	1,0	8	57,1	25,4	1,6	15,9
	б	5,5	43	59,1	23,4	1,3	16,2

Примечание. Пересчет сухой биомассы: *а* – на 1,0 м; *б* – на всю указанную толщу торфов

Таблица 7

Микробиологическая пораженность четвертичных отложений разреза Санкт-Петербурга (вне зоны палеодолин, Петровский остров)

Глубина, м	Генетический и литологический тип породы	СБ, мкг/г
0,50-0,70	Техногенные отложения, песчаные и супесчаные	92,3-97,0
1,5-3,0	Контактная зона техногенных и литориновых супесей, суглинков, содержащих природную органику	125,0-282,6
3,5-5,5	Литориновые супеси, суглинки с органикой	253,3-275,2
6,7-8,5	Озерно-ледниковые (ленточные) суглинки и глины	235,1-296,5

Примечание. СБ – суммарный белок бактериальной массы, определение которого по методу Брэдфорда было внедрено в практику исследований в Санкт-Петербургском университете [6].

Таблица 8

Микробиологическая пораженность четвертичных отложений разреза Санкт-Петербурга (тальвег погребенных долин)

Разрез	Содержание СБ (мкг/г) в зоне	
	интенсивного загрязнения (канализационные стоки >200 лет, НУ > 60 лет) – устье р.Смоленки	с низкой степенью загрязнения (канализационные стоки > 25 лет, НУ >20 лет) – площадь Мужества
Литориновые		
- супеси с органикой	75-151/114(14)	Литориновые отложения отсутствуют
- пески с органикой	39-144/65(19)	
Озерно-ледниковые		
- супеси и суглинки	78-119/104(10)	38-62/50(7)
- глины ленточные	95-128/135(17)	54-112/96(8)
Ледниковые (лужские)		
- супеси и суглинки	72-129/94(12)	46-83/60(11)
Межморенные		
- пески		33-61/50(3)
-супеси и суглинки	80-125/98(5)	40-68/55(11)
Ледниковые (московские)		
-супеси и суглинки	90-98/93(3)	55-112/72(8)
Межморенные		
суглинки и глины неяснослоистые	87-132/104(13)	62-97/84(11)

Примечание. 1. В числителе – минимальные и максимальные значения, в знаменателе – средние величины, в скобках – число определений.

2. Фоновые величины СБ, характерные для незагрязненных территорий, мкг/г: для озерно-ледниковых глин < 20-25; моренных суглинков < 15; коренных глин ≤ 10.

Клетки микроорганизмов и продукты их метаболизма активно сорбируются на минеральных частицах дисперсных пород, образуя биопленки. При этом происходит снижение интенсивности молекулярного взаимодействия минеральных частиц за счет экранирующего действия биопленок, которые играют также роль своеобразной смазки, способствуя снижению внутреннего трения в породах.

Наши исследования показали, что степень микробиологической пораженности водонасыщенных песчано-глинистых отложений различного генезиса связана с интенсивностью и длительностью контаминации ПП вне и в пределах палеодолин, а также с наличием погребенных болот в разрезе (табл.7, 8).

Варьирование СБ в пределах разреза обычно коррелирует с содержанием глини-

стой фракции и природного органического вещества. В зонах интенсивного и длительного загрязнения вне палеодолин фиксируются максимальные содержания СБ. В коренных глинах также отмечается высокий уровень микробиологической пораженности (табл.9).

Накопление микробиоты и продуктов ее метаболизма наиболее активно сказывается на показателях физико-механических свойств песчаных отложений. В зоне интенсивного и длительного загрязнения канализационными стоками в анаэробных условиях за счет кольматации порового пространства бактериальной массой формируется низкая проницаемость песков. Постепенное повышение СБ способствует значительному снижению коэффициента фильтрации:

СБ, мкг/г	6	28	62	105	130	140
$K_ф$, м/сут	4	10^{-1}	$2 \cdot 10^{-2}$	8 10^{-3}	10^{-3}	5 10^{-4}

В то же время удаление биомассы при низкотемпературном прокаливании приводило к увеличению $K_ф$ до 25 м/сут, что полностью соответствовало гранулометрическому составу. Между величиной СБ и коэффициентом фильтрации средне- и мелкозернистых песков существует зависимость экспоненциального вида:

$$K(\text{СБ}) = K_{\text{СБ}_{min}} \exp\left[-\alpha\left(\frac{\text{СБ}\,(t)}{\text{СБ}_{\,min}} - 1\right)\right],$$

где $K_{\text{СБ}_{min}}$ – коэффициент фильтрации на начальном этапе при минимальном фиксированном содержании СБ_{min}; K(СБ) – коэффициент фильтрации на момент времени t при накоплении бактериальной массы до величины СБ(t); α – эмпирический коэффициент, для средне- и мелкозернистых песков $\alpha = 0{,}5$.

Таблица 9

Микробиологическая пораженность верхнекотлинских глин венда в зависимости от их положения в разрезе и уровня загрязнения

Положение в разрезе	Содержание СБ (мкг/г) в зоне		Глубина залегания кровли глин, м
	с высоким уровнем загрязнения	с низким уровнем загрязнения	
Вне палеодолины	101-275/183(15)	20-40/30(8)	~ 27
Склон палеодолины	97-234/160(12)	68-89/77(8)	~ 40
Тальвег палеодолины	Нет данных	71-92/80(9)	~ 110

Песчаные разности различного гранулометрического состава, в которых отмечается активная микробиологическая деятельность, часто проявляют плывунные свойства. Повышение содержания газов в поровой воде песков ускоряет их переход в состояние «тяжелой газонасыщенной жидкости». Такое явление без учета влияния техногенного фактора, признанное как открытие, было установлено В.В.Радиной еще в 1972-1973 гг. В микробиологически пораженных песках наблюдается снижение угла внутреннего трения до 12° и менее.

Одновременное воздействие анаэробных условий и микробиологической пораженности существенно влияет и на глинистые породы. В практике застройки новых районов, а также реконструкции ряда зданий в историческом центре Санкт-Петербурга важную роль играют моренные образования, которые обычно рассматриваются как несущий горизонт для свайных фундаментов. Выполненный анализ условий формирования и техногенеза глинистой морены на основе результатов экспериментальных исследований их состояния и свойств позволил выделить типовые разрезы, в пределах которых наблюдается различие в протекании процессов, определяющих инженерно-геологические особенности этих

отложений и их уязвимость при загрязнении: I – морена окислительной зоны разреза; II морена в микроаэрофильных или восстановительных условиях за счет ее перекрытия чехлом глинистых отложений без растительных остатков (озерно-ледниковые); III – морена в восстановительных условиях под мощной толщей отложений с растительными остатками (литориновые, прослои торфа); IV – морена в восстановительных условиях, залегающая непосредственно под болотными отложениями. Наличие или отсутствие цементационных связей в моренах в значительной степени определяется формированием окислительно-восстановительной обстановки в зависимости от пространственного положения моренной толщи (табл.10).

Таблица 10

Влажность (W), показатели консистенции (I_L), прочности (сцепление C, угол внутреннего трения φ) и модуль общей деформации (E_0) моренных супесей и суглинков по типовым разрезам

Разрез	W, д.е	I_L	C, МПа	φ, град	E_0, МПа
I	0,08	< 0,25	> 0,15-0,32	> 15-25	≥ 40-50
II	0,14-0,17	0,25-0,45	0,04-0,07	6-10	2,4-4,3
III, IV	0,16-0,19	0,25-0,50	0,03-0,05	0-7	2,1-3,6

При условии контаминации разреза стоками, содержащими органические соединения, а также микробиоту, наиболее заметное снижение параметров прочности и модуля общей деформации происходит в разрезах морен I типа, причем изменения могут наблюдаться в течение сравнительно короткого времени:

Показатели	E_0, МПа	φ, град	C, МПа
В окислительной обстановке при фоновом содержании СБ < 30 мкг/г	> 25	>15	0,15-0,22
В восстановительной обстановке при СБ=65÷136 мкг/г	2,0-8,0	<10	0.03-0,11

При загрязнении морен II типа наблюдается медленное снижение их прочности на 25-30 %; обычно эти отложения переходят в квазипластичные разности. При формировании морены в бескислородной среде (III-IV типы) отложения обнаруживают выраженную склонность к развитию пластических деформаций, особенно в разрезах IV типа. В глинистых моренах под болотами появляются все признаки оглеения: сизые, темно-серые, голубоватые и зеленоватые оттенки, более высокая степень дисперсности, аномальная микробиологическая пораженность, в отдельных случаях повышенное содержание биохимических газов.

Необходимо учитывать возможные негативные изменения озерно-ледниковых отложений, которые служат основанием зданий в южной части города. При загрязнении этих отложений и развитии микрофлоры на фоне заметного роста СБ наблюдается снижение прочности τ. Закономерность такого изменения прочности озерно-ледниковых отложений во времени и величины СБ может быть аппроксимирована эмпирическим уравнением

$$\tau(t) = A\tau_0 \exp[-\alpha(СБ_t - СБ_0)] \pm 0{,}004 \text{ МПа} \quad (\text{при } r = 0{,}95),$$

где τ_0 – прочность грунта на начальном этапе при фиксированном содержании $СБ_0$; $\tau(t)$ – прочность на момент времени t при накоплении бактериальной массы до значения $СБ_t$; α – эмпирический коэффициент, зависящий от окислительно-восстановительных условий и изменяющийся в нашем случае от 0,002 (восстановительная зона) до 0,04 (окислительная зона); A – эмпирический коэффициент, учитывающий изменение состава грунтов.

Эти данные получены на специально оборудованном полигоне при условии загрязнения грунтовых вод дизельным топливом. В разрезе низкой литориновой террасы

при высоком уровне микробиологической пораженности (см. табл.7, 8) эти породы характеризуются пластическим характером деформирования и низкими значениями прочности ($\varphi \leq 4\text{-}6^\circ$ и $C \leq 0{,}02$ МПа).

Постепенное падение прочности пород в основании сооружений приводит к снижению их несущей способности, дополнительным и часто неравномерным осадкам, что может вызвать переход сооружений в аварийное и предаварийное состояние.

Следовательно, научно-практическое сопровождение проектирования, строительства, эксплуатации и реконструкции сооружений различного назначения должно базироваться на анализе специфики контаминации подземного пространства во времени и ее влияния на изменение несущей способности песчано-глинистых пород, определяющей устойчивость и безопасность функционирования исследуемых объектов.

При анализе работы системы «сооружение – горные породы» в пределах города необходимо принимать во внимание три основные группы факторов: 1) изменение напряженного состояния пород; 2) преобразование физико-химических условий за счет контаминации и изменения тепловлагообмена; 3) активизация микробиологической деятельности в ПП при поступлении питательных и энергетических субстратов, дополнительной микробиоты и действия отепляющего эффекта.

Для прогноза длительной устойчивости сооружений в пределах города необходима не только правильно выбранная расчетная схема, но и достоверность закладываемых в расчет показателей физико-механических свойств пород. Водонасыщенные глинистые породы четвертичного возраста Санкт-Петербурга, характеризующиеся малой, реже средней степенью литификации, низкой фильтрационной способностью, следует рассматривать как тонкопористую среду, развитие деформаций в которой происходит при отсутствии либо малой значимости процессов фильтрационной консолидации. В этом случае особое значение приобретает обоснование параметров сопротивления сдвигу и деформационной способности пород как квазисплошной среды при учете влияния их контаминации и степени микробиологической пораженности.

В настоящее время во многих случаях расчет устойчивости наземных сооружений в Санкт-Петербурге проводится с использованием параметров механических свойств C, φ, E_0, получаемых по номограммам ТСН 50-302-96 [8], исходя из значений показателя консистенции I_L и природной влажности W Существенное снижение параметра трения, модуля общей деформации и повышение величины сцепления глинистой морены наблюдается при ее испытании в условиях трехосного сжатия (по закрытой схеме, моделирующей возможность сохранения естественной влажности и плотности) по сравнению с теми же параметрами, полученными по номограммам ТСН (табл.11). Особенно заметная разница отмечается в значениях E_0.

Таблица 11

Сравнительная оценка показателей механических свойств моренных суглинков зоны интенсивного загрязнения (тальвеговая и склоновая часть палеодолины, ВО)

W, д.е	I_L,д.е	Показатели механических свойств		
		C, МПа	φ, град	E_0, МПа
0,125	–0,11	0,034/0,149	28/3	16,2/2,4
0,199	0,25	0,025/0,110	24/3	10,0/2,1
0,187	0,31	0,024/0,07	25/0	11,9/1,3
0,218	0,41	0,020/0,045	23/4	10,8/1,3
0,240	0,55	0,017/0,040	22/3	9.9/1,2
0,240	0,80	0,013/0,032	22/0	11,2/0,9

Примечание. В числителе данные по номограммам ТСН, в знаменателе по результатам экспериментальных исследований СПГГИ.

Определение расчетного сопротивления R_1 с применением C и φ согласно приложению 1 ТСН и полученных прямыми методами в условиях трехосного сжатия R_2 показало, что при использовании параметров сопротивления сдвигу по ТСН для туго-, мягко- и текучепластичных разностей глинистых пород наблюдается завышение R_1 (табл.12).

Таблица 12

Сравнительная оценка расчетных сопротивлений с использованием параметров сопротивления сдвигу по ТСН (R_1) и результатам трехосных испытаний (R_2)

I_L	R_1	R_2	R_1/R_2
<0	0,49	0,55	0,89
0,25	0,36	0,42	0,86
0,31	0,356	0,256	1,39
0,41	0,29	0,21	1,38
0,55	0,28	0,18	1,55
0,80	0,25	0,14	1,78

Примечание. Определение R произведено для $b = 4$ м и $h_ф = 2$ м.

Опыт строительства и эксплуатации зданий в Санкт-Петербурге свидетельствует о том, что реальные осадки $S_{реал}$ в ряде случаев могут значительно превосходить расчетные значения $S_{расч}$. Это подтверждают результаты наблюдений за осадками зданий, возведенных на мощной толще сильно загрязненных четвертичных отложений (северо-западная часть ВО) (табл.13) [3]. При проектировании рассматриваемых зданий были использованы завышенные значения E_o, полученные по компрессионным испытаниям, по сравнению с реальной деформационной способностью пород. Выполненные обратные расчеты модулей общей деформации $E_o^{расч}$ показали, что существует их удовлетворительная сходимость с E_o, полученных по результатам трехосных испытаний.

Таблица 13

Значения модуля общей деформации $E_o^{расч}$ моренной толщи, полученные методом обратных расчетов по результатам наблюдений за реальными осадками зданий

Адрес	Тип фундамента	$S_{расч}$, см	$S_{реал}$ на 1985 г., см		$E_o^{расч}$, МПа
			средняя	максимальная	
Наличная, д.36/2	Плита 18 × 90 м	20-25	75	90	2,0
Наличная, д.36/4	Плита 18 × 90 м	20-25	60	75	1,6
Наличная, д.36/6	Сваи 32 м	8	25	30	1,7

Постепенное снижение несущей способности песчано-глинистых грунтов в основании исторических зданий за счет неблагоприятной геоэкологической обстановки в ПП создает предпосылки для их перехода в аварийное, либо предаварийное состояние.

Следует отметить, что в условиях высокой загрязненности грунтовых вод на территории города, в первую очередь, в его историческом центре, все строительные материалы подвергаются воздействию основных видов коррозии; пористые – физической, физико-химической и химической вследствие способности реагировать с водными растворами в процессе фильтрации, капиллярного подсоса, увлажнения при конденсации влаги в пористой среде и пр. Коррозионное повреждение металлов связано, преимущественно, с протеканием электрохимических процессов. Развитию таких процессов в ПП города способствуют значительное содержание в грунтовых водах растворенных солей (в том числе сульфатов, хлоридов, солей аммония, тяжелых металлов и др.), наличие агрессивной углекислоты, растворенных и эмульгированных органических поллютантов и пр.

Однако одной из основных причин коррозионного разрушения подземных конструкций в ПП города служит развитие особого вида коррозии, связанной с активизацией деятельности микробиологической компоненты в обводненных грунтах, – биокоррозии. По данным современных микробиологических исследований биокоррозия вызывается бактериями, грибами, микроводорослями, причем деятельность

этих микроорганизмов, в большинстве случаев, сопутствует и усиливает химическое, электрохимическое и другие виды коррозионного воздействия. Установлено, что наибольшую роль в коррозии играют бактерии и грибы. Культуры последних, как уже было показано ранее (см. табл.6), характерны для болотных отложений.

Бактериальное разрушение строительных материалов реализуется преимущественно путем создания агрессивных сред за счет накопления таких продуктов метаболизма бактерий, как минеральные и органические кислоты (HNO_2, HNO_3, H_2SO_4, CH_3COOH и др.), агрессивные газы (CO_2, H_2S, NH_3) и др., а также за счет непосредственной деятельности самих микроорганизмов. Образование минеральных кислот имеет место в аэробных и микроаэрофильных условиях в результате деятельности аэробных нитрифицирующих (HNO_2 Nitrosomonas, HNO_3 Nitrobacter) и тионовых бактерий (H_2SO_4 Thiobacillus). Деятельность этих бактерий вызывает разрушение бетонов, строительных материалов на основе цементов и извести, содержащих силикаты и алюминаты кальция, а также карбонатные соединения, за счет образования растворимых солей азотной и серной кислоты и их последующего выноса.

Анализ состояния кладки стен и фундаментов одного из памятников архитектуры и культуры середины XIX века – зданий Нового Эрмитажа подтвердил большую роль биокоррозии в разрушении почти всех видов строительным материалов, используемых при возведении этого комплекса. Более 40 % объема кладки (кирпич и известковый раствор) дезинтегрировано и местами превратилось в тонкодисперсный материал. В водных вытяжках, приготовленных из такого материала, были обнаружены нитраты, нитриты и сульфаты (продукты жизнедеятельности указанных выше бактерий), причем содержание последних достигало 200 мг/л, а в отдельных вытяжках из разрушенного кирпича стен подвалов превышало 600 мг/л. Биохимическое происхождение этих солей было подтверждено высоким содержанием микробной биомассы (СБ), выявленных в тех же пробах дезинтегрироавнного кирпичного материала.

Следует отметить, что еще в 1915 г. проф. Б.А.Исаченко отмечал разрушение кирпича в стенах и подвалах многих домов Санкт-Петербурга. Исследование белого кристаллического налета, который образовался на кирпичной кладке, показало присутствие солей серной и азотной кислоты, что вполне согласуется с данными наших исследований. Микробиологический анализ подтвердил наличие нитрифицирующих и тионовых бактерий. Эти же группы бактерий были выявлены английскими учеными (S. Peine, P Lingood, F Schimer, T. Thrupp) в 30-х годах XX века при обследовании каменных зданий. Еще ранее, в конце XIX века появление налетов солей азотной кислоты на каменных и кирпичных строениях было зафиксировано в Германии (U.Helm, 1894) и Италии (G.Tolomei, 1894).

Вклад аэробных форм микробиоты в разрушение подземных частей фундаментов и других конструкций зданий и сооружений наблюдается только в зоне аэрации, которая в Санкт-Петербурге имеет относительно малую мощность. Следует иметь в виду преобладание восстановительных условий в разрезе территории города (особенно в его островной части) и соответственно активное развитие анаэробных микроорганизмов и их определяющую роль в процессах биокоррозии. Среди анаэробных бактерий наиболее опасными для строительных материалов являются сульфатредуцирующие бактерии, которые способны восстанавливать сульфаты (фиксируемые повсеместно в грунтовых водах города) с образованием сероводорода:

$$SO_4^{2-} + 8[H] \rightarrow H_2S + 2H_2O + 2OH^-$$

Образующийся сероводород агрессивен по отношению к пористым материалам (в первую очередь, к бетону) и металлам в виде раствора, имеющего кислотные свойства, и в виде газа (в газовоздушных средах с влажностью 40-50 %). Попадая в поры бетона, H_2S, в первую очередь, нейтрализует гидроксид

кальция, а затем вступает во взаимодействие с кристаллогидратами цементных минералов с образованием кальциевых солей различной растворимости, что и служит причиной разрушения бетонных и железобетонных конструкций*

Агрессивное воздействие сульфатредуцирующих бактерий на металлы следует оценивать с двух позиций: 1) прямое химическое воздействие биогенного сероводорода как соединения кислого характера; 2) активизация электрохимической коррозии. Сульфатредуцирующие бактерии имеют особую систему ферментов (гидрогеназа и оксидаза), способных непосредственно влиять на кинетику электродных процессов, инициируя катодные процессы (восстановление протонов). Кроме того, эти бактерии способны ускорять процесс катодной деполяризации (кислородная деполяризация не может быть реализована в анаэробных условиях), удаляя пассивирующий слой атмосферного водорода с катодной поверхности металла в процессе диссимиляторной сульфатредукции. Накопление продуктов коррозии (FeS, $Fe(OH)_2$ и др.) на поверхности металла приводит либо к ослаблению коррозионных процессов (при формировании плотной корки), либо к их усилению при образовании рыхлого непрочного слоя, что наблюдается чаще всего при коррозии чугуна.

Установлено, что 50 % всех потерь от коррозии подземных трубопроводов на городских территориях происходит за счет биокоррозии, причем при загрязнении ПП нефтепродуктами около 80 % подтверждений вызывается именно сульфатредуцирующими бактериями.

Важно отметить, что сульфатредуцирующие бактерии широко распространены в грунтовых биоценозах и подземных водах города в различных условиях аэрации – от строго анаэробных до микроаэрофильных, где они встречаются с факультативными и аэробными микроорганизмами. Особенно большое их количество отмечается в грунтовых водах, загрязненных канализационными стоками и нефтепродуктами (будучи гетеротрофами, они нуждаются в органических веществах). Активная сульфатредукция в песчано-глинистых грунтах зафиксирована на всех обследованных нами объектах города – по наличию запаха сероводорода при проходке скважин, появлению налета тонкодисперсного гидротроилита ($FeS\ nH_2O$) на поверхности грунтов при вскрытии монолитов, а также по результатам посевов на селективные питательные среды.

Наряду с сульфатредуцирующими бактериями, агрессивное воздействие на подземные конструкции оказывают анаэробные уролитические бактерии, широко распространенные в канализационных стоках. Они гидролизуют мочевину с образованием карбоната аммония, который разлагается затем с образованием углекислоты и аммиака, либо аммония в зависимости от величины pH. В таких условиях устойчивость бетонов снижается за счет генерации растворимой соли $CaSO_4(NH_4)_2SO_4\ 3H_2O$, которая либо вымывается из бетона, либо кристаллизуется (при высоких концентрациях), предопределяя развитие физической коррозии.

Особое место в биокоррозии занимают грибы, для которых характерны высокая адаптационная способность к изменению условий среды обитания: колебаний температуры, влажности, варьирование значений Eh, pH и др. Среди строительных материалов грибной коррозии наиболее подвержена древесина, широко применявшаяся для устройства фундаментов в XVIII-XIX вв. (лежни, сваи и др.). Грибы разлагают стенки клеточных оболочек, которые состоят из целлюлозы (главный компонент), лигнина, пектинов и др. Исследование остатков древесины лежней в конструкции фундаментов Нового Эрмитажа дало возможность убедиться в разнообразии возбудителей грибной коррозии, что фиксировалось по цвету и характеру изменения структуры древесины. Так, лигнинразрушающие грибы размягчают древесину – она легко разделяется на волокна; целлюлозоразрушающие – взывают разложение древесины, которое в обиходе принято называть гниением. Отдельные виды грибов способст-

Считается, что коррозионная устойчивость железобетона определяется устойчивостью бетона, поскольку коррозия арматуры начинается после разрушения защитного слоя бетона.

вуют «выщелачиванию» дерева – при визуальном сохранении структуры древесины ее плотность и прочность резко снижается (так плотность образца сосновой сваи в основании Казанского моста оказалась менее 0,3 г/см^3, тогда как этот параметр для неизмененной древесины сосны в воздушно-сухом состоянии составляет 0,53 г/см^3). Многие виды грибов вызывают окрашивание древесины: сумчатые в сине-серые цвета, Chlorosplenium – в зеленоватые, пенифоры и фузарии – красноватые оттенки и пр.

С учетом сказанного, воздействие микробиологической компоненты на состояние обводненной грунтовой толщи и подземные конструкции имеет место по всему разрезу подземного пространства города, и должно рассматриваться как региональный процесс. Однако глубина и интенсивность преобразования компонентов ПП на отдельных участках будет определяться сочетанием природных и техногенных факторов и их количественная оценка будет носить локальный характер.

С целью обеспечения сохранности и условий нормального функционирования архитектурно-исторических зданий и сооружений необходимо создать систему объектного мониторинга, включающую наблюдения и контроль за состоянием грунтов и подземных вод, газовыделением, а также характером развития деформаций сооружения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вторая пятилетка по канализации Ленинграда (1933-1937). Л.: Изд-во Леноблисполкома и Ленсовета, 1932. 135 с.

2. *Горький А.В.* Химическое загрязнение почво-грунтов / А.В.Горький, В.В.Решетов // Охрана окружающей среды, природопользование и обеспечение экологической безопасности в Санкт-Петербурге в 1998 г. СПб, 1999. С.296-308.

3. *Далматов Б.И.* Исследование деформаций грунтов в основании сооружений/ Б.И.Далматов, С.Н.Сотников, Н.М.Дорошкевич и др. // Труды 8-й международной конференции по геотехнике грунтов и фундаментостроению. М.: Стройиздат, 1973. С.64-72.

4. *Домонтович И.И.* Записка по проектам об отводе городских нечистот, составленная председателем комиссии по устройству в Санкт-Петербурге мостовых и труб для отвода нечистот. СПб, 1874. 403 с.

5. *Жуков А.И.* Канализация. М.: Стройиздат, 1969. 374 с.

6. Количественный учет влияния жизнедеятельности микроорганизмов на физико-механические свойства оглееных пород: Методические указания /В.М.Кнатько, Т.Н.Нижарадзе, Е.А.Пушнова, М.А.Трибулкина. Л.: Изд-во ЛГУ, 1988. 25 с.

7. *Рубенчик Л.И.* Микроорганизмы как фактор коррозии металлов и бетонов. Киев: Наукова Думка, 1950.

8. ТСН 50-302-96. Санкт-Петербург. Устройство фундаментов гражданских зданий и сооружений в Санкт-Петербурге и на территориях, административно подчиненных Санкт-Петербургу Б.И.Далматов, Н.Н.Морарескул, В.П.Вершинин, С.Н.Сотников и др. / Администрация Санкт-Петербурга. СПб, 1997. 96 с.

9. *Dashko R.* Regularities of the geotecnical assessment of Lower Cambrian clays in the Northwestern part of the Russian platform/I. Plechkova // Baltic Geotechnics, 95. A.A.Balkema / Rotterdam / Brookfield /. 1995. P.53-57.