УДК 624.131:551.435

Р.Э.ДАШКО, П.В.КОТЮКОВ
Санкт-Петербургский государственный горный институт (*технический университет*)

ИССЛЕДОВАНИЕ БИОАГРЕССИВНОСТИ ПОДЗЕМНОЙ СРЕДЫ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА ПО ОТНОШЕНИЮ К КОНСТРУКЦИОННЫМ МАТЕРИАЛАМ ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ И ФУНДАМЕНТОВ

Проанализированы основные природные и техногенные факторы, определяющие формирование и деятельность в подземном пространстве Санкт-Петербурга различных форм микробиоты. Приведены данные по характерной микрофлоре погребенных болот, способствующей развитию микроорганизмов в подстилающих грунтах. Рассмотрены процессы, оказывающие влияние на генерацию окислительно-восстановительных и кислотно-щелочных условий в подземном пространстве, и жизнедеятельность различных физиологических групп микроорганизмов. На конкретных примерах прослежены особенности разрушения кирпичной кладки фундаментов, а также железобетонных и чугунных обделок некоторых транспортных тоннелей. Приведена сравнительная оценка химического состава водных вытяжек из разрушенных конструкционных материалов и новообразований (сталактитов и высолов). Охарактеризован метаболизм различных форм бактерий и микромицетов, который приводит к разрушению строительных материалов.

The main natural and man-caused factors which determinate vital activity of various microbiota in Saint-Petersburg underground space (US) was analyzed. Data of buried bogs characteristic microbial flora that conductive to microorganism's growth in underlying soils was cited. The processes affected on reductive-oxidative and acid-alkaline conditions generation and vital activity of various physiological groups of microorganisms in US was considered. Structural failure peculiarities of brickwork foundation, reinforced concrete and cast-iron linings in some transport tunnels were observed. Comparative evaluation of water extracts selected from fractured constructional materials and new formations on tunnel timbering chemical composition was presented. Metabolism of various bacteria and micro fungi that results in constructional materials structural failure was characterized.

В настоящее время работами СПГГИ доказано, что в подземном пространстве Санкт-Петербурга активно развиваются различные формы микробиоты. Этому способствует ряд природных и техногенных факторов. К природным факторам, активизирующим микробную деятельность, относятся: полная обводненность грунтов (зона аэрации в Санкт-Петербурге не превышает 2-2,5 м); застойный гидродинамический режим, особенно в исторической части города, за счет устройства набережных, шпунтовых ограждений рек и каналов; присутствие в разрезе погребенных болот и торфяников, а также грунтов, содержащих растительные остатки; эксгаляция радона, особенно по линиям тектонических разломов, вдоль которых прослеживаются погребенные долины.

Еще ранние исследования показали, что болота содержат разнообразную микрофлору, состав и численность которой зависят от окислительно-восстановительной и кислотно-щелочной обстановки подземной среды, а также степени разложения растительных остатков (табл.1, 2). Повышенные содержания радона в подземной среде (более 20-30 Бк/дм^3), способствуют активизации микробной деятельности и росту микробной биомассы в 5-7 раз [2].

Среди техногенных факторов, оказывающих воздействие на интенсивность жизнеспособности микроорганизмов, следует выделить контаминацию грунтовых вод ор-

ганическими и неорганическими поллютантами, которые можно рассматривать как питательные и энергетические субстраты для роста клеток. К ним могут быть отнесены компоненты жидких стоков из захороненных свалок хозяйственно-бытовых отходов и утечек из систем водоотведения. Кроме того, с жидкой фазой этих загрязнителей в подземную среду поступает микробиота. В одном миллиметре канализационно-бытовых стоков содержится 10^7-10^8 клеток микроорганизмов. Следует подчеркнуть, что канализационно-бытовые стоки имеют повышенную температуру, ускоряющую биохимические процессы. Температурная контаминация за счет отепляющего действия подземных коммуникаций, отапливаемых зданий и других тепловыделяющих сооружений активизирует деятельность микробиоты, поскольку ее основная масса относится к мезофильным микроорганизмам.

Таблица 1

Характерная микрофлора низинных болот

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

Контаминация приводит к росту минерализации подземных вод выше 1000-1500 мг/л, что вызывает активизацию деятельности микроорганизмов. Присутствие природной органики в воде, а также поступление органических соединений техногенного генезиса способствует формированию восстановительных условий в подземной среде. Замеры Eh грунтовых вод в режимных скважинах города показали, что на большей его территории величина Eh значительно ниже нуля и изменяется в широких пределах от –1 до –127 мВ и лишь в одной зоне были обнаружены значения +33 мВ при pH = 6,84-7,69.

Таблица 2

Микробная биомасса и соотношение ее компонентов в различных торфяниках (А.В.Головченко, 1993)

Тип торфяника	Мощность торфяника, м		Общий вес сухой биомассы, т/га	Биомасса, %			
				Грибной мицелий	Споры грибов	Актиномицеты	Бактерии
Низинный высокозольный	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 нормальнозольный	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	3,5	43	59,1	23,4	1,3	16,2

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

Образующиеся живые и мертвые клетки микроорганизмов, а также продукты их метаболизма вступают в активное взаимодействие с грунтами и конструкционными материалами, изменяя их состояние и свойства. Деятельность микроорганизмов в подземном пространстве мегаполисов должна рассматриваться с позитивной и негативной сторон. Известно, что даже почвенная микробиота способна преобразовывать нефтяные углеводороды (НУ) – керосин, соляровое масло, мазут, а также битумы. Биодеградация НУ сопровождается накоплением большого количества биомассы в грунтах, активным выделением CO_2 и воды.

К негативным последствиям деятельности микроорганизмов можно отнести: ухудшение состояния, водных и физико-механических свойств грунтов, переход песков в плывуны и глинистых грунтов в тиксотропные разности; коррозия строительных материалов и др. Процесс необратимого ухудшения характеристик и свойств строительных материалов конструкций зданий и сооружений (бетона, металла, дерева и др.) в результате физического и(или) химического, либо физико-химического воздействия, вызываемого жизнедеятельностью макро- и микроорганизмов, получил название «биокоррозия» или «биоповреждение».

Микробиологическая коррозия строительных материалов может идти различными путями: непосредственное воздействие метаболитов (газов CO_2; NH_3; H_2S; органических и неорганических кислот); образование продуктов, например, ферментов, создающих среды, которые действуют как катализаторы коррозионных реакций; коррозионные реакции – отдельная часть метаболического цикла жизнедеятельности микробиоты.

В зависимости от окислительно-восстановительных и кислотно-щелочных условий возбудителями биокоррозии могут быть аэробные, анаэробные или факультативные формы микоорганизмов.

В аэробной среде наиболее активными биодеструкторами в подземном пространстве являются нитрифицирующие, тионовые бактерии и железобактерии. Так, например, в водных вытяжках из деградированной кирпичной кладки фундаментов Нового Эрмитажа выявлено аномальное содержание нитратов и сульфатов, установлено высокое содержание бактериальной массы по величине суммарного микробного белка. Нитрифицирующие и тионовые бактерии, обнаруженные в бетонах и тампонажном растворе подземных тоннелей города, способствуют деградации цементных минералов и их переводу в легкорастворимые соединения. В металлических конструкциях транспортных тоннелей глубокого заложения в Санкт-Петербурге обнаружено большое количество железобактерий в составе богатого биоценоза. При этом чугунная обделка расслаивается, превращаясь в труху, содержащую растворимые соединения. Менее активно разрушаются железобетонные тюбинги. Кроме того, на тюбингах формируются новообразования в виде сталактитов, натечных форм, высолов и пр. (табл.3).

Обращают на себя внимание аномально высокие значения содержания органических соединений (ХПК) и биологического потребления кислорода ($БПК_5$) в водных вытяжках из разрушенных материалов тюбингов (чугун и железобетон) и новообразований, что свидетельствует об активности протекания биокоррозии наряду с химическими процессами растворения и выщелачивания компонентов конструкционных материалов [1]. Высокие концентрации хлоридов связаны с воздействием напорных вод нижнекотлинского горизонта, залегающего ниже подошвы тоннелей. Эти воды имеют хлоридный натриевый состав с минерализацией 3000-5000 мг/дм^3. Следует отметить, что максимальная численность микробных сообществ наблюдается в местах разгрузки подземных вод в тоннели, где прослеживается благоприятная обстановка водного режима и поступление питательных субстратов для микробиоты.

Активное участие в разрушении пористых строительных материалов принимают денитрифицирующие бактерии, которые образуют коррозионно активные метаболиты (NH_3; CO_2; H_2S, органические кислоты).

Наибольшее распространение в подземном пространстве Санкт-Петербурга получили анаэробные формы микроорганизмов, среди которых можно выделить сульфатредуцирующие и целлюлозоразлагающие бактерии. Сульфатредуцирующие бактерии восстанавливают сульфаты до H_2S, который агрессивен по отношению к бетонам и металлам. Попадая в поры бетона, H_2S нейтрализует гидроксид кальция, а затем вступает во взаимодействие с кристаллогидратами цементных минералов с образованием кальциевых солей различной растворимости. Агрессивное воздействие сульфатредуцирующих бактерий на металлы следует оценивать с двух позиций: прямое химическое воздействие биогенного сероводорода как соединения кислого характера; активизация электрохимической коррозии. Установлено, что 50 % всех потерь от коррозии подземных трубопроводов на городских территориях происходит за счет биокоррозии при активном участии сульфатредуцирующих бактерий.

Биокоррозия значительно усиливается, если совместно с бактериями развиваются микромицеты. Из железобетонных и чугунных обделок подземных транспортных тоннелей Санкт-Петербурга в результате проведенных работ выделено более 100 видов микромицетов, 80 % из которых относятся к активным биодеструкторам. Максимальная

Таблица 3

Результаты исследований химического состава водных вытяжек из различных строительных материалов в транспортных тоннелях исторического центра Санкт-Петербурга

Определяемые показатели	Состав водных вытяжек из образцов разрушенных конструкционных материалов и новообразований			
	Разрушенный железобетон	Разрушенный чугун	Сталактиты с ребер жесткости тюбингов	Высолы на тюбингах с микробной слизью
pH	7,4	9,8	9,9	9,7
Перманганатная окисляемость, мг O_2/дм^3	2994,9	11270	3049,8	2667,6
ХПК, мг O_2/дм^3	4608,4	17960	3971,9	4178,8
$БПК_5$, мг O_2/дм^3	2082,5	9114	2548,1	1965,2
Жесткость, ммоль/дм^3	9,4	1,8	0,5	3,3
Азот аммонийный, мг/дм^3	12,4	5,1	1,9	5,1
Хлориды, мг/дм^3	3474,1	1207,6	5672	3545
Гидрокарбонаты, мг/дм^3	141	2004,5	619,1	564
Сульфаты, мг/дм^3	636	3127	682	635,5
Карбонаты, мг/дм^3	1	891,9	318,7	249,9
Нитраты, мг/дм^3	14,6	1,9	3,5	1,4
Кремниевая кислота, мг/дм^3	38	37,8	1	1
Гидраты (гидрооксиды), мг/дм^3	<1	<1	<1	<1
Натрий + калий, мг/дм^3	2411,5	3356	4354	2839
Кальций, мг/дм^3	150,7	27,1	7,7	49,6
Магний, мг/дм^3	22,9	5,6	1,4	10
Алюминий, мг/дм^3	0,01	0,01	0,42	0,01
Железо общее, мг/дм^3	0,67	1	0,34	0,55
Сухой остаток, мг/дм^3	6851,4	9998	77454	7713

Примечание. Перегонные тоннели пройдены в коренных глинах верхнего венда под погребенной долиной пра-Невы над высоконапорным нижнекотлинским водоносным горизонтом.

численность микромицетов (1400 КОЕ на 1 г субстрата) выявлена в новообразованиях, в остальных пробах количество микромицетов варьировало в широких пределах – от 200 до 1000 КОЕ на 1 г. Приведенные значения характерны для тоннелей с глубиной заложения более 80 м. При снижении глубины размещения тоннелей величины КОЕ в разрушающихся конструкционных материалах существенно возрастают. Кроме того, микромицеты поражают древесину подземных конструкций старинных зданий и сооружений. Подобный тип коррозии наблюдался при исследовании свай Казанского моста, в лежнях некоторой части фундаментов Мариинского театра и Эрмитажа.

О необходимости учета биотической составляющей при проектировании и эксплуатации зданий и сооружений различного назначения свидетельствуют вышедшие в 2006 г. Региональные временные строительные нормы (РВСН 20-01-2006) «Защита строительных конструкций зданий и сооружений от агрессивных химических и биологических воздействий окружающей среды» для условий Санкт-Петербурга [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Биоповреждения и биокоррозия в строительстве: Материалы международной научно-технической конференции // Мордовский университет. Саранск, 2004. 256 с.

2. *Дашко Р.Э.* Микробиота в геологической среде: ее роль и последствия / Сергеевские чтения. Вып.2: Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (23-24 марта 2000). М.: ГЕОС, 2000. С.72-78.

3. Региональные временные строительные нормы. Защита строительных конструкций, зданий и сооружений от агрессивных химических и биологических воздействий окружающей среды. РВСН 20-01-2006. СПб: Стройиздат, 2006. 50 с.