УДК 624.131:551.3

Р.Э.ДАШКО, Е.Ю.ШАТСКАЯ
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)
Д.Ю.ВЛАСОВ
Санкт-Петербургский государственный университет

НЕКОТОРЫЕ ДАННЫЕ О ПРИЧИНАХ РАЗРУШЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ

Рассмотрены основные природные и техногенные факторы, определяющие природу и механику разрушений обделок глубоких подземных тоннельных конструкций. На основании проведенных исследований в подземных выработках выполнена систематизация основных форм разрушения. Исследован состав водных вытяжек, приготовленных из разрушенных бетонов и различных форм новообразований. Выполнены определения численности и типов микроорганизмов – микромицетов, бактерий и актиномицетов. По результатам экспериментальных исследований сделан вывод о роли биокоррозии в разрушении тюбингов и гидроизоляционной рубашки. Особое внимание обращено на воздействие напорных вод нижнекотлинского водоносного горизонта, создающего благоприятные условия для развития микробиоты и ее агрессивного воздействия на конструкционные материалы.

In the paper the basic natural and technogenic factors defining nature and mechanics of timbering destructions in deep underground tunnel constructions are considered. On the basis of the lead inspections in underground developments is executed the systematization of the basic forms of destruction. The composition of the water extracts prepared from destroyed concrete and new various growths is investigated. Definitions of number and species of micro-organisms – fungi, bacteria and actinomycetes are executed. By results of experimental researches it is drawn a conclusion on a role of biocorrosion in destruction tubing and a waterproofing lining. The special attention is turned on influence of pressure head waters kotlinskbottom water the horizon creating favorable conditions for development microbiota and its aggressive influence on construction materials.

В настоящее время подземное пространство городов следует рассматривать как многокомпонентную систему: порода + подземные воды + микробиота + газовая составляющая + сооружения. Взаимодействие между этими компонентами будет определять безопасность и эксплуатационную надежность подземных конструкций сооружений, а также длительную устойчивость строительных материалов при наличии агрессивности водонасыщенной подземной среды. Степень коррозионной активности подземной среды Санкт-Петербурга будет определяться рядом природных и техногенных факторов.[*] Среди первых следует выделить следующее: наличие природной микробиоты в разрезе города, что предопределено широким распространением болот, торфяников и песчано-глинистых грунтов, содержащих органические остатки в верхней части разреза четвертичных отложений; повсеместная и постоянная обводненность разреза поддерживает активную микробную деятельность, эксгаляция радона вдоль зон тектонических разломов, а также вне их – рост численности микроорганизмов.

Среди техногенных факторов, способствующих привносу, развитию и активизации микробной деятельности, следует отметить наличие старых захороненных свалок

[*] *Дашко Р.Э.* Микробиота в геологической среде: ее роль и последствия // Биоповреждения и биокоррозия в строительстве. Саранск: Изд-во Мордовского ун-та, 2004. С.34-39.

хозяйственно-бытовых отходов 18-19 вв., несанкционированных кладбищ (первая половина 18 в.), постоянные утечки из систем водоотведения. Кроме того, деятельность микроорганизмов активизируется под отепляющем действием обогреваемых наземных и подземных сооружений, при повышении минерализации подземных вод при их загрязнении, изменении окислительно-восстановительной обстановки. Повреждение конструкционных материалов подземных сооружений при взаимодействии со вмещающими средами может происходить за счет деятельности микроорганизмов, что не учитывается действующими нормами при проектировании тоннелей и метрополитенов.

Анализ причин разрушения конструкционных материалов проводится на основе обследования перегонных тоннелей в историческом центре Санкт-Петербурга по трассам «Невский проспект» – «Горьковская» и «Гостиный двор» – «Василеостровская». Эти трассы проложены под глубокой погребенной долиной Пра-Невы в коренных породах верхнего венда, которые являются водоупором нижнекотлинского водоносного горизонта, гидродинамический режим которого зависит от интенсивности его эксплуатации и объемов водозабора. Глубина и положение тальвега долины предопределили глубину проходки перегонных тоннелей и собственно их положение относительно кровли нижнекотлинского напорного водоносного горизонта. Верхнекотлинские глины, в которых размещаются тоннели, характеризуются как трещиновато-блочная среда, при этом в верхней части разреза прослеживается наиболее высокая степень трещиноватости, сформированная под воздействием тектонических и нетектонических факторов.

Согласно характеру расположения подземного контура погребенной долины Пра-Невы трассы перегонных тоннелей могут быть разделены на три зоны: левобережная и правобережная склоновые части погребенной долины и центральная часть, проходящая под тальвегом погребенной долины. Самым сложным и неблагоприятным является участок перегонных тоннелей, проходящий под тальвегом долины. Мощность целика глин либо толщи переслаивания глин с песчаниками от подошвы тоннеля до кровли нижнекотлинского водоносного горизонта не превышает 7 м. Интенсивная трещиноватость вмещающих пород предопределяет восходящее перетекание хлоридных натриевых вод нижнекотлинского водоносного горизонта с минерализацией 3-5 г/л в тоннели через различные дефекты в гидроизоляционной рубашке, а также в тюбингах, привнося с собой активную микробиоту.

Исследования шведских микробиологов показали, что минерализованные воды кристаллического фундамента на глубинах 450 м содержат микроорганизмы, которые интенсивно потребляют органические соединения.* Поскольку погребенные долины заложены вдоль тектонических разломов, в которых реализуется связь нижнекотлинского водоносного горизонта с более минерализованными водами фундаментов, то существует высокая степень вероятности поступления микробного сообщества из глубоких водоносных горизонтов кристаллических пород, помимо ее миграции с нисходящим потоком подземных вод из верхних микробно пораженных слоев.

Обследование трасс перегонных тоннелей показало, что в перегонных тоннелях происходит коррозионное разрушение материала железобетонных тюбингов, наблюдается расслаивание чугунной обделки, образование слизи на тюбингах, а также наблюдается выщелачивание тампонажного раствора гидроизоляционной рубашки по стыкам между тюбингами, высачивание и капеж подземных вод через тело тюбингов по болтовым соединениям, сопровождающиеся образованием высолов и натечных форм – сталактитов. В процессе обследования тоннеля были отобраны пробы разрушенных материалов и различных новообразований для последующего анализа и оценки природы и механизма разрушения конструкционных материалов. Этот момент имеет принципиальное значение, поскольку раскрытие сути

* *Nielsen M.E., Fisk M.R., Istok J.D.* Microbial nitrate respiration of lactate at *in situ* conditions in ground water from a granitic aquifer situated 450 m underground // Geobiology. 2006. № 4. P.43-52.

процесса деградации материалов позволяет определить основные направления мероприятий по защите подземных конструкций.

Следует отметить, что при создании гидроизоляционных слоев широко используется пакля, которая должна рассматриваться в качестве дополнительного питательного субстрата для целлюлозоразлагающих бактерий. Такие органические материалы, как битумы, которые широко применяются в практике ведения строительных и ремонтных работ в тоннелях для создания антикоррозионной защиты тюбингов, при наличии активного биоценоза подземной среды также служат питательным и энергитическим субстратом для микроорганизмов. При обследовании состояния тюбингов отмечались определенные стадии микробной деградации битумов и пакли.

При сравнении результатов водных вытяжек, изготовленных из разрушенных материалов по трассам тоннелей, было отмечено, что максимальное содержание хлоридных натриевых соединений генерируется на тюбингах перегона «Гостиный двор» – «Василеостровская» по сравнению с отремонтированными в 2005 г. тоннелями трассы «Невский проспект» – «Горьковская», что может быть объяснено достаточной выщелочностью гидрорубашки и частично бетонов тюбингов. Вместе с тем, по трассе «Невский проспект» – «Горьковская» в водных вытяжках из новообразований и разрушенных материалов возрастает концентрация гидрокарбонатов и карбонатов до 10000 мг/дм^3, что объясняется начальным этапом выноса цементных минералов – алюминатов, силикатов и гидрооксидов кальция из гидроизоляционной рубашки, а затем тюбингов. Высокое содержание сульфатов в водных вытяжках вызвано разрушением тампонажных растворов, в составе которых содержится гидросульфоалюминат кальция и гипс. Значение $БПК_5$ и перманганатной окисляемости в водных вытяжках из проб по трассе «Невский проспект» – «Горьковская» существенно ниже по сравнению с теми же показателями в водных вытяжках, отобранных по трассе «Гостиный двор» – «Василеостровская», что связано, очевидно, с менее активной микробной деятельностью (табл.1, 2).

Таблица 1

Результаты сравнительного анализа химического состава водных вытяжек из разрушенного бетона по перегонным тоннелям «Василеостровская» – «Гостиный двор» (ПК 158+30; 159+15) и «Невский проспект» – «Горьковская» (ПК 139+07)

Определяемые показатели	Численные значения		Сравнительная характеристика химического состава водных вытяжек	Место отбора проб относительно погребенной долины и водоносного горизонта
	«Василеостровская» – «Гостиный двор»	«Невский проспект» – «Горьковская»		
pH, ед. pH	11,1	9,8	В перегонном тоннеле «Невский проспект» – «Горьковская» происходит формирование солей сульфатов, гидрокарбонатов и карбонатов натрия. В тоннеле «Василеостровская» – «Гостиный двор» основной состав водной вытяжки – хлоридно-натриевый, что свидетельствует, прежде всего, о химическом действии напорных минерализованных вод нижнекотлинского водоносного горизонта	Тоннель «Невский проспект» – «Горьковская» проходит в пределах нижней части склона погребенной долины, нижнекотлинский водоносный горизонт находится на глубине 21 м от подошвы тоннеля, градиент напора составляет 4,85. Перегон «Василеостровская» – «Гостиный двор» находится под тальвеговой частью погребенной долины, мощность целика между подошвой тоннеля и кровлей нижнекотлинского водоносного горизонта составляет 10 м, градиент напора 9,3
Перманганатная окисляемость, мг O_2/дм^3	32,3	664,4		
ХПК, мг O_2/дм^3	92,5	**1241,5**		
$БПК_5$, мг O_2/дм^3	21,4	181,3		
Хлориды, мг/дм^3	**5398,4**	638,1		
Гидрокарбонаты, мг/дм^3	15,3	**2506,8**		
Сульфаты, мг/дм^3	113,6	**2908,8**		
Карбонаты, мг/дм^3	93,3	**1176,2**		
Кремниевая кислота, мг/дм^3	10,9	17,8		
Натрий + калий, мг/дм^3	**2751,1**	**3240,9**		
Кальций, мг/дм^3	647,2	4,8		
Алюминий, мг/дм^3	0,21	0,67		
Сухой остаток, мг/дм^3	9117,5	10211,4		

Таблица 2

Результаты сравнительного анализа химического состава водных вытяжек из сталактитов по перегонным тоннелям «Василеостровская» – «Гостиный двор» (ПК 173+28; 175+39; 175+61) и «Невский проспект» – «Горьковская» (ПК 130+43; 132+71; 133+01; 126+28, тоннель 1)

Определяемые показатели	Численные значения		Сравнительная характеристика химического состава водных вытяжек	Место отбора проб относительно погребенной долины и водоносного горизонта
	«Василеостровская» – «Гостиный двор»	«Невский проспект» – «Горьковская»		
pH, ед. pH	9,9	9,0	Сталактиты техногенного происхождения из тоннеля «Василеостровская» – «Гостиный двор» имеют смешанный состав в условиях преобладания хлоридов натрия. В тоннеле «Невский проспект» – «Горьковская» в составе сталактитов превалируют соли гидрокарбонатов, сульфатов и хлоридов натрия, подчиненное значение имеют карбонаты натрия и калия	Тоннели проходят под склоновой частью погребенной долины. Мощность целика коренных пород до нижнекотлинского водоносного горизонта на перегоне «Невский проспект» – «Горьковская» составляет 15 м (градиент напора 7,64), «Василеостровская» – «Гостиный двор» – 72 м от подошвы тоннеля (градиент напора 1,3)
Перманганатная окисляемость, мг O_2/дм^3	**3049,8**	506,9		
ХПК, мг O_2/дм^3	**3971,9**	**8316,0**		
БПК$_5$, мг O_2/дм^3	**2548,1**	240,1		
Хлориды, мг/дм^3	**5672,0**	**2268,8**		
Гидрокарбонаты, мг/дм^3	619,1	**7503,6**		
Сульфаты, мг/дм^3	682	**6181,2**		
Карбонаты, мг/дм^3	318,7	465,0		
Кремниевая кислота, мг/дм^3	1,0	10,6		
Натрий + калий, мг/дм^3	**4354**	**7107,5**		
Кальций, мг/дм^3	7,7	221,6		
Алюминий, мг/дм^3	0,42	<0,01		
Сухой остаток, мг/дм^3	77454	22113,4		

Микробиологические исследования разрушенных материалов проводились в Биологическом НИИ СПбГУ и НИИ экспериментальной медицины им. Пастера. Исследования включали микологический и бактериологический анализы материалов с определением качественного и количественного состава микробных сообществ. Максимальная численность микробных сообществ наблюдается в местах разгрузки подземных вод в тоннель и в присутствии пакли в наиболее благоприятной обстановке водного режима и в присутствии питательных субстратов. Ведущее место по численности на грамм субстрата принадлежит нитрифицирующим, тионовым и железобактериям, играющим ведущую роль в деструкции бетонных и металлических конструкций (табл.3).

Видовое разнообразие микромицетов на перегоне «Невский проспект» – «Горьковская» гораздо ниже, чем на перегоне «Гостиный двор» – «Василеостровская», что может быть связано с недавним ремонтом первого. По отремонтированному перегону лишь в двух пробах было зарегистрировано два-три вида микромицетов, тогда как на участке «Гостиный двор» – «Василеостровская» подавляющее число видов в пробе составляло от 4 до 6 для большинства отобранных образцов.

Определенное сходство сравниваемых перегонов проявляется в высокой встречаемости колонии дрожжей. Обилие дрожжевых организмов в изученных пробах указывает на довольно высокий уровень органического загрязнения в пораженных материалах. Вместе с определением видового состава грибов определялись их деструктивные свойства: около 50 % выделенных видов грибов обладает высокой деструктивной способностью (табл.4). Полученные данные указывают на существование довольно сложного по составу и структуре агрессивного микробного сообщества, которое играет существенную роль в процессах биодеградации строительных конструкций в подземном пространстве.

Таблица 3

Сравнительный анализ бактериальной составляющей по исследованным трассам перегонных тоннелей «Невский проспект» – «Горьковская» и «Гостиный двор» – «Василеостровская»

Характеристика пробы	Состав микроорганизмов (качественный анализ)	Количественная характеристика микроорганизмов, бактерий /г	
		«Невский проспект» – «Горьковская»	«Гостиный двор» – «Василеостровская»
Сталактиты на ребре жесткости	Нитрифицирующие бактерии	33000	12700
	Тионовые бактерии	1700	51000
	Клостридии	900	1300
Вынос тампонажного раствора с микробной деградацией пакли	Нитрифицирующие бактерии	13200	27500
	Клостридии	–	3100
	Bacillus cereus	900	7900
Натечные формы на чугунном тюбинге с признаками ожелезнения	Нитрифицирующие бактерии	42500	9200
	Bacillus cereus	2700	570
	Тионовые бактерии	6180	1300
Сталактиты и другие новообразования на ребрах жесткости	Нитрифицирующие бактерии	32100	57090
	Тионовые бактерии	740	32310
	Железобактерии	9800	41500

Таблица 4

Видовой состав, встречаемость и свойства микромицетов, обнаруженных в пробах разрушающихся материалов на перегонах «Невский проспект» – «Горьковская» и «Гостиный двор» – «Василеостровская»

Вид гриба	Деструктивные свойства		Потенциальная патогенность		Встречаемость в пробах, %	
	I	II	I	II	I	II
A. unguis	+	++	*	*	19	29
Chaetomium globosum	++	++	*	*	38	29
Cladosporium cladosporioides	++	++	*	*	19	29
C. sphaerospermum	++	Не опр.	*	Не опр.	31	Не опр.
P. diversum	+	Не опр.	–	Не опр.	6	Не опр.
U. chartarum	++	Не опр.	*	Не опр.	19	Не опр.
Mycelia sterilia	Не опр.	–	Не опр.	–	Не опр.	43

Примечания. Деструктивные свойства: ++ – активные биодеструкторы материалов и изделий; + – биодеструкторы материалов и изделий; (–) – деструктивные свойства не изучены.

Потенциальная патогенность: * – известны как потенциальные патогены; (–) – патогенные свойства не известны; Не опр. – на данном перегоне вид грибов и их свойства не определены.

Курсивом выделены доминирующие виды с частотой встречаемости 19 % и выше.

I – перегонный тоннель «Гостиный двор» – «Василеостровская», II – перегонный тоннель «Невский проспект» – «Горьковская».

Следовательно, ремонтные работы в тоннелях должны проводиться с учетом биогенной пораженности конструкций. Использованные материалы должны проверяться на микробную устойчивость. Поврежденные поверхности необходимо обрабатывать биоцидными растворами с предварительным высушиванием поверхности при температурах свыше 60 °С.