

# К ВОПРОСУ О РОЛИ БИОКОРРОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ПОДЗЕМНОЙ СРЕДЕ МЕГАПОЛИСОВ

## ON THE ISSUE OF THE ROLE OF BIOCORROSION PROCESSES IN THE UNDERGROUND ENVIRONMENT OF MEGALOPOLISES

**ДАШКО Р.Э.**

Профессор кафедры гидрогеологии и инженерной геологии  
Национального минерально-сырьевого университета «Горный»,  
д. г.-м. н., г. Санкт-Петербург, regda2002@mail.ru

**АЛЕКСЕЕВ И.В.**

Ассистент кафедры гидрогеологии и инженерной геологии  
Национального минерально-сырьевого университета «Горный»,  
alekseew.ivan@gmail.com

**DASHKO R.E.**

Professor of the Department of Hydrogeology and Engineering Geology of  
the National Mineral Resources University (Mining University), DSc (doctor  
of science in Geology and Mineralogy), St. Petersburg, regda2002@mail.ru

**ALEKSEEV I.V.**

Assistant lecturer of the Department of Hydrogeology and Engineering  
Geology of the National Mineral Resources University (Mining University),  
St. Petersburg, alekseew.ivan@gmail.com

### Ключевые слова:

подземное пространство; конструкционные материалы; грунты;  
подземные воды; газы; микроорганизмы; биокоррозия.

### Key words:

underground space; constructional materials; soils; groundwater;  
gases; microorganisms; biocorrosion.

### Аннотация

**В статье на примере Санкт-Петербурга анализируется многокомпонентная система подземного пространства крупного города, составляющие которой как по отдельности, так и в совокупности с другими могут обладать агрессивными свойствами по отношению к конструкционным материалам. Подчеркивается особая роль микробиоты, деятельность которой в подземной среде анализируется как с позитивной, так и с негативной стороны. Рассматриваются основные природные и техногенные источники поступления микроорганизмов в подземное пространство. Перечисляются основные механизмы биокоррозионного разрушения конструкционных материалов. Отмечается, что биокоррозионная агрессивность подземной среды по отношению к строительным материалам в действующих нормативных документах не рассматривается. Особо подчеркивается важность изучения окислительно-восстановительных и кислотно-щелочных условий подземной среды, влияющих на ее коррозионную способность. Приводятся примеры развития биокоррозионных процессов в подвальных помещениях.**

### Abstract

**The article by the example of Saint-Petersburg analyzes the multicomponent system of the underground space of a large city, components of which can be aggressive to constructional materials (individually or in combination with other components). A special role of microbiota is emphasized. Its activity in the underground environment is analyzed from the positive and negative sides. The main natural and technogenic sources of inflow of microorganisms into the underground space are considered. The basic mechanisms of biocorrosion destruction of constructional materials are listed. It is noted that biocorrosion aggressiveness of the underground environment to constructional materials is not considered in the current normative documents. Significance of studying the oxidation-reduction and acid-base conditions influencing on the corrosion capability of the underground space is especially emphasized. Some examples of development of biocorrosion processes in basements are given.**

### Введение

В условиях городской застройки обеспечение эксплуатационной надежности зданий и сооружений, в том числе архитектурно-исторических памятников, а также проведение их реконструкции и ремонта являются первоочередными задачами. Их решение невозможно без сохранения целостности и несущей способности подземных частей сооружений.

Подземные конструкции следует рассматривать в рамках их взаимодействия с многокомпонентным подземным пространством, включающим дисперсные грунты, подземные воды, газовую составляющую и микробиоту, деятельность которой зачастую меняет состав, состояние и свойства грунтов, кислотно-щелочные и окислительно-восстановительные условия в водоносных горизонтах и водоупорах, а также вызывает развитие природных и природно-техногенных процессов, влияющих на безопасность освоения и использования подземного пространства. При этом необходимо учитывать, что каждый компонент как в отдельности, так и в совокупности с другими может обладать агрессивными свойствами по отношению к конструкционным материалам — металлам, бетонам, строительным растворам, кирпичу. Разрушение строительных материалов изменяет химический состав подземных вод, обогащая их кремниевой кислотой, щелочноземельными элементами, в меньшей степени сульфатами, железом и пр. Поэтому по составу подземных вод можно оценить процессы, протекающие при воздействии природных и техногенных факторов.

Установлено, что процесс биокоррозионного разрушения материалов происходит преимущественно двумя путями [1, 4]:

- в результате воздействия продуктов метаболизма микробиоты (органических и неорганических кислот, газов, ферментов);
- в результате извлечения из строительных материалов соединений, необходимых для жизнедеятельности микроорганизмов.

Кроме того, микроорганизмы могут непосредственно участвовать в электрохимических реакциях на поверхности корродируемого субстрата и ускорять их, способствуя более интенсивному разрушению материала.

Среди продуктов метаболизма микроорганизмов особое место занимают биохимические газы (растворимые и малорастворимые). Сероводород хорошо растворим, поэтому он влияет на агрессивность среды, подкисляя грунтовые воды. Метан, водород и азот относятся к малорастворимым газам. Их депонирование в грунтовой толще определяет формирование так называемого газодинамического давления, что способствует разуплотнению грунтов, а при вскрытии такой толщи может приводить к газогрязевым выбросам и самовозгоранию метана (при его взаимодействии с воздухом). Генерация молекулярного водорода в зонах заложения металлических конструкций повышает их хрупкость. Продукт дыхания микроорганизмов — углекислый газ — присутствует в подземных водах в различных количествах. Его содержание в подземной среде изменяется во времени в зависимости от активности микробной деятельности. Этот газ, как известно, определяет уровень углекислотной агрессивности водной среды по отношению к цементам, а также к известкам.

Цель настоящей работы — оценка влияния подземной микробиоты на развитие биокоррозии конструкционных материалов. Основными задачами при этом являются:

- выявление источников поступления микробиоты в подземное пространство Санкт-Петербурга и ее негативной роли;
- анализ нормативной базы для оценки коррозионной агрессивности подземной среды;
- рассмотрение комплексного использования различных методов для определения активности микроорганизмов при разрушении конструкционных материалов;
- анализ результатов экспериментальных исследований для оценки интенсивности развития биокоррозионных процессов в подземной среде.

### **Некоторые сведения о нормативной базе для определения агрессивности подземной среды**

Существующие в нашей стране нормативные документы на проведение инженерно-геологических изысканий не дают возможности всесторонне оценить коррозионную агрессивность подземного пространства.

Например, СП 28.13330.2012 «Защита строительных конструкций от коррозии» рассматривает агрессивность воздушной среды по отношению к бетонам и металлам. С точки зрения биологической агрессивности учитывается лишь наличие микромицетов и тионовых бактерий. Степень агрессивности подземной среды анализируется в данном документе только с позиций содержания в грунтах сульфатов и хлоридов, а также агрессивности подземных вод по отношению к бетонам по ряду показателей — бикарбонатной щелочности, водородному показателю (рН), со-

держанию углекислоты, солей магния, аммония, едких щелочей, хлоридов, сульфатов, нитратов и пр. Рекомендации по определению присутствия микроорганизмов в грунтах и подземных водах, в том числе по показателю БПК (биологическому потреблению кислорода), полностью отсутствуют.

В ГОСТ 9.602-2005 «Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии» в качестве единственных критериев биокоррозионной агрессивности грунта называются наличие визуальных признаков его оглеения (окраска в сероватые, зеленоватые и сизые тона) и наличие в нем восстановленных соединений серы, определение которых предлагается осуществлять органолептически путем добавления соляной кислоты. Следует отметить, что в оглеении грунтов важную роль играет жизнедеятельность анаэробных гетеротрофных микроорганизмов.

Единственным нормативным документом, в котором предложено учитывать влияние биотического компонента на строительные материалы, являются временные строительные нормы для территории Санкт-Петербургского региона — РСН 20-01-2006 «Защита строительных конструкций, зданий и сооружений от агрессивных химических и биологических воздействий окружающей среды». Однако взаимодействие конструкционных материалов с подземной средой в нем не анализируется.

Таким образом, в действующих в России нормативных документах практически не уделяется внимания деятельности микроорганизмов, а также коррозионной способности подземной среды в пределах размещения несущих и ограждающих конструкций наземных и подземных сооружений. В то же время на основе многочисленных полевых и лабораторных экспериментов, выполненных на различных объектах (таких как фундаменты, несущие обделки, перегонные и эскалаторные тоннели), установлено, что в подземном пространстве Санкт-Петербурга активная микробная деятельность прослеживается даже на глубинах более 100 м.

По генезису микробиоту подземного пространства можно разделить на природную и привнесенную. Кроме того, выделены факторы, способствующие активизации деятельности уже существующих микроорганизмов (рис. 1).

### **Природные и техногенные факторы, определяющие развитие микробной деятельности в подземном пространстве Санкт-Петербурга**

Специфика природных условий территории Санкт-Петербурга и ее историко-инженерного освоения (наличие болот, заболоченных территорий и различных источников загрязнения, застойный гидродинамический режим грунтовых вод за счет существования шпунтовых ограждений набережных и пр.) предопределили прогрессирующую контаминацию водоносных горизонтов, а также существование анаэробной обстановки в подземном пространстве города. Грунтовые воды здесь, как правило, характеризуются низкими, чаще всего отрицательными, значениями окислительно-восстановительного потенциала.

Важным для формирования окислительно-восстановительных условий в подземном пространстве является наличие органического вещества. Для исторической части Санкт-Петербурга можно условно выделить два типа разрезов.

Разрезы первого типа связаны с отложениями нижней литориновой террасы (на наиболее низких абсолютных отметках поверхности), к которой приурочена островная (центральная) часть мегаполиса. Для нее характерны действующие и погребенные болотные массивы различной мощности, содержащие природную микробиоту с большим разнообразием физиологических групп.

Для разрезов второго типа, приуроченных к более высоким абсолютным отметкам и сложенных грунтами озерно-ледникового и ледникового генезиса, природная микробиота, вполне понятно, нехарактерна. В этих отложениях развивается лишь привнесенная микрофлора. Часть микроорганизмов в условиях заболачивания территории поступает с инфильтрационным потоком на глубину 30–40 м (реже более), что подтверждается результатами полевых и лабораторных исследований. Даже в моренных отложениях при их заболачивании или наличии на них свалок хозяйственно-бытовых отходов на глубине до 20 м отмечается высокое содержание бактерий и микромицетов, а также биохимическое газообразование, что свидетельствует о поступлении микроорганизмов в грунты,

в которых изначально не содержались органические остатки.

В разрезе микулинских межморенных отложений, которые залегают на глубине более 25 м и могут содержать более 20% битуминозных органических веществ, наблюдается активная генерация газов (метана, азота, углекислого газа, а при загрязнении грунтовой толщи — сероводорода). Поступление микробиоты во вмещающую толщу может наблюдаться в газовом потоке. Несущая обделка перегонных тоннелей метрополитена, проложенных под микулинскими отложениями на юго-востоке города, подвергается активной биокоррозии. При расположении тоннелей в самой толще микулинских грунтов разрушенные тубинги были заменены на монолитный железобетон, который также интенсивно корродирует.

Помимо природной органики грунты могут обогащаться органическими веществами техногенного происхождения в результате утечек из систем водоотведения канализационных и промышленных стоков, содержащих большое количество органических веществ биотического и абиотического генезиса. Большую роль здесь также играют такие источники загрязнения, как захороненные в исторической части города свалки XVIII–XIX вв., автозаправочные станции, автопарковые хозяйства, станции автосервиса, железнодорожные станции, автовокзалы, крупные автомагистрали и пр.



Рис. 1. Схема основных источников поступления микроорганизмов в подземное пространство Санкт-Петербурга и факторов активизации их жизнедеятельности [2]. Наиболее значимые источники поступления микроорганизмов обведены овалами

Неограниченному распространению загрязнения грунтов нефтепродуктами препятствуют физические, физико-химические и биохимические процессы их трансформации. Разрушение нефтепродуктов происходит путем их химического окисления преимущественно в верхней, более аэрируемой, части разреза, а также в результате их биохимического разложения при участии гетеротрофной микрофлоры, что сопровождается снижением окислительно-восстановительного потенциала (Eh).

Величина Eh, характеризующая аэробность или анаэробность среды, предопределяет возможность развития различных по отношению к кислороду форм микроорганизмов и имеет большое значение для характера протекания электрохимической и биохимической коррозии. Во многих европейских странах, в том числе в Германии, оценка потенциальной коррозионной активности среды по окислительно-восстановительным условиям уже заложена в нормативные документы: при Eh < +100 мВ подземная среда рассматривается как агрессивная [3].

### **Методика оценки развития биокоррозии строительных материалов**

Роль биокоррозионных процессов в подземном пространстве города может быть рассмотрена на примере жилого дома (№ 93) на пересечении Невского проспекта и Гончарной улицы в историческом центре Санкт-Петербурга. Поводом для проведения обследования послужили неоднократные жалобы домоуправления на активное разрушение конструктивных материалов несущих конструкций и отделки подвальных помещений, которое, как показала специализированная съемка, было вызвано биохимической коррозией.

Для изучения были отобраны пробы: гниющих деревянных перекрытий; известкового раствора кирпичной кладки; кирпичей, покрытых солевыми налетами и биопленками различного цвета; коркоподобных отслоений с несущих металлических конструкций. Как известно, дерево, вяжущие вещества, кирпич и металл относятся к нерастворимым материалам. Однако химический состав водных вытяжек, приготовленных из взятых проб по ГОСТ 26423-85 и ГОСТ 26428-85, указал на значительную трансформацию их компонентного состава, приведшую к изменениям свойств строительных материалов, которые не могут больше надежно служить в качестве несущих и защитных конструкций.

Для микологического анализа отобранных образцов, включавшего первичную изоляцию, поддержание в культуре и идентификацию микромицетов, использовались питательная среда Чапека — Докса, картофельно-глюкозный агар (КГА), агар Сабуро и сусло-агар. Для выделения микрогрибов из образцов поврежденных материалов применялись следующие методы:

- посев мелких фрагментов проб на поверхность питательной среды;
- смыв с поверхности проб, последующее разведение полученной суспензии и ее посев на питательную среду (модификация метода почвенных разведений);
- селективная изоляция микрогрибов с поверхности субстрата с посевом на питательную среду с помощью инъекционной иглы;

- предварительная активация микромицетов во влажных камерах с последующим переносом их развивающихся зачатков на питательную среду.

Получаемые культуры инкубировали в термостате в течение 2–3 недель при температуре 25 °С до наступления спороношения, после чего проводили идентификацию микромицетов с использованием световой микроскопии. Для получения их препаратов применяли стандартную методику микроскопирования микроорганизмов в лактофеноле. В ходе идентификации было изготовлено более 50 препаратов. Идентификация микромицетов проводилась с использованием отечественных и зарубежных определителей.

При проведении бактериологических исследований посев микроорганизмов производили на агаризованные и жидкие питательные среды. В качестве первых использовали питательные среды: ГМФ<sup>1</sup> (для определения общего микробного числа сапротрофных бактерий), САП<sup>2</sup> (для выделения силикатных бактерий), КАА<sup>3</sup> (для выделения актиномицетов). Кроме того, развитие бактерий выявляли на среде Чапека — Докса. Жидкие питательные среды были применены для выделения тионовых, аммонифицирующих, денитрифицирующих, железовосстанавливающих и сульфатредуцирующих бактерий. Для бактерий последних трех групп создавалась анаэробная среда (при добавлении на поверхность жидкой среды слоя вазелинового масла толщиной 1 см). Все среды стерилизовали текучим паром при давлении 1 атм.

Количественный учет бактерий проводили с использованием метода разведений. Подсчет и изучение колоний, формирующихся в аэробных условиях, выполняли на 3- и 7-е сутки с использованием бинокулярной лупы при увеличении 20–100×. Пересчет колоний производился на 1 г материала. При просмотре растущих колоний учитывались их морфологические признаки — размер, цвет, прозрачность, консистенция, характер края, зональность, высота и пр. Доминирующие типы колоний отсеивали в пробирки со средой ГМФ для хранения и последующего исследования. Наблюдения за колониями в анаэробных условиях производили на 8–15-е сутки с момента посева.

Приготовление препаратов (мазков), окрашивание и микроскопирование бактерий осуществляли в соответствии с принятыми методиками. Микроскопирование приготовленных препаратов проводили в проходящем свете с использованием иммерсионного масла при увеличении 900×.

На основании совокупности полученных данных делалось предварительное заключение о принадлежности бактерий к определенной группе. Наиболее часто встречающиеся формы бактерий отбирались для молекулярной идентификации.

### **Результаты лабораторных исследований**

Состав водных вытяжек индивидуален для каждой из исследуемых проб и, по сути, отражает воздействие природных и техногенных факторов на строительные материалы.

<sup>1</sup> ГМФ — гидролизат говяжьего мяса ферментативный.

<sup>2</sup> САП — среда Александра с песком.

<sup>3</sup> КАА — крахмально-аммиачный агар.

Таблица 1

Компонентный состав водных вытяжек из разрушенных конструкционных материалов					
Элемент, ион, вещество, показатель	Ед. изм.	Содержание компонентов в водных вытяжках из конструкционных материалов			
		разрушенного дерева	известкового раствора	кирпичной крошки	отслоений с металлических конструкций
Натрий	мг/дм <sup>3</sup>	48	2 174	170	245
Калий	мг/дм <sup>3</sup>	3,5	3,5	5,0	4,4
Кальций	мг/дм <sup>3</sup>	207	207	8,1	1,8
Магний	мг/дм <sup>3</sup>	57	57	118	2,2
Ион аммония	мг/дм <sup>3</sup>	13	13	1,8	5,0
Железо двухвалентное	мг/дм <sup>3</sup>	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Железо общее	мг/дм <sup>3</sup>	0,078	0,16	0,053	1,8
Гидрокарбонат-ион	мг/дм <sup>3</sup>	380	4 291	392	576
Сульфат-ион	мг/дм <sup>3</sup>	426	1 317	186	49
Хлорид-ион	мг/дм <sup>3</sup>	77	222	97	29
Фосфат-ион	мг/дм <sup>3</sup>	23	176	335	5,7
Нитрат-ион	мг/дм <sup>3</sup>	8,0	34	3,0	8,2
Нитрит-ион	мг/дм <sup>3</sup>	0,21	5,9	1,1	0,19
Силикаты	мг/дм <sup>3</sup>	1,1	1,8	0,67	0,49
Сухой остаток	мг/дм <sup>3</sup>	1 266	6 330	1 170	697
Жесткость общая	мг-экв/дм <sup>3</sup>	15	5,0	10,1	2,2
Биологическое потребление кислорода за 5 сут. (БПК <sub>5</sub> )	мг O <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	95	18	12	10
Химическое потребление кислорода — бихроматная окисляемость (ХПК)	мг O <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	192	106	58	86
Перманганатная окисляемость	мг O <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	68	12	9,2	7,8
Водородный показатель (рН)	безразм.	5,1	10,2	6,2	7,0

Среди природных особенностей следует назвать состав грунтовых вод, сформированный за счет высокой заболоченности территории еще до строительства города, в том числе в результате привноса органических соединений и микробиоты.

К техногенным факторам может быть отнесен высокий уровень загрязнения территории, поскольку Гончарная улица была проложена и заселена еще в 1733 году в связи с развитием гончарных промыслов. Деревянные постройки существовали в XVIII и первой половине XIX века. Строительство каменных домов было начато во второй половине XIX века (исследуемому объекту — около 150 лет). Современное загрязнение подземной среды связано также с утечками из систем водоотведения, с использованием поваренной соли в качестве антигололедного средства, с поступлением нефтепродуктов из дренажно-ливневой системы. Именно техногенные факторы привели к присутствию во всех водных вытяжках ионов хлора, сульфатов, органических веществ, а в некоторых пробах — повышенных концентраций натрия и кальция (табл. 1).

Водная вытяжка из разрушенных деревянных перекрытий (рис. 2, 3) отражает изменение состава древесины за счет ее обизвесткования при поступлении щелочноземельных элементов в процессе разрушения известкового раствора. Высокое содержание в ней суль-

фатов объясняется формированием гипсов при взаимодействии известковых растворов с грунтовыми водами, загрязненными хозяйственно-бытовыми отходами, а также действием тионовых бактерий, выявленных в ходе бактериологических исследований (табл. 2). Сероводород в подвальном помещении также окисляется до сульфатов.

О важной роли микробиологической деятельности свидетельствует также несоответствие жесткости водной вытяжки за счет повышенного содержания ионов Ca<sup>2+</sup> и Mg<sup>2+</sup> (достигающей 15 мг-экв/дм<sup>3</sup>) и величины рН (равной 5,1). Закисленность водной среды при наличии щелочноземельных элементов формируется за счет образования кислот микроорганизмами в процессе их жизнедеятельности.

Химический состав водной вытяжки, приготовленной из преобразованного известкового раствора, указывает на сильное влияние контаминированных грунтовых вод, минерализация и компонентный состав которых близки к ее соответствующим характеристикам. Кальций из раствора выщелочен и переотложен в дереве и в разрушающейся кирпичной кладке (рис. 4). Обращает на себя внимание высокое содержание нитратов и нитритов, а также аномально высокая концентрация сульфатов, что связано с действием аэробных форм бактерий, вырабатывающих азотную, азотистую (семейство *Nitrobacteria*) и серную



Рис. 2. Поражение древесины в подвальном помещении (образование бурой гнили)

(тионовые бактерии) кислоты. Нитраты и нитриты могут быть окисленными формами аммония, которые рассматриваются в качестве продуктов разложения мочевины в канализационных стоках, а также деятельности аммонифицирующих бактерий, вырабатывающих  $\text{NH}_4^+$  за счет разложения белков.

Водные вытяжки из кирпичной крошки свидетельствуют о высоком уровне микробной пораженности и преобразования кирпича за счет биокоррозионных процессов, протекающих под воздействием аэробных и анаэробных форм микроорганизмов. Как и в случае трансформации известкового раствора, скрепляющего кирпичную кладку, в этих вытяжках отмечается повышенное содержание нитратов и сульфатов. При этом количество  $\text{NO}_3^-$  (составляющее  $335 \text{ мг/дм}^3$ ) — самое высокое по сравнению с водными вытяжками остальных трех проб конструктивных материалов (см. табл. 2).



Рис. 3. Коррозия материалов и конструкций в подвальном помещении. Видно сквозное разрушение металлических элементов

Таблица 2

Результаты микробиологического анализа проб поврежденных материалов					
Описание пробы	Виды микромицетов	Численность микромицетов (КОЕ*)	Численность бактерий (КОЕ*), на питательной среде **		
			ГМФ	КАА	САП
Охристые образования с поверхности металлических конструкций	<i>Aspergillus candidus</i> , <i>Aspergillus fumigatus</i> , <i>Aspergillus sydowii</i> , <i>Aspergillus versicolor</i> , <i>Aspergillus ustus</i> , <i>Paecilomyces viridis</i> , <i>Penicillium brevicompactum</i> , <i>Penicillium diversum</i> , <i>Penicillium frequentans</i> , <i>Penicillium spinulosum</i>	3 000	$1,0 \times 10^4$	0	$1,0 \times 10^4$
Отслоения с поверхности металлических конструкций	<i>Aspergillus fumigatus</i> , <i>Aspergillus nidulans</i> , <i>Aspergillus sydowii</i> , <i>Penicillium brevicompactum</i>	2 500	$2,1 \times 10^5$	$1,2 \times 10^5$	$1,8 \times 10^5$
Отслоения с поверхности металлических конструкций	<i>Aspergillus candidus</i> , <i>Aspergillus flavipes</i> , <i>Aspergillus ochraceus</i> , <i>Aspergillus nidulans</i> , <i>Aspergillus versicolor</i> , <i>Penicillium brevicompactum</i> , <i>Penicillium expansum</i> , <i>Syncephalastrum elegans</i>	3 500	$3,0 \times 10^4$	0	0
Грунт из шурфа	<i>Aspergillus candidus</i> , <i>Aspergillus flavipes</i> , <i>Trichoderma koningii</i>	2 800	$1,5 \times 10^6$	$1,0 \times 10^6$	$4,2 \times 10^5$
Известковый раствор	<i>Aspergillus candidus</i> , <i>Aspergillus flavipes</i> , <i>Aspergillus nidulans</i> , <i>Aspergillus versicolor</i> , <i>Aspergillus ustus</i> , <i>Phialemonium obovatum</i> , <i>Stachybotrys chartarum</i>	4 200	$3,0 \times 10^6$	$9,0 \times 10^5$	$2,0 \times 10^6$
Кирпичная крошка	<i>Aspergillus ustus</i> , <i>Circinella umbellata</i> , <i>Fusarium oxysporum</i>	1 500	$5,5 \times 10^6$	$3,0 \times 10^6$	$1,2 \times 10^6$
Фрагменты деревянных конструкций	<i>Aspergillus candidus</i> , <i>Trichoderma viride</i>	2 100	$2,5 \times 10^6$	$2,0 \times 10^6$	$2,4 \times 10^6$

\* КОЕ — колониобразующая единица (число образующих колонии клеток микроорганизмов в 1 г или 1 мл среды).

\*\* ГМФ — гидролизат говяжьего мяса ферментативный; САП — среда Александра с песком; КАА — крахмально-аммиачный агар.



Рис. 4. Повреждение кирпичной кладки



Рис. 5. Глубокая коррозия металлических конструкций. Наблюдается многослойное отслаивание и осыпание их фрагментов



Рис. 6. Точечная коррозия металлической конструкции, обусловленная образованием конденсата. Начальная стадия развития «питтинга» (образование углублений)

Уместно отметить, что проведенные исследования водных вытяжек из разрушающейся кирпичной кладки фундаментов зданий Нового Эрмитажа (постройки 1841–1858 гг.) показали весьма близкие результаты — высокое содержание нитратов и сульфатов. Грунтовые воды в основаниях сооружений Нового Эрмитажа также испытали длительное загрязнение хозяйственно-бытовыми стоками, утечками из канализационных систем, а также влияние болотных отложений.

Влияние вырабатываемых микроорганизмами кислот сказывается на снижении pH водной вытяжки до 6,2, хотя жесткость имеет повышенные значения, достигающие 10,1 мг-экв/дм<sup>3</sup>. Высокая щелочность объясняется большим содержанием ионов Mg<sup>2+</sup>, достигающим 118 мг/дм<sup>3</sup>. Это значение коррелирует с заметно повышенным количеством этих ионов в разрушенном известковом растворе, составляющим 60 мг/дм<sup>3</sup> (см. табл. 1).

Активная деструкция черных металлов (см. рис. 3; рис. 5, 6) подтверждается и результатами исследования состава водных вытяжек, приготовленных из металлических отслоений, которые хорошо растирались в ступке до порошкообразного состояния. Невысокое содержание общего железа в водной вытяжке (1,8 мг/дм<sup>3</sup>) объясняется нейтральной реакцией среды (pH = 7), в которой подвижные формы железа присутствуют в небольших количествах. Следует отметить, что содовый характер водной вытяжки (245 мг/дм<sup>3</sup> — концентрация Na<sup>+</sup>; 576 мг/дм<sup>3</sup> — концентрация HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) должен был показать более высокую величину pH — не менее 8,0–8,5. А снижение pH до 7 вызвано деятельностью микроорганизмов, генерирующих кислоты.

О широком присутствии микроорганизмов и продуктов их метаболизма во всех отобранных пробах свидетельствуют повышенные значения ХПК<sup>4</sup> (58–192 мг O<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>) и перманганатной окисляемости (до 68 мг O<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>). При этом содержание трудноокисляемой органики (белковых соединений) в несколько раз превышает количество легкоокисляемых органических веществ в водной вытяжке. Среди аэробных форм микроорганизмов в достаточном количестве содержатся железоокисляющие бактерии (по результатам специализированных микробиологических исследований).

Выполненный микологический анализ отобранных проб выявил высокую численность и видовое разнообразие микрогрибов (см. табл. 2) при доминировании родов *Aspergillus* и *Penicillium*, которые составляют основу агрессивного сообщества, ускоряющего коррозионные процессы в условиях переменного увлажнения. О прямом участии микромицетов в развитии биокоррозии говорят крайне высокие значения показателя КОЕ<sup>5</sup> в продуктах разрушения металлических конструкций и кирпичной кладки, достигающие 3500 и 4200 соответственно.

Выявленные микромицеты находятся в тесном взаимодействии с бактериями, о чем свидетельствуют факты их совместного обнаружения. Особое влияние на формирование микробиоты подвального помещения оказывает развитие мицелия базидиомицетов (макрогрибов), покрывающих потолочные деревянные конструкции. В зонах интенсивного разрушения металлических конструкций развиваются преимущественно процессы аэробной коррозии при участии микромицетов и бактерий. На контакте с грунтовой толщей, в которой сформировались бескислородные условия, наблюдается активная жизнедеятельность анаэробных форм микроорганизмов и происходит разрушение известняковой кладки фундамента.

<sup>4</sup> ХПК — химическое потребление кислорода (бихроматная окисляемость).

<sup>5</sup> КОЕ — колониеобразующая единица (число образующих колонии клеток микроорганизмов в 1 г или 1 мл среды).

## Заключение

Вопросы применения устойчивых конструкционных материалов при новом строительстве или реконструкционных работах, а также при создании ограждающих конструкций для устройства глубоких котлованов весьма актуальны для Санкт-Петербурга, и решаться они должны на основе рассмотрения биокоррозионных процессов.

За последние десятилетия накопился большой фактический материал по аварийным ситуациям, возникшим при прорывах подземных вод в глубокие котлованы. Во многих случаях отмечаются отсутствие затвердевания бетонов при устройстве буронабивных свай различных конструкций и неэффективность использования цементных и цементно-глинистых растворов при производстве инъекционных работ для омоноличивания старинных разрушенных фундаментов, что связано с деятельностью подземной микробиоты.

Ремонтные работы по поддержанию обделок тоннелей метрополитена в работоспособном состоянии требуют использования биоустойчивых материалов, поскольку биокоррозионные процессы наблюдаются на глубинах до 100 м и более.

Назрела необходимость создания нормативных документов для оценки коррозионной способности подземной среды как основы для разработки проектов реконструкции и реставрации архитектурно-исторических памятников, строительства жилых и промышленных зданий, подземных сооружений с учетом многокомпонентности подземного пространства и обязательности проведения исследований роли подземной микробиоты в развитии биокоррозионных процессов. 📌

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вернигорова В.Н. Коррозия строительных материалов: монография. М.: Палеотип, 2007. 176 с.
2. Дашко Р.Э., Александрова О.Ю. Микробная контаминация подземного пространства Санкт-Петербурга как фактор формирования геотехнических условий // Труды Международной конференции по геотехнике «Геотехнические проблемы мегаполисов», г. Москва, 7–10 июня 2010 г. Том 5. СПб.: Изд-во ООО «ПИ Георекострукция». С. 1945–1952.
3. Дашко Р.Э., Перевоицкова Н.А. Формирование биоагрессивности подземной среды и ее влияние на конструкционные материалы // Грунтоведение. 2012. № 1. С. 33–37.
4. Каневская И.Г. Биологическое повреждение промышленных материалов. Л.: Наука, 1984. 232 с.

# ГЕОТЕХНИКА

Журнал для изыскателей, проектировщиков и строителей

Цель журнала — ознакомление российских специалистов с передовым отечественным и зарубежным опытом в области геотехники

Периодичность в 2016 году:  
**6 номеров**

Стоимость годовой подписки:  
**3900 рублей**  
[info@geomark.ru](mailto:info@geomark.ru)

