

УДК 620.193

Л.Э. Беллендир<sup>1</sup>, Д.Ю. Власов<sup>2</sup>, В.Н. Дурчева<sup>1</sup>, И.М. Царовцева<sup>1</sup>**РОЛЬ БИОФАКТОРА В КОРРОЗИИ  
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ  
ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ**

DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-S1-61-66

*В статье изложены результаты натурных исследований влияния биологического фактора на металлические и железобетонные конструкции Чебоксарской и Миатлинской ГЭС. Анализ отобранных образцов показал богатый видовой состав грибов и бактерий, относящихся к опасным коррозионным агентам, а также влияние их на структуру материала. Сделан вывод о значительной роли микроорганизмов в изменении структуры материалов.*

**Ключевые слова:** коррозия металла, продукты коррозии металла, биокоррозия, биоповреждения, биологический фактор, микроорганизмы, гидротехнические сооружения, металлические конструкции, железобетонные конструкции.

*The article presents the results of field studies of the influence of biological factors on metal and concrete structures of Mialinskaya and Cheboksarskaya HPP. Analysis of the selected samples showed a rich species composition of fungi and bacteria related to severe corrosive agents, as well as their influence on the structure of the material. The conclusion has been made about the significant role of microorganisms in changing the structure of materials.*

**Keywords:** metal corrosion, products of metal corrosion, biocorrosion, biodamages, biological factor, microorganisms, hydraulic engineering constructions, metal structures, steel concrete structures.

<sup>1</sup>Акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники им. Б.Е. Веденеева» [Joint-stock company «The B.E. Vedeneev All Russia Institute of Hydraulic Engineering»] E-mail: vniig@vniig.ru

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет» [Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Saint-Petersburg State University»] E-mail: spbu@spbu.ru

**Введение**

Конструкции гидротехнических сооружений подвергаются воздействию факторов внешней среды, которые оказывают существенное влияние на их свойства и долговечность.

По инициативе и при участии сотрудников ВНИИГА с привлечением специалистов из МГУ, СПбГУ и ряда других институтов, начиная с 90-х годов проводятся многолетние исследования влияния биологического фактора на конструкции гидротехнических сооружений (ГТС). В течение этого времени объектами исследований являлись: Братская, Усть-Илимская, Шульбинская, Бухтарминская, Чебоксарская, Усть-Каменогорская, Саяно-Шушенская, Чиркейская, Миатлинская плотины и атомная станция в Бушере [1, 2].

Как показали полученные результаты, металлические и железобетонные конструкции ГТС в большей степени подвергаются биологической коррозии. Во всех отобранных пробах были выявлены одни и те же виды микроорганизмов, грибов и ряд других микроорганизмов, численность которых изменялась от фоновых значений  $10^2$  КОЕ/г до очень высоких:  $10^8$  КОЕ/г.

**Материалы и методы**

Наиболее интенсивная биокоррозия выявлена на поверхности металлических элементов плотин

и железобетонных конструкций. Подтвердилось мнение специалистов, что микробиологическая коррозия металлов является самым распространенным природным и производственным фактором [3–6]. Необходимо отметить, что биологические, физические и химические процессы, приводящие к изменению структуры материала, теснейшим образом взаимосвязаны.

Особый вклад в деструкцию металлических конструкций и железобетона вносят микроорганизмы, поселяющиеся на поверхности и проникающие в толщу конструкций. При этом в каждом конкретном случае состав микробных сообществ (микробиот) может зависеть от состояния окружающей среды, наличия источников накопления микроорганизмов из различных экологических и трофических групп.

Опыт предшествующих работ показывает, что окружающая среда, в которой находятся сооружения ГТС, во многом может определять развитие биоповреждений. С одной стороны, это происходит в связи с созданием обстановки, благоприятствующей развитию бактерий, микромицетов и водорослей (экология биодеструктора), с другой – приводит материал в состояние большей восприимчивости к обрастанию и биоповреждению (экология субстрата) [7–14]. По этой причине необходимо выявлять связи между экологической обстановкой, состоянием

материалов и биоповреждением (биообрастанием) ГТС. Это открывает возможности для создания условий, препятствующих деструкции конструкций, и позволяет прогнозировать долговечность ГТС, а также решать конкретные (локальные) задачи по защите объектов от биологического разрушения.

Целью обследования ГТС являлись:

- определение видового состава микробиологического сообщества, участвующего в процессах биологической коррозии;

- коррозия железобетонных конструкций;

- коррозия металла (химическая и биологическая, при участии бактерий и грибов), приводящая к расслаиванию поверхности металлических конструкций и формированию углублений (питтингов).

В работе приведены данные обследования Чебоксарской (2012 г.) и Миатлинской (2014 г.) ГЭС, которые показали, что степень повреждения и развития коррозионных процессов на объектах различна. Во многом эта разница связана с условиями эксплуатации, сроками проведения профилактических и ремонтных работ, а также температурно-влажностным режимом на различных участках ГТС. К

зонам повышенного риска (зоны наиболее интенсивного и глубокого развития деструктивных процессов) можно отнести места стыков (швы) бетонных конструкций, участки образования черных и бурых биопленок, участки повышенного увлажнения конструкций. Местами поверхностные наслоения достигают значительной толщины. Зафиксированы зоны газообразования, обусловленные протеканием микробиологических процессов. Так, зафиксировано выделение сероводорода в местах развития обширных биопленок черного цвета с доминированием сульфатредуцирующих бактерий, которые хорошо известны как возбудители коррозии в условиях недостатка кислорода. Коррозия металлических конструкций проявляется в разных формах. Зафиксировано образование каверн (питтингов), появление точечной коррозии в местах конденсации влаги, а также отслаивание металла.

Биопленки развиваются преимущественно в местах повышенного увлажнения. В целом на объекте происходит накопление биодеструкторов, а общий фон может расцениваться как повышенный.

В табл. 1 дано описание отобранных проб на объектах. Точки отбора проб поврежденных мате-

Таблица 1

**Характеристики микробиологических проб, отобранных на Чебоксарской и Миатлинской ГЭС**

Условный номер пробы (дата отбора)	Характеристика отобранной пробы	Место отбора	Примечание
Чебоксарская ГЭС			
3 (июль 2012 г.)	Фрагмент корродирующей металлической конструкции	Верхняя часть водосливной плотины, внешняя среда, место спуска батометра	–
5 (июль 2012 г.)	Фрагмент отслаивающегося бетона по арматуре	Верхний бьеф, водосливная плотина, внешняя среда, бетонное ограждение в верхней части плотины	–
15 (июль 2012 г.)	Отслаивание бетона с железобетонной конструкции, глубокая коррозия	Сухая паттерна (секция №1)	–
19 (июль 2012 г.)	Глубокая коррозия металлической конструкции, проложенной в толще бетона; язвы (питтинг)	Сухая паттерна (секция №3)	–
Миатлинская ГЭС			
2 (июль 2014 г.)	Точечная коррозия металла	Спиральная камера, стена на высоте 1,5 м	Бакпечатка
5 (июль 2014 г.)	Карбонатные наслоения, продукты коррозии, черная биопленка	Под металлической облицовкой в средней части водовода	Запах сероводорода
6 (июль 2014 г.)	Соскоб поверхностной корки по металлу	Водовод – ближе к спиральной камере	Под легко отслаивающейся коркой типичная ржавчина, а под более плотной – черный цвет
7 (июль 2014 г.)	Соскоб легко отслаивающейся корки	Спиральная камера	–
20 (апрель 2014 г.)	Продукты коррозии металла	Металлическая облицовка турбинного водовода гидроагрегата №1	–

риалов, новообразований и продуктов коррозии установлены в ходе визуального обследования. Образцы отбирали в стерильные контейнеры и пакеты, а также способом отпечатка с поверхности на питательную среду с использованием предварительно подготовленных бакпечаток.

На рис. 1 зафиксирована характерная точечная коррозия металлической конструкции в спиральной камере Миатлинской ГЭС гидроагрегата №1 (проба 2) – использован микологический анализ отобранных образцов, который проводили на лабораторной базе Санкт-Петербургского государственного университета в соответствии с указаниями РВСН 20-01–2006 (ТСН 20-303–2006) и с применением современных диагностических методов микологии, а также проведены бактериологические исследования выделенных микроорганизмов на агаризованных (твердых) и жидких питательных средах методом предельных разведений.



Рис. 1. Точечная коррозия в месте конденсации влаги

Для получения максимально полной и объективной картины процессов биокоррозии конструкций ГЭС часть проб исследовали методом сканирующей электронной микроскопии, а для определения фазового состава продуктов коррозии металлических конструкций использовали рентгенофазовый анализ (РФА).

### Результаты

Результаты микологического анализа проб приведены в табл. 2, в которой представлен видовой состав по каждой пробе, а также численность колониеобразующих единиц (КОЕ) в 1 грамме образца.

По результатам исследований можно утверждать, что микроскопические грибы играют заметную роль в формировании агрессивной среды на ГЭС и принимают непосредственное участие в процессах биокоррозии материалов и конструкций.

Бактериологический анализ образцов поврежденных материалов показал присутствие широкого спектра бактерий в большинстве изученных проб. Учет численности бактерий на средах: ГМФ – гид-

ролизат мяса ферментативный (среда для широкого круга гетеротрофных бактерий), СрА – среда Александра (для силикатных бактерий), ПВА – пептонная вода агаризованная (для выделения аммонифицирующих гетеротрофных бактерий), КАА – крахмально-аммиачный агар (среда для выделения актиномицетов) – проводили на 3–7-е сутки культивирования. Учет тионовых, денитрифицирующих, железовосстанавливающих, сульфатредуцирующих и аммонифицирующих бактерий проводили на 7–13-е сутки культивирования (табл. 3).

Результаты СЭМ-исследования образцов поврежденных материалов показали, что поверхность поврежденных материалов сильно изменена. В зонах развития биологической коррозии концентрируются микроорганизмы (заметны гифы грибов, структуры актиномицетов, биопленки с доминированием бактерий, а также диатомовые водоросли разных видов). Локально зафиксированы сплошные биопленки. Особенно активно микробные биопленки формируются в местах коррозии металлических конструкций. Под действием продуктов метаболизма микроорганизмов протекают процессы трансформации поверхностного слоя (на рис. 2 и 3 видны многочисленные кристаллические структуры).

Наиболее характерные поверхности отобранных продуктов коррозии на Миатлинской ГЭС приведены на рис. 2 и 3 (пробы 6 и 20).

В целом СЭМ-анализ подтверждает взаимосвязь процессов физико-химической и биологической коррозии материалов и конструкций на ГЭС. Применение сканирующей электронной микроскопии позволило выявить многочисленные структуры диатомовых водорослей, которые не были зафиксированы при микробиологических анализах.

Для оценки трансформации минерального состава материалов под действием коррозионных факторов проведен рентгенофазовый анализ (РФА). Далее приведены результаты анализа проб 5 и 6, отобранных на Миатлинской ГЭС (см. табл. 1). Полученные данные свидетельствуют о значительной трансформации изученных субстратов в результате протекания коррозионных процессов.

Результаты исследований указывают на процессы трансформации бетонных и металлических конструкций в сооружениях Миатлинской ГЭС (табл. 4). Так, в продуктах коррозии выявлены минералы, содержащие железо, кальций и другие элементы. Особенно разнообразен минеральный состав в биопленках и поверхностных отслаивающихся корках, что указывает на возможность биогенной трансформации поверхностного слоя материалов.

Полученные данные указывают на существование довольно сложного по составу и структуре агрессивного микробного сообщества, которое может играть заметную роль в процессах биодegradации материалов и конструкций ГЭС.

Таблица 2

## Результаты микологического анализа проб

Условный номер пробы (дата и место отбора)	Характеристика отобранной пробы	Виды микромицетов	КОЕ
Чебоксарская ГЭС			
3 (июль 2012 г., верхняя часть водосливной плотины)	Фрагмент корродирующей металлической конструкции	<i>Fusarium oxysporum</i> <i>Alternaria alternata</i> <i>Mucor racemosus</i> <i>Mortierella lignicola</i> <i>Cladosporium cladosporioides</i>	10000
5 (июль 2012 г., верхний бьеф, водосливная плотина)	Фрагмент отслаивающегося бетона по арматуре	<i>Epicoccum nigrum</i> <i>Fusarium oxysporum</i> <i>Cladosporium cladosporioides</i> <i>Aureobasidium pullulans</i> <i>Cladosporium herbarum</i> <i>Alternaria alternata</i>	7500
15 (июнь 2012 г., сухая паттерна, секция №1)	Отслаивание бетона с железобетонной конструкции, глубокая коррозия	<i>Cladosporium sphaerospermum</i> <i>Penicillium brevicompactum</i> <i>Penicillium decumbens</i> <i>Penicillium roquefortii</i> <i>Mortierella lignicola</i> <i>Alternaria alternata</i>	7500
19 (июнь 2012 г., сухая паттерна, секция №3)	Глубокая коррозия металлической конструкции, проложенной в толще бетона	<i>Mucor plumbeus</i> <i>Cladosporium sphaerospermum</i> <i>Cladosporium cladosporioides</i>	12000
Миатлинская ГЭС			
6 (08.07.2014 г., водовод – ближе к спиральной камере)	Соскоб поверхностной корки по металлу	<i>Alternaria alternata</i> <i>Cladosporium cladosporioides</i> <i>Cladosporium herbarum</i> <i>Fusarium oxysporum</i> <i>Penicillium decumbens</i> <i>Penicillium roquefortii</i> <i>Ulocladium chartarum</i>	3500
7 (08.07.2014 г., спиральная камера)	Соскоб легко отслаивающейся корки	<i>Fusarium oxysporum</i> <i>Mucor hiemalis</i> <i>Penicillium chrysogenum</i> <i>Trichoderma viride</i>	2500
20 (01.04.2014 г., турбинный водовод гидроагрегата №1, металлическая облицовка)	Продукты коррозии металла	<i>Cladosporium cladosporioides</i> <i>Epicoccum nigrum</i> <i>Fusarium oxysporum</i> <i>Penicillium herqueri</i> <i>Penicillium purpurogenum</i> <i>Penicillium roquefortii</i>	3000

Таблица 3

**Результаты бактериологического анализа проб поврежденных материалов, новообразований и продуктов коррозии, отобранных на Чебоксарской и Миатлинской ГЭС в июле 2014 года**

Условный номер пробы	Характеристика отобранной пробы	Место отбора	ГБ	АМБ	АМЦ	СБ	ТИО	ЖО	СФ	ЖВ
Чебоксарская ГЭС										
15	Отслаивание бетона с железобетонной конструкции, глубокая коррозия	Сухая паттерна (секция №1)	$1,8 \cdot 10^5$	–	–	$1 \cdot 10^5$	0	$4 \cdot 10^4$	–	–
19	Глубокая коррозия металлической конструкции, проложенной в толще бетона; язвы (питтинг)	Сухая паттерна (секция №3)	$2,2 \cdot 10^5$	–	–	$5,5 \cdot 10^4$	0	0	–	–
Миатлинская ГЭС										
5	Карбонатные наслоения, продукты коррозии, черная биопленка	Отобраны из металлической облицовки в средней части водовода	$1,2 \cdot 10^6$	$2,1 \cdot 10^6$	$1,6 \cdot 10^6$	–	$10^3$	$10^4$	$10^6$	$10^6$
6	Соскоб поверхностной корки по металлу	Водовод ближе к спиральной камере	$>10^7$	$>10^7$	$>10^7$ (земляной запах)	$4,6 \cdot 10^5$	$10^5$	$10^3$	$10^5$	$10^6$
7	Соскоб легко отслаивающейся корки	Спиральная камера	$>10^7$	$>10^7$	$1,1 \cdot 10^5$	–	$10^3$	$10^4$	$10^5$	$10^5$

Примечание: ГБ – гетеротрофные бактерии, АМБ – аммонифицирующие гетеротрофные бактерии, АМЦ – актиномицеты, СБ – силикатные бактерии, ТИО – тиюновые бактерии, ЖО – железокисляющие бактерии, СФ – сульфатредуцирующие бактерии, ЖВ – железовосстанавливающие бактерии.

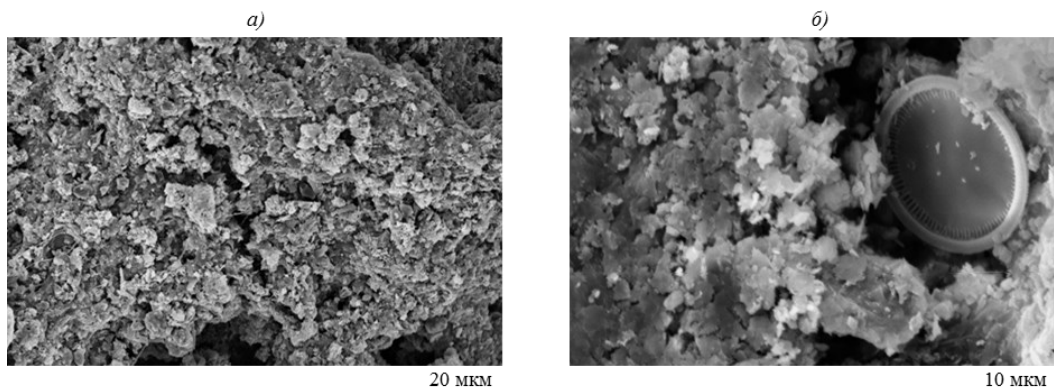


Рис. 2. Поверхность металла с продуктами коррозии (проба б):  
а – обломки створок диатомовых водорослей (нитчатые структуры, грибные гифы); б – створка диатомовой водоросли при большом увеличении

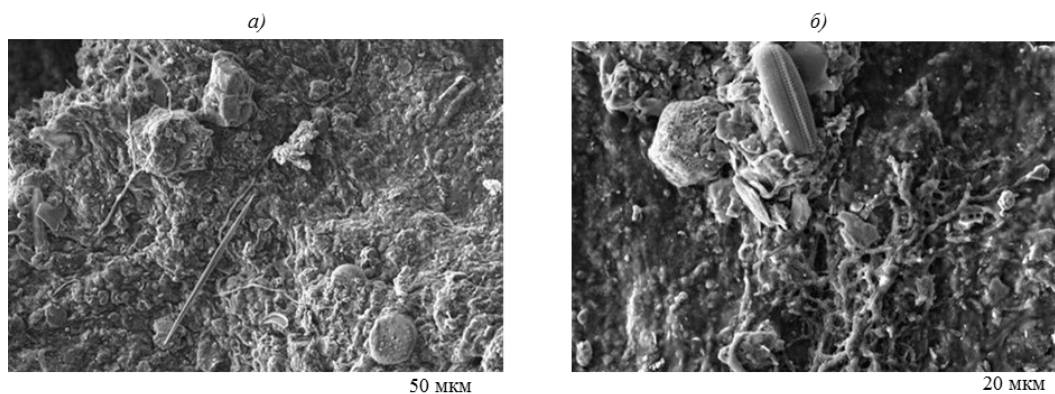


Рис. 3. Общий вид поверхности металла с продуктами коррозии (проба 20) и клетками диатомовых водорослей в виде грибного мицелия (а) и колонии грибов – сплетение мицелия (б)

Таблица 4

**Результаты рентгенофазового анализа образцов новообразований и продуктов коррозии, отобранных на Миатлинской ГЭС**

Условный номер пробы	Характеристика отобранной пробы	Место отбора	Результат РФА
5	Карбонатные наслоения, продукты коррозии, черная биопленка	Отобраны из-под металлической облицовки в средней части водовода	В основном состоит из FeO(OH), кальцита и магнетита, в малом количестве – лепидокрокит и санидин
6	Соскоб поверхностной корки по металлу	Водовод – ближе к спиральной камере	В основном состоит из кальцита, кварца, гетита, феррита магния, также присутствует лепидокрокит и в следовых количествах браунмиллерит и флогопит

**Обсуждение и заключения**

Коррозионные процессы, происходящие на поверхности железобетонных и металлических конструкций ГЭС, обусловлены взаимосвязанными процессами химической и биологической коррозии. Применение СЭМ-анализа позволило утверждать, что микроорганизмы играют значительную роль в процессах коррозии металла. Биогенная трансформация металла приводит к его

разрушению, причем провоцирующими моментами усиления биофактора могут быть масла, смазки, краски, любые защитные средства без биоцидных добавок.

Таким образом, гидротехнические сооружения по прошествии определенного времени включаются в естественный биогеохимический круговорот веществ в природе, подвергаясь при этом активному воздействию биологического фактора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дурчева В.Н., Рожанская А.М. Роль микробных сообществ в структурных изменениях бетона плотин // Гидротехническое строительство. 1994. №7. С. 11–14.
2. Дурчева В.Н., Измайлова Р.А., Легина Е.Е. Биокоррозия бетона и железобетонных конструкций гидротехнических сооружений // Гидротехника XXI век. 2011. №2 (5). С. 62–65.
3. Андреюк Е.И., Билай В.И., Коваль Э.З., Козлова И.А. Микробная коррозия и ее возбудители. Киев: Наукова думка. 1980. 288 с.
4. Дашко Р.Э., Власов Д.Ю., Волкова А.В. Микробная деятельность в подземных выработках и ее влияние на свойства богатых железных руд и конструкционных материалов // Записки горного института. Современные проблемы горной промышленности. 2006. Т. 168. С. 165–175.
5. Дашко Р.Э., Власов Д.Ю., Шатская Е.Ю. Некоторые данные о причинах разрушения конструкционных материалов подземных сооружений в Санкт-Петербурге // Записки горного института. Современные проблемы горной науки. 2007. Т. 172. С. 69–74.
6. Дрозд Г.Я., Рожанская А.М. Роль микроорганизмов в разрушении бетонных канализационных коллекторов // Микробиологический журнал. 1989. №6. С. 89–92.
7. Aviam O., Bar-Nes G., Zeiri Y., Sivan A. Accelerated Biodegradation of Cement by Sulfur-Oxidizing Bacteria as a Bioassay for Evaluating Immobilization of Low-Level Radioactive // Applied and Environmental Microbiology. 2004. P. 6031–6036.
8. Bastidas-Arteaga E., Sanchez-Silva M., Chateaufeuf A., Silva M.R. Coupled reliability model of biodeterioration, chloride ingress and cracking for reinforced concrete structure // Structural Safety. 2008. V. 30. P. 110–129.
9. Beech I.B., Gaylarde C. Microbial polysaccharides and corrosion // International Biodeterioration. 1991. V. 27. P. 95–107.
10. Berthelin J. Microbial weathering processes // Microbial Geochemistry. Blackwell Scientific Publications, Oxford. 1983. P. 223–262.
11. De Hoog G.S., Guarro J. Atlas of clinical fungi. CBS / Universitat Rovira i Virgili, 1995. 720 p.
12. Nica D., Davis J.L., Kirby L., Zuo G., Roberts D.J. Isolation and characterization of microorganisms involved in the biodeterioration of concrete in sewers // International Biodeterioration and Biodegradation. 2000. P. 61–68.
13. Sand W. Microbial Mechanisms of Deterioration of Inorganic Substrates. A General Mechanistic Overview // International Biodeterioration and Biodegradation. 1997. №4. P. 183–190.
14. Walsh J.H. Ecological considerations of biodeterioration // International Biodeterioration and Biodegradation. 2001. V. 48. №1. P. 16–25.