

Гончарова Е. Н., канд. биол. наук, доц.,
Василенко М. И., канд. биол. наук, доц.,
Нарцев В. М., канд. техн. наук, доц.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

РОЛЬ МИКРОСКОПИЧЕСКИХ ВОДОРΟΣЛЕЙ В ПРОЦЕССАХ ПОВРЕЖДЕНИЯ ГОРОДСКИХ ЗДАНИЙ*

eleng59@rambler.ru

Поверхности поврежденных строительных материалов в антропогенных условиях среды подвергаются процессу биоповреждения с участием живых организмов. Степень их воздействия зависит от экологических факторов окружающей среды, на которые влияет уровень антропогенной нагрузки территорий. В представленной работе исследован состав альгоценозов поврежденных поверхностей городских зданий на территориях с различной степенью антропогенной нагрузки, выявлены водоросли наиболее устойчивые и чувствительные к уровню загрязнения окружающей среды. Проведено моделирование процесса биообращения бетонов водорослями в лабораторных условиях, что позволило продемонстрировать интенсивность воздействия живых систем на строительный материал, оценить эффективность процессов выщелачивания ионов из строительных материалов, определить минералогический состав разрушенного цементного камня.

Ключевые слова: биоценоз, биообращение, биоповреждение, бетон, микроскопические водоросли.

В настоящее время проблемы безаварийной эксплуатации и долговечности зданий и сооружений приобретают все большую остроту в связи с мировым экономическим кризисом, а также с использованием нетрадиционных материалов, в том числе содержащих техногенные отходы, старением и преждевременной потерей прочности конструкций и изделий из-за негативного воздействия постоянно ухудшающейся окружающей среды и живых организмов. Вопросам старения и противодействия процессам изнашивания, в том числе коррозионной стойкости, уделяется все большее внимание [1-5].

Считается, что более 40-50 % общего объема регистрируемых в мире повреждений связано с деятельностью микроорганизмов [3], причем микробы могут ускорять процессы биодеструкции в тысячи раз [4], нанося ущерб в десятки миллиардов долларов ежегодно [5-7].

Причинами интенсивных процессов биоповреждения являются климатические факторы и факторы окружающей среды (ветер, пыль, наличие в атмосфере агрессивных соединений, биологические факторы) [1, 3]. В реальных комбинированных условиях внешней среды разрушение происходит от воздействия солнечного света, воды, низкой температуры, перепада температур, изменения влажности и от комплексного воздействия различных факторов. Длительное воздействие этих факторов приводит к потере массы, снижению физико-механических свойств, а также других эксплуатационных показателей [6, 7].

В атмосферном воздухе городских районов отмечается присутствие различных загрязнителей (твердых - в виде пылей, газообразных -

формальдегиды, фенолы, оксиды азота и серы, в виде жидкостей и аэрозолей – тяжелые металлы, неорганические кислоты и многие другие), которые оседают на внешней поверхности зданий. Загрязняющие вещества, включая загрязнения биологического происхождения, при наличии атмосферных осадков, в условиях дополнительного воздействия переменной температуры действуют на сооружения, ухудшая их эстетический вид и способствуя преждевременному разрушению материалов [1, 3, 8, 9].

В результате повышенного уровня влажности в плотной городской застройке, частого отсутствия водоотводов, гидрофильности используемых стройматериалов, происходит конденсация значительных количеств влаги на поверхностях сооружений, что способствует заселению их водорослями. Водоросли, являющиеся автотрофными организмами, первыми появляются на поверхности строительных материалов и, развиваясь иногда в массовом количестве, дают начало различным пищевым цепям. Формируется биоценоз, доминантными видами которого являются водоросли, определяющие возможность существования других автотрофных и гетеротрофных организмов, ускоряющих процесс биоповреждения в значительной степени благодаря выделению агрессивных соединений в процессе метаболизма [3, 8, 9].

Несмотря на то, что при изучении колонизации зданий водорослями всегда учитывалось воздействие качества окружающей среды на этот процесс, до настоящего времени выявлению особенностей альгоценозов поверхностей зданий и сооружений в открытой атмосфере

различных функциональных зон территории населенных мест уделялось мало внимания.

Цель исследования, результаты которого представлены в данной статье, состояла в выявлении наличия водорослей на поврежденных поверхностях городских зданий, находящихся в условиях различного уровня антропогенных нагрузок (функциональные зоны крупного города), проведении идентификации и изучении состава альгоценозов биоповрежденных строительных материалов и конструкций.

Объектом исследования являлись здания и сооружения города, образцы материалов поврежденных поверхностей застройки, а также модельные образцы цементно-песчаного бетона.



Рис. 1. Биоповреждение водорослями

Уровень антропогенных нагрузок по территории города меняется в зависимости от функционального назначения планировочных зон, наиболее напряженной сохраняется обстановка на территории промышленных площадок и вдоль городских дорог. Наличие «пятен» водорослей различных размеров, окраски, частоты встречаемости на зданиях и сооружениях отмечено на всех исследуемых территориях.

В составе смывов с поврежденных поверхностей были выявлены представители четырех отделов водорослей: зеленые (*Chlorophyta*), желто-зеленые (*Xanthophyta*), сине-зеленые (*Cyanophyta*) и диатомовые (*Bacillariophyta*). Однако видовое разнообразие поверхностных альгоценозов в исследуемых зонах изменялось в зависимости от их функционального назначения или, как уже говорилось выше, от уровня антропогенных нагрузок.

Наличие представителей всех четырех отделов водорослей, по морфологическому строению достаточно разнообразных (нитчатые, колониальные, одиночные), при наибольшем видовом разнообразии (общее количество видов более 10) наблюдалось лишь в пробах материала с территорий пригородной частной застройки и загородной рекреационной зоны. Только в этих вариантах выявлено присутствие отдельных представителей желто-зеленых водорослей, которые являются индикаторными видами. Доминирующими

Пробы строительных материалов со следами биообрастаний служили источником получения смешанных и чистых культур водорослей на различных минеральных питательных средах путем смыва и культивирования в люминостане [4, 8]. Чистые культуры были получены методом разбавления с последующим культивированием на плотных питательных средах [8].

Проведенное обследование зданий и сооружений различных зон города на наличие визуальных следов колонизации поверхностей водорослями показало, что данные фототрофные организмы поселяются как на кирпичной, так и на бетонных поверхностях (рис. 1).

нирующими видами в данном случае оказались сине-зеленые и диатомовые водоросли.

Отдел сине-зеленых водорослей был представлен, в основном, двумя порядками - *Chloroococcales* и *Oscillatoriales*. Отмечено наличие слизистых колоний клеток родов *Microcystis* и *Gloeocapsa*, чаще шаровидных, реже – несколько эллипсоидных форм. Последние отличаются повышенной устойчивостью к изменению температуры окружающей среды, «скрываясь» в трещинах строительных материалов и массово размножаясь даже при отрицательных температурах [8, 9]. Кроме одноклеточных сине-зеленых водорослей в местах «позеленения» поверхностей строительных сооружений обнаружены и нитчатые сине-зеленые водоросли с преимущественным присутствием представителей двух родов порядка *Oscillatoriales*: *Oscillatoria* и *Phormidium*.

Важнейшим из приспособлений сине-зеленых водорослей является выделение слизи вокруг клеток, представляющей собой экзополисахариды. Слизь колоний и слизистые влажные нитчатых форм являются хорошей защитной оболочкой, предохраняющей клетки от вредных воздействий окружающей среды [9]. Кроме того слизь обеспечивает также эффективное закрепление клеток на поверхностях строительных материалов.

В смывах с поверхностей выявлены диатомовые водоросли, относящиеся к порядку *Naviculales*, родам *Pinnularia*, *Nitzschia* и *Navicula*.

Для «настенного» альгоценоза зданий, расположенных вдоль городских дорог было характерно наименьшее видовое разнообразие (не более 5 видов сине-зеленых и зеленых водорослей, в основном - *Pleurococcus sp.*).

В промышленной зоне, где общее количество видов равнялось в среднем 7, отмечалось появление диатомовых водорослей рода *Navicula*, наиболее адаптированных в своей группе к условиям антропогенного стресса. Среди обнаруженных нитчатых зеленых водорослей доминировали представители порядка *Ulotrichales* рода *Chlorhormidium*. Как показали микроскопические исследования, при неблагоприятных условиях, в данном случае промышленных площадок, эти водоросли могут образовывать споры или сокращать объем цитоплазмы, что приводит к фрагментациям нитей. Такая реакция может рассматриваться как потенциальный механизм адаптации к изменяющимся условиям среды, обеспечивающий водорослям выживаемость в урбозкосистемах.

Кроме того, на поверхностях строительных конструкций обнаружены одноклеточные зеленые водоросли, среди которых *Chlorella*, *Scenedesmus*, *Pleurococcus*, *Stichococcus* и др.

Среди сине-зеленых водорослей встречались виды, сочетающие фотосинтез и способность фиксировать атмосферный азот, что повышает их относительную пищевую независимость и позволяет первыми заселять поверхности строительных материалов, создавать условия для развития других организмов, нуждающихся в различных источниках азота.

Полученные селективные культуры зеленых и сине-зеленых водорослей использовали для лабораторного изучения процесса биообращения поверхности бетонных образцов в жидких средах оптимального состава.

О химических процессах, происходящих на поверхности бетона свидетельствовали результаты, полученные при сравнительном изучении содержания основных химических элементов в поверхностном слое образцов после двухмесячного выдерживания в среде культивирования водорослей и параллельно в водопроводной воде (табл. 1).

Таблица 1

**Химический состав поверхностного слоя бетонных образцов, мас. %
(данные приведены к 100%)**

Ион	Среда	
	вода без водорослей (контроль)	питательная среда с водорослями
Ca ²⁺	51,03	45,51
Si ⁴⁺	33,43	37,48
SO ₄ ²⁻	5,231	3,729
Al ³⁺	4,159	4,994
Fe ³⁺ +Fe ²⁺	3,139	3,887
Mg ²⁺	1,166	1,232
K ⁺	1,146	1,889
Na ⁺	0,2517	0,3859
Mn ²⁺	0,0939	0,1050
Zn ²⁺	0,0377	0,0338
PO ₄ ³⁻	0,3156	0,7563

Из данных табл. 1 видно, что при развитии зеленых и сине-зеленых водорослей на поверхности бетонных образцов в наибольшей степени выщелачиваются ионы Ca²⁺ и SO₄²⁻. Усиленное вымывание кальция связано с выделением водорослями кислых метаболитов: углекислого газа и органических кислот. Выделяя эти метаболиты, водоросли нормализуют щелочной уровень рН, что способствует их дальнейшему проникновению вглубь бетона.

Потеря бетоном довольно существенного количества сульфат-ионов скорее объясняется понижением концентрации Ca²⁺ из-за связывания с CO₂, а также вымыванием Na⁺ и K⁺, способствующих переводу сульфатов в растворимое состояние. Отмечается довольно сильное вымывание силикатных ионов, что способство-

вало развитию диатомей. Таким образом, альгоценоз помимо того, что существенно изменял состав поверхностного слоя бетона, формировал также благоприятную минеральную среду для дальнейшего заселения поверхности другими микроорганизмами.

Контроль массы образцов после эксперимента продемонстрировал, что практически все образцы несколько изменили свою массу в сторону увеличения (в ряде случаев на 10%) в сравнении с контрольными, находящимися в воде. Такие изменения связаны, прежде всего, с появлением на поверхности образцов строительных материалов кристаллических новообразований, среди которых обнаружены кварц (*Quartz*, SiO₂), портландит (*Portlandite*, Ca(OH)₂), кальцит (*Calcite*, CaCO₃), хатрурит

(*Hatrrurite*, Ca_3SiO_5), ларнит (*Larnite*, Ca_2SiO_4), гисмондин (*Gismondine*, $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), ско-

утит (*Scawtite*, $\text{Ca}_7(\text{Si}_6\text{O}_{18})\text{CO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) и другие.

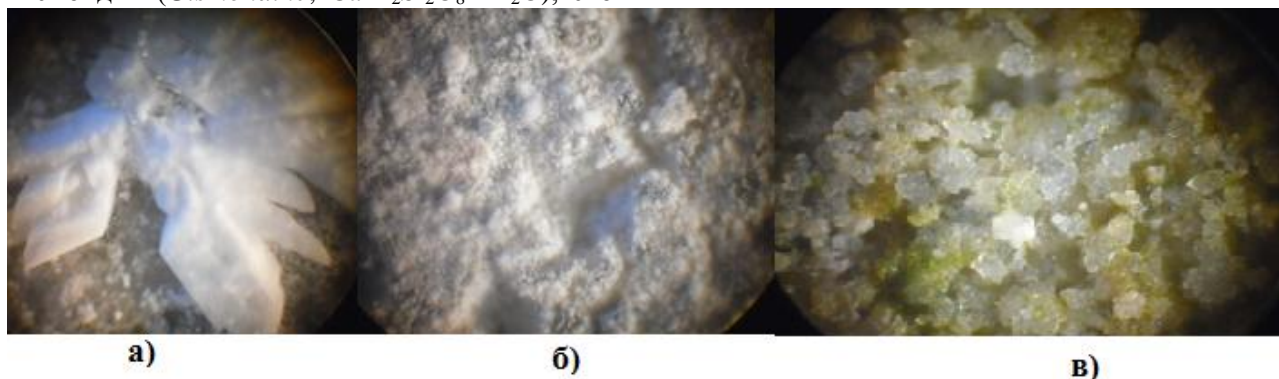


Рис. 2. Минералы на поверхности образцов:
а) кристаллы гипса и портландита; б) портландит на поверхности образца;
в) кальцит и зеленые водоросли

Расчет концентраций кристаллических фаз (табл. 2), выполненный на основе моделирования порошковых дифрактограмм, не только подтвердил переход $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в CaCO_3 при наличии на поверхности бетона водорослей, но и позво-

лил отметить процессы гидратации остаточных клинкерных минералов (Ca_3SiO_5 , Ca_2SiO_4) с образованием кристаллических гидросиликатов, ускоряющиеся под воздействием метаболитов водорослей (табл. 2).

Таблица 2

Оценка фазового состава образцов, %

Минерал	Условие эксперимента		
	вода	среда Чу-10	среда Дрю
Quartz (SiO_2)	57,5	65,6	65,2
Portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)	32,9	-	-
Calcite (CaCO_3)	4,9	26,7	30,5
Hatrrurite (Ca_3SiO_5)	1,6	-	-
Larnite (Ca_2SiO_4)	1,6	0,7	-
Scawtite ($\text{Ca}_7(\text{Si}_6\text{O}_{18})\text{CO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	-	5,8	-
Gismondine ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)	1,5	1,2	4,3

Установлено, что по истечении 60 дней прочность образцов, выдержанных в среде зеленых и сине-зеленых водорослей практически не снижалась при возрастающей, в ряде случаев, их массы. В среде с преобладанием диатомовых водорослей, для которых характерно наличие жесткой силикатной оболочки, несколько увеличивалась не только масса образцов, но и прочность. Сохранение прочностных характеристик бетона даже при интенсивном развитии на его поверхности водорослей может быть связано с закупориванием пор и микротрещин кристаллами новообразующихся минералов

Таким образом, в условиях городской среды поверхности строительных изделий атакует целый комплекс организмов и разрушение, в частности бетона, идет достаточно быстрыми темпами при формирующихся благоприятных условиях для агентов, обладающих преимущественным агрессивным типом воздействия (хемолитотрофные бактерии и микромицеты). Эти агенты способны проводить выщелачивание минеральной матрицы с последующим ослаблением связывающего строительного комплекса.

Проведенное исследование подтвердило тот факт, что развитие биоценозов на поверхности зданий и сооружений определяется совокупностью экологических факторов и климатических условий.

Одним из регулирующих факторов процесса заселения и дальнейшего разрушения поверхности материалов водорослями является величина pH, щелочные значения которой характерны для цементсодержащих изделий, покрытых пленкой карбонатов, что и объясняет возникновение благоприятной ситуации для развития водорослей на бетонных поверхностях.

В процессе изучения влияния факторов окружающей городской среды на особенности альгоценозов установлена корреляция между уровнем антропогенных нагрузок и степенью видового разнообразия водорослей на строительных материалах. Альгоценозы поврежденных поверхностей городских строений разных функциональных зон характеризуются значительным видовым разнообразием, наибольшее из которых наблюдается в условиях минимальной техногенной нагрузки пригородных жилых

районов и загородных рекреационных территорий.

**Работа выполнена в рамках реализации Программы стратегического развития БГТУ им. В.Г. Шухова на 2012-2016 гг.*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Warscheid Th., Braams J., 2000. Biodeterioration of stone: a review. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 46 (4): pp. 343-368.
2. Аварии зданий и сооружений на территории Российской Федерации в 2003 году. М.: Центр качества строительства, 2004, с.
3. Warscheid Th., Braams J., 2000. Biodeterioration of stone: a review. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 46 (4): pp. 343-368.
4. Власов Д.Ю., Зеленская М.С. Развитие микромицетов на каменистом субстрате в условиях эксперимента // *Микология и фитопатология*, 2003. Т. 37. вып. 6. С.33-38.
5. Крыленко В.А., Власов Д.Ю., Дашко Р.Э., Старцев С.А. Аналитика. Проблемы сохранения жилой и производственной инфраструктуры городов от биоразрушений // *Инфрастрой*, 2003. Вып.5(11). С.3-13.
6. Ферронская А.В. Долговечность конструкций из бетона и железобетона: учебное пособие. М.: Изд-во АСВ; 2006. 364 с.
7. Розенталь Н.К. Коррозионная стойкость модифицированных бетонов // *Технологии бетонов*. 2009. № 2. С. 48-50.
8. Гончарова Е.Н., Василенко М.И. Альгоценозы поврежденных городских зданий и сооружений // *Фундаментальные исследования*. 2013. № 8 (1). С. 85-89.
9. Cutler N.A., Viles H.A., Ahmad S., St. McCabe and B.J. Smith, 2013. Algal 'greening' and the conservation of stone heritage structures. *Science of the Total Environment*, 442: pp. 152-164.