

ПРОБЛЕМА ЗАЩИТЫ ПАМЯТНИКОВ ИЗ КАМНЯ ОТ БИООБРАСТАНИЯ. СМЕНА ПАРАДИГМ

Введение

Камень на открытом воздухе разрушается в результате морозного и химического выветривания, действия солей, развития биообрастателей, ветровой эрозии, термического воздействия. Морозное и химическое выветривание, солевая коррозия, развитие биообрастателей протекают при определенном уровне увлажнения камня. Если защитить камень от увлажнения, то можно приостановить эти виды разрушения. Соединения, изменяющие смачиваемость камня, придающие ему водоотталкивающие свойства, которые получили название гидрофобизаторов, защищают его от разрушающих факторов, связанных с увлажнением камня. Гидрофобизаторы нашли широкое применение в практике консервации. Их применяют после проведения всех других реставрационных мероприятий для защиты камня от увлажнения. Обязательным условием проведения гидрофобизации камня является отсутствие его увлажнения за счет подсоса грунтовых вод. Неэффективна гидрофобизация и при повышенной засоленности камня (влажность должна составлять не более 2%, засоленность – до 1%) (Агеева, 2003).

Уменьшая водопоглощение, гидрофобизаторы защищают камень от биообрастания. Возникает вопрос, нужно ли совмещать биоцидную обработку и гидрофобизацию, совместимы ли биоциды и гидрофобы, достаточно ли для защиты от биообрастания только гидрофобной обработки и какова длительность её защитного действия.

Следует отметить, что, по мнению итальянских специалистов в области защиты камня, гидрофобизаторы не следует использовать на фасадах памятников архитектуры вблизи морского побережья. Со временем водоотталкивающие свойства обработанного камня снижаются, защитную

обработку необходимо регулярно повторять. Реколонизация камня после гидрофобизации может иметь уродливую форму в виде образования полос, штрихов, что произошло на мраморных парковых скульптурах дворца Келуш (Португалия) спустя семь лет после обработки (Charola et others, 2007; Delgado Rodrigues, Vale Anjos, Charola, 2011) и на парковых скульптурах Дворца-музея Останкино (рис.1). На гидрофобной поверхности камня капли дождя распределяются неравномерно, в результате образуются водные дорожки (струйки), которые способствуют аккумуляции биомассы и развитию локализованных биопленок. Образование так называемых водных дорожек сильно зависит от структурных характеристик поверхности камня. Шероховатая поверхность, обработанная гидрофобизатором, способствует образованию водных дорожек, тогда как низкая шероховатость препятствует их образованию вследствие более равномерного распределения репеллента на гладкой поверхности (De Muynck et others, 2009).



Ил. 1. Герма, мрамор, музей-усадьба Останкино, затененный участок. Биопленки и следы стекания воды в виде штрихов

Чтобы предотвратить или ограничить повторную колонизацию мраморных скульптур в парке дворца Келуш был применен следующий подход – биоцидные обработки с регулярными интервалами. Биоцидные препараты использовали в низких концентрациях. Такую возможность обеспечивало применение двух препаратов с разным механизмом действия и регулярность обработок. Сначала статуи обрабатывали кистью 1,5% раствором Preventol R 80, спустя шесть месяцев 1,5% раствором $ZnCl_2$. Спустя 2 года повторного роста обрастателей не наблюдалось даже на наиболее увлажняемых участках. Затем биоцидные обработки проводили, когда появлялись визуально наблюдаемые признаки повторной колонизации мрамора умеренной интенсивности. Спустя несколько месяцев после обработки скульптуры чистили щеткой, удаляя остатки обрастателей. Такая обработка предохраняла скульптуры от инвазивной колонизации, но ограниченный рост биокolonизаторов на скульптурах допускался, придавая им вид, соответствующий зданию дворца и старому парку (Charola et others, 2007). Ряд исследователей разделяют такой подход. В последнее время предлагается не удалять лишайники, особенно, когда это касается кладбищ, монастырских стен, чтобы сохранить редкие виды и исходя из эстетических соображений (Sheppard, 2007).

Несмотря на некоторые противопоказания гидрофобизаторы и биоциды широко используются в практике консервации памятников из камня. В отечественной и зарубежной практике реставрации раньше использовали биоцидные соединения, длительно защищающие камень от повторной реколонизации, но в силу их токсичности для окружающей среды использование их было прекращено. После их запрещения стали использовать малотоксичные, но быстро вымываемые биоциды, защищая их от вымывания с помощью гидрофобов. Однако было замечено, что использование биоцидов перед гидрофобизацией не увеличивает срок защитного действия от реколонизации камня, в сравнении с гидрофобной обработкой без предварительного нанесения биоцидного препарата. В ряде

случаев использование биоцидов перед обработкой гидрофобным составом приводило к снижению водоотталкивающих свойств и, следовательно, срока защитного действия, что указывает на нежелательное взаимодействие биоцидного препарата и гидрофоба.

Проблема методов контроля биообрастания камня несмотря на большое количество проведенных на эту тему исследований, большого практического опыта, полученного в ходе реставрации памятников, всё ещё в процессе решения. Для разработки мер по защите памятников из камня от биообрастания необходимо выявить и определить виды обрастателей, провести мониторинг тестовых участков, расчищенных и обработанных биоцидами и гидрофобизаторами, или только гидрофобизаторами. При принятии того или иного консервационного решения следует учитывать породу камня, механические, физические и химические характеристики камня, его состояние сохранности, причины его переувлажнения, источники загрязнения.

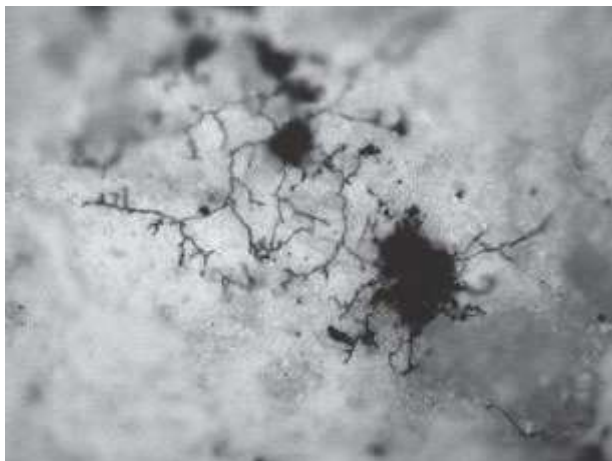
1. Биообрастатели

На памятниках из камня на открытом воздухе развиваются водоросли, цианобактерии, лишайники, грибы, органотрофные и литотрофные бактерии, мхи и сосудистые растения. Существует большое количество работ, посвященных изучению видового разнообразия биообрастателей, воздействию их на каменный субстрат, исследованию в лабораторных условиях действия различных химических соединений на тест - культуры водорослей, цианобактерий, грибов, бактерий. Действие биоцидов на обрастатели и длительность их защитного действия изучалась также в натуральных условиях. Следует отметить, что результаты натуральных испытаний часто отличались от лабораторных. Это связано с тем, что лабораторные тесты проводятся с использованием быстрорастущих тест-культур. Чаще всего бактерий и водорослей, развивающихся в жидких средах. Аэрофитные зеленые водоросли, цианобактерии, которые развиваются на камне, имеют

более толстые клеточные стенки, но они медленно растут, поэтому они неудобны для лабораторных испытаний (Ortega-Morales and others, 2018).

Наиболее интересные данные, связанные с изучением биообрастателей, полученные в последние годы – это выявление микроколониальных темноокрашенных (дематиеидных) грибов, развивающихся в порах и микротрещинах, виды родов *Coniosporium*, *Phaeosclera*, *Sarcinomyces*, *Phaeosoccomyces*, которые получили название литобионтных (рис.2). Благодаря их устойчивости к высокому уровню инсоляции, недостатку органического вещества и влаги они относятся к экстремофильным формам грибов (Sterflinger, 2000; Sterflinger, 2010; Власов 2011).

Они имеют толстые пигментированные (меланинсодержащие) клеточные стенки, для них характерны меристематическая и дрожжеподобная формы роста (Власов, 2011). Экстремально медленная скорость роста микроколоний является ответом на отсутствие органического вещества и стрессовое воздействие окружающей среды. Продуцируемые ими пигменты, такие как каротиномды, микоспорины и меланины защищают их от УФ радиации. Многослойные клеточные стенки и накопление трегалозы защищают - от температурного стресса. Устойчивость к осмотическому стрессу обеспечивается высоким содержанием глицерина внутри клеток. Благодаря устойчивости к неблагоприятным факторам окружающей среды эти грибы выживают в тех условиях, когда невозможно развитие других форм микроорганизмов. Развиваясь на камне, они участвуют в процессе его биоповреждения. Однако крайне низкая скорость роста темноокрашенных литобионтных грибов вследствие недостатка питательных веществ ограничивает их вклад в процесс выветривания камня (Hoffland et others, 2004). Менее специфическую группу грибов, которые могут развиваться на камне, образуя микроколонии, составляют дрожжеподобные грибы виды родов *Aureobasidium*, *Exophiala*, *Trimmatostroma* (Власов, 2011).



Ил. 2. Развитие меристематических темноокрашенных грибов на известняке, стереомикроскоп, 50× (Pinna, 2017).

Также важно, что рост микроорганизмов на камне стал рассматриваться не как обрастание зелеными водорослями или цианобактериями или гетеротрофными микроорганизмами, а как развитие биопленок. Согласно определению Донлана и Костертон, биопленка – это прикрепленное микробное сообщество, в котором клетки прикреплены к субстрату или к границе раздела фаз или друг к другу. Они погружены в матрикс, состоящий из внеклеточных полимерных веществ, продуцируемых ими (Donlan, Costerton, 2002). Установлено, что образование биопленок обеспечивает микроорганизмам повышенную устойчивость к различным стрессорным агентам, в том числе к антимикробным средствам.

Первым шагом в формировании биопленок, содержащих разные виды биообрастателей, является осаждение на камень клеток микроорганизмов – первоначальных поселенцев и синтез ими внеклеточных органических веществ, которые улучшают их прикрепление к поверхности. Затем они развиваются в виде прикрепленных к поверхности камня микроколоний, клетки которых погружены в матрикс, представляющий собой образованные ими внеклеточные полимерные вещества, такие как полисахариды или белки. По мере развития микроколоний вследствие объединения их с другими микроорганизмами они пополняются вторичными поселенцами. В результате виды, которые не могли бы прикрепиться к неколонизированной

поверхности камня, становятся частью биопленки (Gorbushina, 2007). Биопленки, которые образуются на памятниках из камня, как правило, содержат фототрофные и гетеротрофные микроорганизмы (Villa et others, 2015). Фотосинтезирующие микроорганизмы благодаря образованию внеклеточных полимерных веществ, таких как полисахариды, поддерживают рост гетеротрофных бактерий. Гетеротрофы в свою очередь могут способствовать росту цианобактерий.

Благодаря липкой поверхности биопленки становятся ловушками для пылевых частиц, ускоряя процесс загрязнения камня. В результате биопленки являются скоплениями микроорганизмов, внеклеточных полимерных веществ, многовалентных катионов, неорганических частиц, других биогенных продуктов. Наиболее характерные компоненты внеклеточных полимерных веществ – полисахариды, в их составе были определены также белки, нуклеиновые кислоты, липиды и гуминовые соединения, иногда в существенных количествах. Внеклеточные полимерные вещества образуют трехмерный, желеподобный сильно обводненный матрикс, в котором находятся микроорганизмы. Доля внеклеточных полимерных веществ от общего количества органического вещества биопленки может изменяться от 50 до 90%, причем на солнечной стороне их доля выше в сравнении с теневой. Внеклеточные полимерные вещества играют важную роль в прикреплении микроорганизмов к каменной поверхности и в защите микробных сообществ от действия токсичных веществ (Diao et others, 2014).

То, что в ассоциации с фототрофами на камне развиваются гетеротрофные микроорганизмы, было известно давно. Но на то, что клетки микроводорослей и микроорганизмов погружены в слизистые внеклеточные полимерные вещества, защищающие их от неблагоприятных воздействий, обратили внимание не так давно. Существование микроорганизмов на камне в виде биопленок является одним из объяснений различий в результатах

лабораторных испытаниях с культурами микроорганизмов и натурных испытаний.

Развитию биопленок способствует затенность. Скульптуры, находящиеся в тени деревьев, покрыты биопленками значительно в большей степени, чем скульптуры на открытых участках (рис.3,4). Биопленки более интенсивно развиваются на северных и затенных деревьями фасадах памятников архитектуры, в цокольной части, около водостоков (рис.5-8). Цвет биопленок может изменяться от зеленого до черно-серого почти черного цвета (рис.5,7) в зависимости от преобладающих форм фототрофных микроорганизмов и количеству поверхностных загрязнений.



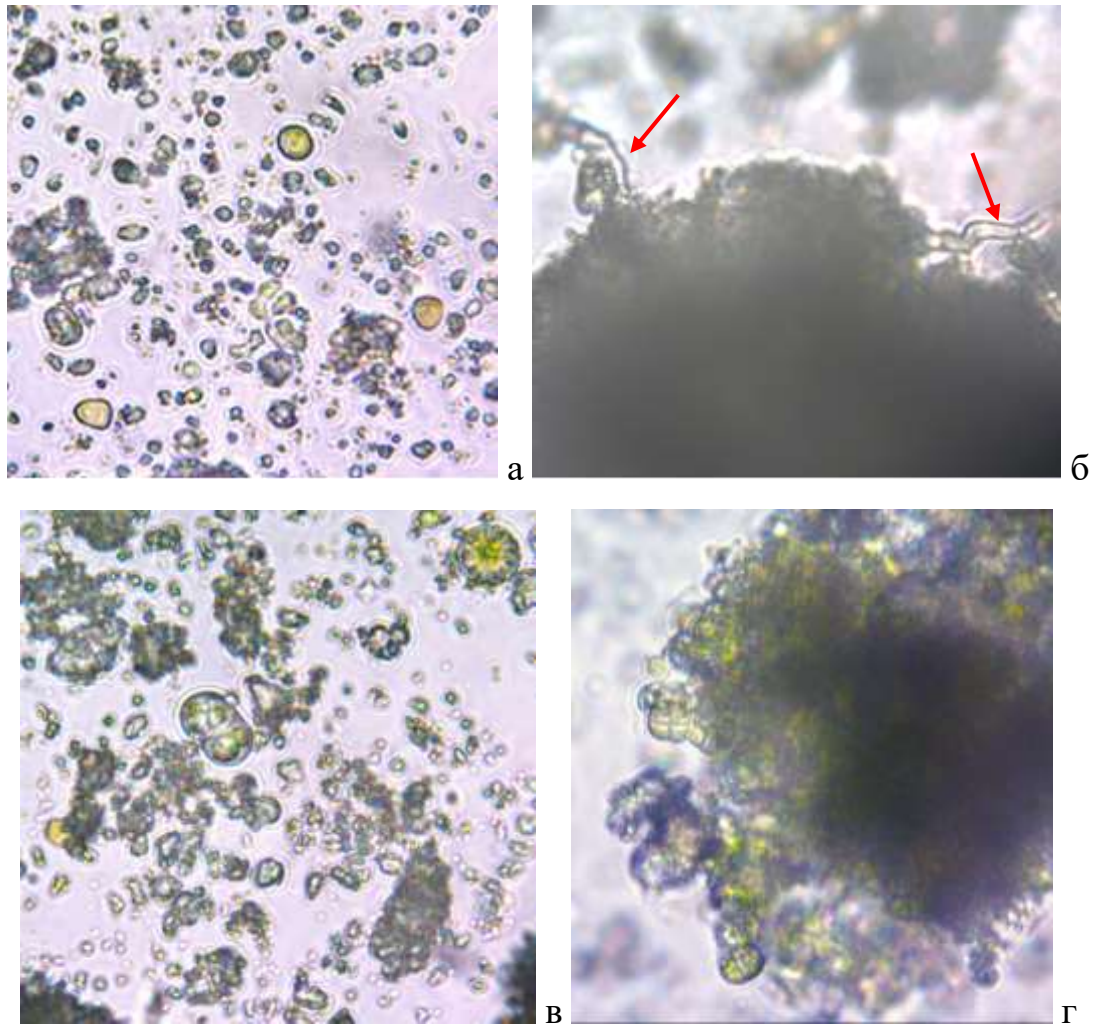
Ил. 3. Герма, мрамор, музей-усадьба Останкино, под пологом кустарников и деревьев. Бюст, за исключением небольших участков, покрыт биопленками и поверхностными загрязнениями



Ил. 4 а, б. Парк музея Останкино, гермы, мрамор. На открытом участке на бюстах био пленок значительно меньше, чем в тени



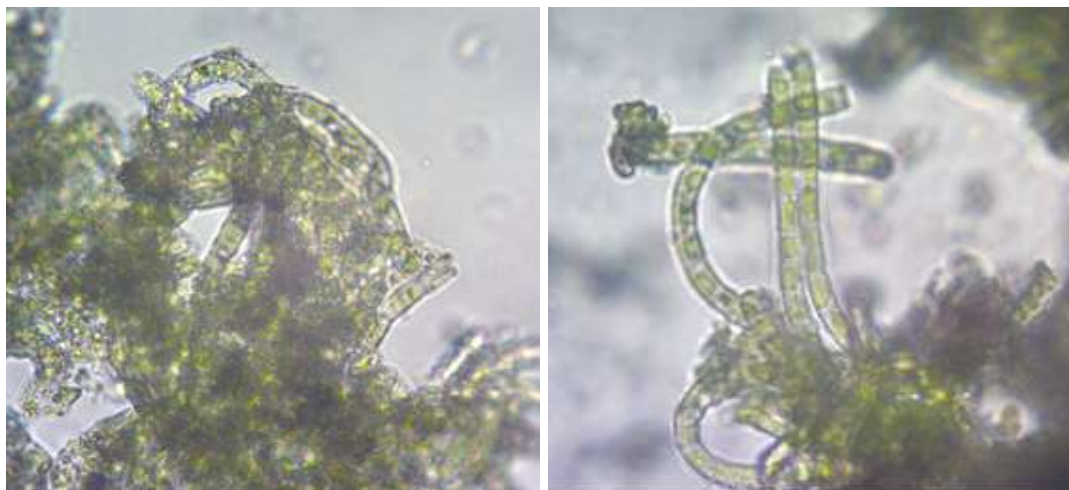
Ил. 5. Борисоглебский собор в Торжке. Нижняя ступень северного портала показана стрелкой, на поверхности лежит снег. Ступень из белого камня полностью покрыта темной био пленкой (справа)



Ил. 6. а, в, г – цианобактерии (*Gleocapsa* sp., *Gomphosphaeria* sp.) и аэрофильные зеленые водоросли; б – грибной мицелий; проба биопленки со ступени собора, микроскоп Leica DMLS2



Ил. 7. Здание поликлиники №64 в Москве, памятник архитектуры, построено в 1931 году; биопленка зеленого цвета на стене около водосточной трубы



Ил. 8. Клетки нитчатой зеленой водоросли *Ulothrix* sp., обнаруженные в пробе биопленки со стены здания, микроскоп Leica DMLS2

В последнее время появляются работы, в которых биопленкам и лишайникам отводят незначительную роль в процессе выветривания натурального и искусственного камня. Есть мнение, что они даже защищают камень от разрушения. Связь между лишайниками, биопленками и повреждением камня, ранее казавшаяся неопровержимой, стала спорной (Doehne, Price, 2010). Есть наблюдения, которые поддерживают версию о защитной роли лишайников. В археологической зоне Фьезоле (недалеко от Флоренции) на блоках мрамора и песчаника после удаления с них лишайников были сделаны замеры адсорбции воды. Они показали, что значения адсорбции воды камня после удаления лишайников очень близки к значениям для неповрежденного камня. Авторы исследования считают, что отсутствие разницы в значениях адсорбции связано с тем, что талломы накипных лишайников защищали камень от небиогенных факторов выветривания (Pinna, Salvadori, Galeotti, 2012).

Исследование колонизации лишайниками восьми европейских памятников, находящихся в различных условиях окружающей среды, показало, что лишайники предохраняют камень от намокания и могут действовать как барьер, защищающий от загрязнения сульфатами (Concha-Lozano et others, 2012). Плотные слоевища накипных лишайников могут

защищать камень от ветровой и дождевой эрозии. Они уменьшают термальный стресс, адсорбируют агрессивные вещества, демпфируя физическое и химическое выветривание. Отслоений, шелушений, высолов, ячеистой эрозии поверхности больше на неколонизированной лишайниками поверхности камня в сравнении с колонизированной (Ariño et others, 1995; Wendler, Prasartet, 1999). С помощью наблюдений за конструкциями из песчаника в центре Белфаста удалось установить, что участки, колонизированные водорослевыми биопленками менее выветренные, чем неколонизированные участки (Cutler et others, 2013).

Однако разрушающее воздействие лишайников и биопленок на каменный субстрат показано во многих исследованиях, результаты которых не вызывают сомнения. Так, например, показано, что покрытые лишайниками скалы выветриваются на порядок быстрее, чем голые скальные обнажения (Stretch, Viles, 2002). В другом исследовании частицы камня были обнаружены в сердцевинном слое накипных лишайников, растущих на серпентините в Альпах (Favero-Longo et others, 2005). Схожие результаты были получены для эпилитных лишайников на граните (Prieto, Edwards, Seaward, 2000; Schiavon, 2002). Необходимы дополнительные исследования, посвященные защитному действию лишайников и биопленок. Повреждение камня или его отсутствие зависят от видового состава обрастателей, формы их роста, породы камня, условий внешней среды (влага, температура, загрязнения), климатических особенностей.

Так, например, в пределах одной мраморной плоскости с петроглифами, местонахождение Саган-Заба (западный берег озера Байкал) были обнаружены накипные лишайники и цианобактерии. После удаления талломов лишайников (*Caloplaca* sp.) поверхность камня, которая была под ними, отличалась по цвету от окружающего камня, так как талломы мешали действию солнечного света, образованию так называемого скального загара. Других изменений поверхности камня не было обнаружено. На памятнике были обнаружены и другие биообрастатели - эндолитные цианобактерии,

которые развивались не на поверхности мрамора, а под коркой перекристаллизованного кальцита с зернами мрамора, толщиной несколько миллиметров: *Gleocapsa* sp., *Nostoc* sp., *Stigonema* sp. Верхний слой мрамора, на участках, заселенных цианобактериями, был ослаблен и имел тенденцию к отслаиванию (Ребрикова, 1999). Отличия цвета камня после удаления лишайников особенно заметны на скальных обнажениях, покрытых темным загаром (песчаник, местонахождение Тамгалы, Казахстан). Эпилитные лишайники растут очень медленно, были попытки их использования для определения возраста петроглифов. Из-за низкой скорости роста оценить вызываемые ими повреждения сложно. Однозначного мнения относительно разрушительного действия нет. При проведении консервационных работ на петроглифических памятниках решение об удалении лишайников принималось лишь в случае, когда их талломы мешали восприятию рисунков.

Исследования биоповреждения камня не должно ограничиваться только списками обнаруженных видов водорослей, лишайников, цианобактерий, микроорганизмов. Необходимо также с помощью количественных методов анализа оценивать повреждение камня или его отсутствие вследствие развития обрастателей. Надежные количественные методы необходимо использовать, чтобы было можно сравнивать результаты, полученные разными исследователями, так как в этом вопросе существуют определенные противоречия.

Часто в работах, связанных с исследованием биоповреждений, факт присутствия на поверхности камня бактерий или грибов рассматривается как биоповреждение. В этом случае можно говорить лишь о потенциальной возможности повреждения (Ruga et others, 2015; Pinna, 2017), чем о самом повреждении. На поверхности камня есть клетки микроорганизмов, осевшие из воздуха, принесенные с различными рода загрязнителями, они могут находиться в стадии покоя в отсутствии подходящих условий для развития.

2. Биолечение памятников из камня

Интересное и многообещающее направление в области консервации камня – использование микроорганизмов для очистки и укрепления камня. Черные корки на двух скульптурах из оолитового известняка во дворе замка Буонконсильо (Тренто, Италия) были удалены путем применения компрессов с сульфатредуцирующими бактериями, при этом была сохранена патина, присутствующая на камне (Polo et others, 2010). Эксперименты по биочистке от черных корок красного и белого каррарского мрамора, а также серпентинита проводились на стенах собора Санта-Мария-дель-Фьоре во Флоренции (Gioventù et others, 2011). Денитрифицирующие и сульфатредуцирующие бактерии были использованы для удаления нитратных и сульфатных солей с туфа, собор Матера (Италия) (Alfano et others, 2011).

Исследования показали, что лучший материал для компресса, в состав которого входят бактериальные клетки, – желирующий агент карбогель (carbogel – полимеры акриловой кислоты, сшитые с алкениловыми эфирами сахаров или многоатомных спиртов, разной степени вязкости). Недостатком биоочистки является то, что в случае толстых корок требуется неоднократное наложение компрессов, в результате тратится много времени. Для ускорения процесса предлагается совмещать биоочистку с использованием неионогенного детергента (Troiano et others, 2013). Преимущества биоочистки над другими методами очистки пока полностью не доказаны.

Другой биотехнологический подход к очистке камня предлагает использовать фермент глюкозооксидазу (Valentini, Diamanti, Palleschi, 2010). В ходе окисления глюкозы, катализируемого ферментом, образуется перекись водорода. В лабораторных условиях водный раствор глюкозооксидазы (0,5 мг/мл) и растворы глюкозы в различных концентрациях (от 2 до 400 мМ) обрабатывались биопленки на образцах травертина, мрамора и туфа. В составе биопленок были водоросли, цианобактерии и гетеротрофные бактерии. Результаты очистки были

хорошими, при этом в сравнении с использованием химических растворов перекиси водорода негативное воздействие на камень было меньшим. Такой же подход используется для удаления черных пятен с красочного слоя настенной живописи (Marco et others, 2017).

Появились работы, связанные с использованием минерализующей способности микроорганизмов, позволяющей укрепить известняки и бетон. Предлагается использовать индуцируемое микроорганизмами осаждение карбонатов, так называемую биоцементацию, для увеличения прочности камня и для залечивания трещин (De Muynk, De Belie, Verstraete, 2010). Благодаря созданию высокой щелочности среды, способствующей осаждению кальцита, гидролиз мочевины уреолитическими бактериями был выбран, как наиболее подходящий путь образования карбонат-ионов (De Muynck et others, 2010). Мочевина под действием микроорганизмов, содержащих фермент уреазу, превращается в аммиак и углекислый газ. Микроорганизмы непосредственно участвуют в осаждении кальцита, обеспечивая центр кристаллизации. Клеточная стенка, имеющая отрицательный заряд, притягивает ионы кальция, находящиеся в растворе. Осаждение карбоната кальция на клеточную стенку происходит, пока существует супернасыщение ионами кальция. Когда клетка полностью инкапсулируется, она умирает (De Muynck et others, 2010). На пористых образцах кладочного раствора было показано, что спустя 200 часов после нанесения на них ила, содержащего бактерии, мочевины, питательный бульон и растворимые соли кальция, количество адсорбированной ими воды сократилось в пять раз в сравнении с контрольными образцами (De Belie, De Muynck, Verstraete, 2006), подтверждая эффективность микробной цементации. Пористые образцы известняка благодаря микробному осаждению кальцита могут быть укреплены (консолидированы) на глубину до 30 мм (Pinna, 2017).

Однако у данного метода биолечения есть недостатки, которые препятствуют его использованию на объектах культурного наследия. Это

использование органических питательных веществ и достаточно большое время для достижения эффекта укрепления. Органические вещества стимулируют неконтролируемый рост аэрофильных микроорганизмов, в частности темноокрашенных грибов, развитие которых приводит к образованию трудноудаляемых пятен.

Ещё одно направление биолечения – использование естественных врагов биокolonизаторов камня. Английские ученые обнаружили в естественной среде вирусы водорослей и изучали возможность их использования для ингибирования роста водорослевых биопленок на двух видах известняков. Лабораторные тесты показали, что с помощью вирусов возможно элиминировать определенные виды водорослей, но для водорослевых биопленок, образующихся на известняках на открытом воздухе, необходим выделить более широкий спектр вирусов водорослей (May et others, 2011).

3. Бициды природного происхождения для контроля биообрастания

В последнее время предлагается использовать нетоксичные для людей и окружающей среды природные ингибиторы образования биопленок, например, противообрастающие соединения, образуемые морскими и наземными организмами. Многие морские организмы образуют метаболиты, которые препятствуют адгезии микроорганизмов к их поверхности. Среди них zostеровая кислота (продуцент морская трава *Zostera marina*), соли N-алкилпи-ридиния (продуцент морская губка *Reniera sarai*), экстракт красной водоросли *Ceramium botryocarpum*. Многие наземные растения являются продуцентами веществ, обладающих антимикробными свойствами, которые не уступают по эффективности используемым бицидам, и в тоже время не токсичны для людей и окружающей среды. К таким веществам относятся эфирные масла корицы (*Cinnamomum verum*), душицы (*Origanum vulgare*), гвоздики (*Syzygium aromaticum*, синонимы *Eugenia aromatica*, *E. caryophyllus*) и других растений. К веществам природного происхождения, обладающими биоцидными свойствами, принадлежат капсаицин (продуцент стручковой

перец *Capsicum annuum*), хитозан, который содержится в клеточных стенках клеток грибов отдела *Zygomycota* и в панцирях ракообразных.

В садах Ватикана для защиты каменных памятников от биокolonизации исследовались природные соединения. В качестве противообрастательных средств был испытан целый ряд эфирных масел. Эффективность эфирных масел оценивалась с помощью измерения цвета и биолюминесценции поверхности и с помощью специальной грибной ленты, которая позволяет определить количество оставшихся грибов. Наилучшие результаты показали розмариновое и эфирное масло солодки (Lorenzetti Ch., 2017). К сожалению, нет информации о длительности защитного действия после обработки эфирными маслами.

Для предупреждения биообрастания камня исследуется возможность использования природных соединений в комбинации с гидрофобизаторами и консолидантами. Капсаицин, циннальдегид (коричный альдегид), пиридиниевые соли (морская губка), зостеро́вая кислота (морская трава) смешивали с консолидантом Silires BS OH 100 (этилсиликат Wacker Chemie AG) и гидрофобом SiliresBS 200 (смесь силана и силоксана, разбавляется органическими растворителями Wacker Chemie AG). Полученными смесями были обработаны образцы мрамора. Испытания были проведены в лабораторных условиях, в качестве тест-культур использовали цианобактерии, водоросли, грибы и простейшие. Результаты были неудовлетворительными, добавка природных соединений в состав гидрофобизатора и консолиданта не защищала образцы мрамора от образования биопленок (Cuzman, et others, 2011).

Заключение

В заключении можно перечислить основные изменения, которые произошли в подходах к решению проблемы защиты памятников и камня от биообрастания.

Рост микроорганизмов на камне стал рассматриваться не как обрастание зелеными водорослями или цианобактериями или

гетеротрофными микроорганизмами, а как развитие биопленок - развития комплекса фототрофных и гетеротрофных микроорганизмов, погруженных в слизистые вещества, которые играют защитную роль, как в отношении неблагоприятных факторов внешней среды, так и в отношении действия биоцидов. Тот факт, что в натуральных условиях развивается комплекс микроорганизмов, защищенных внеклеточными слизистыми веществами, объясняет существенные различия в результатах лабораторных и натуральных испытаний. В лабораторных испытаниях используются отдельные культуры водорослей, цианобактерий или гетеротрофных микроорганизмов, устойчивость которых, когда они не защищены слизистыми веществами, значительно меньше.

В ряде случаев принимаются решение об отказе от удаления водорослевых биопленок с памятников, когда установлено, что они действуют как защитное покрытие. Принимаются решения об отказе от удаления лишайников, когда их разрушающее действие не установлено, а удаление талломов лишайников приводит к нарушению эстетического восприятия памятника (накипные лишайники на твердых породах камня).

Показана возможность роста экстремальных олиготрофных темноокрашенных форм грибов в порах и в трещинах камня.

Отказ от применения веществ, токсичных для людей и окружающей среды. Использование природных противообрастающих соединений, источниками которых являются морские и наземные организмы.

Использование микроорганизмов и их метаболитов для очистки и укрепления камня.

Список литературы

1. Агеева Э.Н. Консервация и реставрация скульптуры из камня, РГГУ, ГОСНИИР, М., 2003, с.72
2. Власов Д.Ю. Микроскопические грибы в экстремальных местообитаниях: биологическое разнообразие и сущность взаимодействий

Междисциплинарный научный и прикладной журнал «Биосфера», 2011, т.3, №4, с. 479-492.

3. Ребрикова, Биология в реставрации, ГОСНИИР, М.,1999, www.gosniir.ru
4. Alfano, G.; Lustrato, G.; Belli, C.; Zanardini, E.; Cappitelli, F.; Mello, E.; Sorlini, C.; Ranalli, G. The Bioremoval of Nitrate and Sulfate Alterations on Artistic Stonework: The Case Study of Matera Cathedral after Six Years from the Treatment. *Int. Biodeteriorat. Biodegradat.* 2011, 65, 1004–1011.
5. Ariño, X.; Ortega-Calvo, J. J.; Gomez-Bolea, A.; Saiz-Jimenez, C. Lichen Colonization of the Roman Pavement at Baelo Claudia (Cadiz, Spain): Biodeterioration vs. Bioprotection. *Sci. Total Environ.* 1995, 67, 353–363.
6. De Belie, N.; De Muynck, W.; Verstraete, W. A Synergistic Approach to Microbial Presence on Concrete: Cleaning and Consolidating Effects. *FIB Struct. Concrete*, 2006, 7(3), 1–14.
7. Charola, A. E.; Vale Anjos, M.; Delgado Rodrigues, J.; Barreiro, A. Developing a Maintenance Plan for the Stone Sculptures and Decorative Elements in the Gardens of the National Palace of Queluz, Portugal. *Restorat. Build. Monuments* 2007, 13(6), 377–388.
8. Charola, A. E., McNamara, C. J., Koestler, R. J., Eds.; Smithsonian Institution Scholarly Press: Washington, D.C., 2011; pp. 71–85.
9. Concha-Lozano, N.; Gaudon, P.; Pages, J.; de Billerbeck, G.; Lafon, D.; Etteradossi, O. Protective Effect of Endolithic Fungal Hyphae on Oolitic Limestone Buildings. *J. Cult. Heritage*, 2012, 13(2), 120–127.
10. Cutler, N. A.; Viles, H. A.; Ahmad, S.; McCabe, S.; Smith, B. J., Algal “greening” and the Conservation of Stone Heritage Structures. *Sci. Total Environ.*, 2013, 442, 152–164.
11. Cuzman, O. A.; Camaiti, M.; Sacchi, B.; Tiano, P. Natural Antibiofouling Agents as New Control Method for Phototrophic Biofilms Dwelling on Monumental Stone Surfaces. *Int. J. Conserv. Sci.* 2011, 2 (1), 3–16.
12. Delgado Rodrigues, J.; Vale Anjos, M.; Charola, A. E. Recolonization of Marble Sculptures in a Garden Environment. In *Biocolonization of Stone: Control*

and Preventive Methods: Proceedings from the MCI Workshop Series; Charola, A. E.; Charola, A. E., McNamara, C. J., Koestler, R. J., Eds.; Smithsonian Institution Scholarly Press: Washington, D.C., 2011; pp. 71–85.

13. Diao, M.; Taran, E.; Mahler, S.; Nguyen, A.V. A Concise Review of Nanoscopic Aspects of Bioleaching Bacteria–Mineral Interactions. *Adv. Coll. Interface Sci.*, 2014, 212, 45–63.

14. Doehne, E.; Price, C. A. *Stone Conservation: An Overview of Current Research*. 2nd ed.; The Getty Conservation Institute: Los Angeles, 2010; p. 158.

15. Favero-Longo, S. E.; Castelli, D.; Salvadori, O.; Belluso, E.; Piervittori, R. Pedogenetic Action of the Lichens *Lecidea atrobrunnea*, *Rhizocarpon geographicum* gr. and *Sporastatia testudinea* on Serpentinized Ultramafic Rocks in an Alpine Environment. *Int. Biodeteriorat. Biodegradat.*, 2005, 56, 17–27.

16. Donlan, R.M. and Costerton, J.W. Biofilms: Survival mechanisms of clinically relevant microorganisms. *Clin. Microbiol. Rev.* 15, 2002, 167–193.

17. Gioventù, E.; Lorenzi, P. F.; Villa, V.; Sorlini, C.; Rizzi, M.; Cagnini, A.; Griffo, G.; Cappitelli, C. Comparing the Bioremoval of Black Crusts on Colored Artistic Lithotypes of the Cathedral of Florence with Chemical and Laser Treatment. *Int. Biodeteriorat. Biodegradat.* 2011, 65, 832–839.

18. Gorbushina, A. A. Life on the Rocks. *Environ. Microbiol.*, 2007, 9(7), 1613–1631.

19. Hoffland, E.; Kuyper, T. W.; Wallander, H.; Plassard, C.; Gorbushina, A. A.; Haselwandter, H.; Holmstrom, S.; Landeweert, R.; Lundstrom, U. S.; Rosling, A.; Sen, R.; Smits, M. M.; van Hees, P. A. W.; van Breemen, N. The Role of Fungi in Weathering. *Front. Ecol. Environ.* 2004, 2(5), 258–264. Cited by Pinna D. *Coping with biological growth on stone heritage objects: methods, products, applications and perspectives* Toronto: Apple Academic Press, 2017.

20. Lorenzetti Ch. *Garden Mixologists*. 14 September, 2017. – URL: <http://wordpressunik.ru>. (дата обращения 20.02.19).

21. May E., D. Zamarreno, S. Hotchkiss, J. Mitchell, R. Inkpen *Bioremediation of Algal Contamination*. In *Biocolonization of Stone: Control and Preventive*

Methods. Proceedings from the MCI Workshop Series, Smithsonian Institution Scholarly Press Washington D.C., 2011, ISSN (print) 1949-2359, ISSN (online) 194982367

22. Marco A., Viera E., Pintado M., Moreira P.R. Innovative biotechnology solutions for black stain removal and preventive conservation of historical and culturally important mural paintings. DOI: 10.13140/RG.2.2. 36057.77920 *ciencia 2017 – Encontro com a ciencia e Tecnologia em Portugal*, 597 de Julho, Centro de Congressos de Lisboa.

23. De Muynck, W.; Maury Ramirez, A.; De Belie, N.; Verstraete, W. Evaluation of Strategies to Prevent Algal Fouling on White Architectural and Cellular Concrete. *Int. Biodeteriorat. Biodegradat.* 2009, 63, 679–689.

24. De Muynck, W.; Verbekenc, K.; De Belie, N.; Verstraete, W. Influence of Urea and Calcium Dosage on the Effectiveness of Bacterially Induced Carbonate Precipitation on Limestone. *Ecol. Eng.*, 2010, 36, 99–111.

25. De Muynck, W.; De Belie, N.; Verstraete, W. Microbial Carbonate Precipitation in Construction Materials: A Review. *Ecol. Eng.* 2010, 36, 118–136.

26. Ortega-Morales B.O., Reyes-Estebanez M.M., GaylatdeJ.C., Camacho-Chab J.C., Samartin P., Chan-Bacab, Granados-Echegoyen C.A., Pereafiez-Sacarias J.E. Antimicrobial properties of nanomaterials used to control microbial colonization of stone substrata/ - in *Advanced Materials for the Conservation of Stone/ Springer International Publishing AG 2018* M. Hosseini, I. KARAPANagiotis (eds.) https://doi.org/10.10007/978-3-319-72260-3-3_13

27. Pinna D. *Coping with biological growth on stone heritage objects: methods, products, applications and perspectives* Toronto: Apple Academic Press, 2017, ISBN 978-1-77188-532-4.--ISBN 978-1-315-36551-0 (PDF)

28. Pinna, D.; Salvadori, B.; Galeotti, M. Monitoring the Performance of Innovative and Traditional Biocides Mixed with Consolidants and Water-Repellents for the Prevention of Biological Growth on Stone. *Sci. Total Environ.*, 2012, 423, 132–141.

29. Prieto, B.; Edwards, H. G. M.; Seaward, M. R. D. A Fourier Transform-Raman Spectroscopic Study of Lichen Strategies on Granite Monuments. *Geomicrobiol. J.*, 2000, 17(1), 55–60.
30. Polo, A.; Cappitelli, F.; Brusetti, L.; Principi, P.; Villa, F.; Giacomucci, L.; Ranalli, G.; Sorlini, C. Feasibility of Removing Surface Deposits on Stone Using Biological and Chemical Remediation Methods. *Microbial Ecol.*, 2010, 60(1), 1–14.
31. Schiavon, N., Biodeterioration of Calcareous and Granitic Building Stones in Urban Environments. *Geol. Soc. Special Publ.*, 2002, 205, 195–205.
32. Ruga, L.; Orlandi, F.; Romano, B.; Fornaciari, M. The Assessment of Fungal Bioaerosols in the Crypt of St. Peter in Perugia (Italy). *Int. Biodeteriorat. Biodegradat.* 2015, 98, 121–130.
33. Sheppard, M. A Liking for Lichen. *ICON news: the magazine of the Institute of Conservation*, 2007, 13, 22–26.
34. Sterflinger, K., Fungi as Geologic Agents. *Geomicrobiol. J.*, 2000, 17(2), 97–124.
35. Sterflinger, K., Fungi: Their Role in Deterioration of Cultural Heritage. *Fungal Biol. Rev.*, 2010, 24, 47–55.
36. Stretch, R.; Viles, H. A. Lichen Weathering on Lanzarote Lava Flows. *Geomorphology*, 2002, 47, 87–94.
37. Troiano, F.; Gulotta, D.; Balloi, A.; Polo, A.; Toniolo, L.; Lombardi, E.; Daffonchio, D.; Sorlini, C.; Cappitelli, F. Successful Combination of Chemical and Biological Treatments for the Cleaning of Stone Artworks. *Int. Biodeteriorat. Biodegradat.*, 2013, 85, 294–304
38. Valentini, F.; Diamanti, A.; Palleschi, G. New Bio-cleaning Strategies on Porous Building Materials Affected by Biodeterioration Event. *Appl. Surf. Sci.*, 2010, 256, 6550–6563.
39. Villa, F.; Pitts, B.; Lauchnor, E.; Cappitelli, F.; Stewart, P. S. Development of a Laboratory Model of a Phototroph-Heterotroph Mixed-Species Biofilm at the Stone/Air Interface. *Front. Microbiol.*, 2015, 6, 1251.

40. Wendler, E.; Prasartet, C. Lichen Growth on Old Khmer-style Sandstone Monuments in Thailand: Damage Factor of Shelter? In 12th Triennial Meeting of the ICOM Committee for Conservation, Lyon, 1999; Vol. 2, pp 750–754.