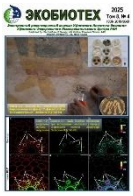
ЭКОБИОТЕХ
ISSN 2618-964X http://ecobiotech-journal.ru



УДК 504.7:573.7 UDC 504.7:573.7

Микроорганизмы на фресках Софийского собора Вологодского Кремля

Власов А.Д.[1*], Зеленская М.С.[2], Власов Д.Ю.[2,3]

[1] Санкт-Петербургский филиал архива Российской академии наук;
[2] Санкт-Петербургский государственный университет;
[3] Ботанический институт им. В.Л. Комарова РАН;
Санкт-Петербург, Россия
E-mail: alex_vlasov@mail.ru

Аннотация

Настенная живопись в памятниках архитектуры может подвергаться деструктивному воздействию микроорганизмов. В числе деструкторов настенной живописи чаще всего упоминаются бактерии и микроскопические грибы.

Данная работа посвящена выявлению возможных причин возникновения поверхностной патины на фресках Софийского собора Вологодского кремля. С этой целью был изучен состав сообщества микроорганизмов на поверхности живописи, а также в воздушной среде Собора. Отбор проб проводился неповреждающими методами под контролем сотрудников Вологодского музея-заповедника. Особое внимание было уделено белесой патине, покрывающей стены с фресковой живописью на значительной площади. Выделенные микроорганизмы были идентифицированы по морфологическим признакам и молекулярным маркерам.

Поскольку образование белесой патины на поверхности фресок может быть связано с активностью микроорганизмов, приводящей к отложению вторичного кальцита (подобная картина известна на фресках в Италии), были проведены эксперименты по оценке способности выделенных микроорганизмов (бактерий и микроскопических грибов) к образованию кальцита. Сканирующую электронную микроскопию использовали для выявления и описания кристаллических структур кальцита, образовавшихся в модельных системах с грибами и бактериями.

В результате проведенных исследований было показано, что выделенные микроорганизмы (грибы и бактерии) способны к образованию вторичного кальцита. В пробах с поверхности фресок доминировала бактерия *Bacillus siamensis*. Выделенный штамм *B. siamensis* проявил наибольшую кальцифицирующую активность в моделируемых условиях. При этом глобулы формирующегося кальцита были значительно крупнее, чем в случае с грибами. Процесс кристаллизации кальцита зависел от pH и состава питательной среды. Полученные данные позволяют говорить о возможной роли микроорганизмов в формировании поверхностных отложениях на фресках Софийского собора.

Ключевые слова

биоповреждения ◆ фрески ◆ биоминерализация ◆ кальцит ◆ микромицеты ◆ бактерии ◆ экспериментальное моделирование

Поступила в редакцию: 22.08.2025
Принято в печать: 02.10.2025

The role of microorganisms in the damage of frescoes of St. Sophia Cathedral (Vologda Kremlin)

Vlasov A.D.[1*], Zelenskaya M.S.[2], Vlasov D.Yu.[2,3]

[1] St. Petersburg branch of the archive of the Russian Academy of Science;
[2] St. Petersburg State University;
[3] V.L. Komarov Botanical Institute of the RAS;
St. Petersburg, Russia
E-mail: alex_vlasov@mail.ru

Abstract

Microorganisms can cause damage to wall murals in architectural monuments. Bacteria and microscopic fungus are frequently identified as destructors of wall paintings.

This work is devoted to investigation the possible causes of the surface patina on the frescoes of St. Sophia Cathedral (Vologda Kremlin). The composition of the microorganism community on the painting's surface and in the cathedral's was studied. Sampling was done using non-damaging methods under the supervision of the Vologda Museum-Reserve personnel. Particular care was given to the whitish patina coating the walls with fresco paintings over a large area. The isolated microorganisms were identified using morphological features and molecular markers.

Because the formation of a whitish patina on the fresco surface may be linked the activity of microorganisms that cause the deposition of secondary calcite (a similar picture has been observed on frescoes in Italy), experiments were conducted to assess the ability of the isolated microorganisms (bacteria and microscopic fungi) to form calcite. Scanning electron microscopy was used to detect and describe the crystalline structures of calcite generated in model systems with fungus and bacteria.

The investigations revealed that isolated microorganisms (fungi and bacteria) may produce secondary calcite. *Bacillus siamensis* was found in the majority of fresco surface samples. Under the simulated conditions, the isolated strain of *B. siamensis* had the highest calcifying activity. In this case, the globules of forming calcite were substantially bigger than those produced by fungus. Calcite crystallization was dependent on the pH and composition of the nutrient media. The findings acquired allow us to speculate on the potential role of microorganisms in the formation of surface deposits on the frescoes of St. Sophia Cathedral.

Keywords

biodamage ◆ frescoes ◆ biomineralization ◆ calcite ◆ micromycetes ◆ bacteria ◆ experimental modeling

Received: 22.08.2025
Accepted: 02.10.2025

Цитировать | Cite as

DOI: 10.31163/2618-964X/2025-35 EDN: TUYCTC

ВВЕДЕНИЕ

Настенная живопись в памятниках архитектуры подвергается деструктивному воздействию микроорганизмов в разных странах мира [Pepe *et al.* 2010; Rosado *et al.* 2014; Gomoiu *et al.* 2018]. Состав микробов на красочном слое может варьировать в зависимости от конкретных условий экспонирования архитектурного памятника, в особенности – температурно-влажностного режима. В числе деструкторов настенной живописи чаще всего упоминаются бактерии и микроскопические грибы [Gorbushina *et al.* 2004; Zucconi *et al.* 2012; Corti-Fragoso *et al.* 2019; Ricca *et al.* 2022; Gallo *et al.* 2025]. На красочном слое иногда могут развиваться и водоросли, особенно в местах повышенного увлажнения и хорошей освещенности. В состав фресок входят различные органические и неорганические компоненты, что позволяет микроорганизмам использовать их в качестве источников питания [Karpovich-Tate, Rebrikova 1991]. Взаимосвязанные процессы химической и микробиологической коррозии способны приводить к заметным повреждениям настенной живописи, ее растрескиванию, вспучиванию и осыпанию. Особой формой повреждения фресок можно считать образование на них светлой поверхностной патины, способной покрывать большую часть настенного рисунка. Причиной образования такой патины может быть развитие бактерий, которые способствуют трансформации поверхностного слоя живописи путем отложения карбоната кальция, а также выделения агрессивных метаболитов [Diaz-Herraiz *et al.* 2013; Tomassetti *et al.* 2017]. Состав микроорганизмов на фресках может быть достаточно разнообразным. Однако наиболее часто на поврежденных участках выявляли актиномицеты и бактерии рода *Bacillus* [Radaelli *et al.* 2004; Tomassetti *et al.* 2017].

Для поиска эффективных способов защиты уникальных фресок необходимо знать состав потенциальных деструкторов и понимать возможные механизмы их воздействия на настенную живопись. Для этой цели подходит метод выделения микроорганизмов на питательную среду, который позволяет выявить наиболее активные и доминирующие формы микробов-деструкторов, а также исследовать их свойства в условиях культуры. Как показывают недавние исследования, такой подход может использоваться в сочетании с молекулярными методами, позволяющими выявлять широкий спектр микроорганизмов на объектах культурного наследия [Caselli *et al.* 2018].

Целью нашей работы было исследование причин возникновения поверхностной патины на фресках Софийского собора Вологодского кремля.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалы исследования и отбор проб

Обследование фресок Софийского собора проводилось в летний период 2020 года в соответствии с указаниями РВСН 20-01-2006 (ТСН 20-303-2006) в рамках предреставрационных работ на территории Вологодского Кремля. Фиксировали места предполагаемого развития микроорганизмов (по результатам визуальной оценки), включающие участки трещиноватости красочного слоя, отслаивания и осыпания краски, образования наслоений различной природы. Особое внимание было уделено белесой патине, покрывающей стены с фресковой живописью на значительной площади.

Пробы для исследования были отобраны с поверхности живописи не повреждающими методами: мазок с поверхности сухой стерильной ватной палочкой, мазок с поверхности на транспортную среду Стюарта (производитель Liofilchem, Италия) (рис. 1). Отбирать пробы другими способами было невозможно из-за историко-культурной ценности объекта.

Все пробы отбирали по согласованию и в присутствии сотрудников музея, которым авторы выражают искреннюю признательность за содействие в проведении исследования.

Внутри Софийского собора также были взяты пробы воздушной среды (с использованием сертифицированного пробоотборного устройства ПУ-1Б (производитель АОЗТ «Химко», Россия) с целью оценки содержания микроорганизмов в воздухе и их потенциальной опасности для фресок. Всего в ходе микробиологического обследования было отобрано более 20 проб с поверхности фресок, а также 4 пробы воздушной среды.

Рис. 1. Примеры отбора микробиологических проб с поверхностной патины (а) и пылевых наслоений (б) на фресках в большом зале Софийского собора.

Выделение и идентификация микромицетов и бактерий

Для первичной изоляции, поддержания в культуре и идентификации микромицетов использовалась агаризованная питательная среда Чапека, а для выделения органотрофных бактерий – агаризованная среда ГМФ – гидролизат мяса ферментативный (производитель НИЦФ СПб). Полученные колонии (рис. 2) были исследованы и идентифицированы с использованием общепринятых методов и определителей. Для идентификации органотрофных бактерий проводилось выделение ДНК из полученных чистых культур (на среде ГМФ) по классическому протоколу ЦТАБ-методом [Doyle, Doyle 1987]. Для идентификации использовали праймеры к участку V4 гена 16S рРНК [Caporaso *et al.* 2011]:

16S-F GTGCCAGCMGCCGCGGTAA;16S-R GGACTACHVGGGTWTCTAAT

Секвенирование проводили на секвенаторе MiSeq System.

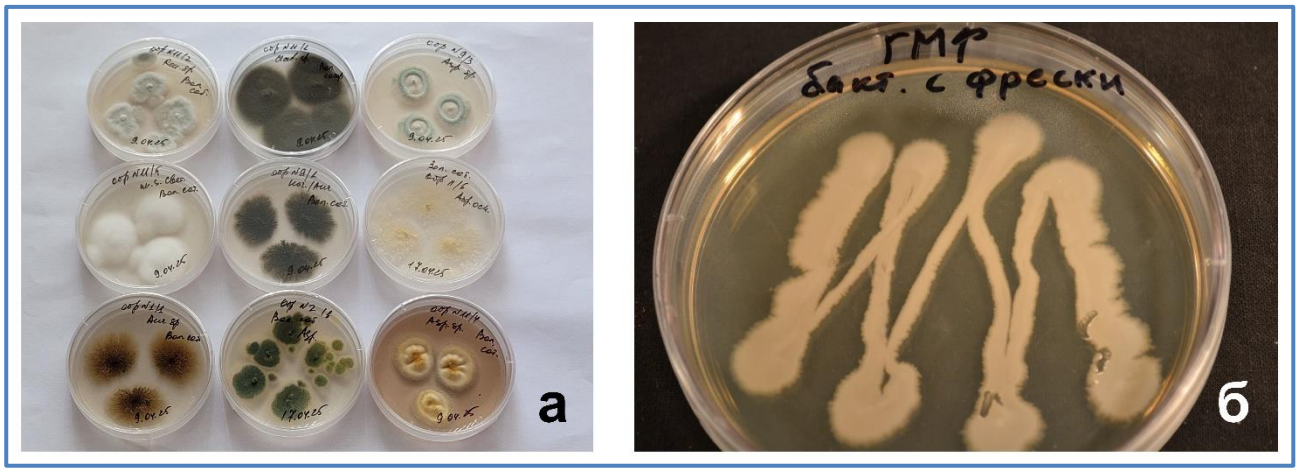


Рис. 2. Колонии микроорганизмов, выделенные с поверхности поврежденных фресок Софийского собора Вологодского Кремля: а – колонии микромицетов на среде Чапека, б – рост *Bacillus siamensis* на среде ГМФ.

Моделирование процесса кальцификации под действием грибов и бактерий.

Поскольку одна из гипотез отложения вторичного кальцита на поверхности фресок связана с активностью микроорганизмов, были проведены эксперименты по оценке способности выделенных микроорганизмов к образованию кальцита. Эксперименты проводили в жидких питательных средах (B4 и SS2), рекомендованных для подобных исследований. Среда B4 имеет следующий состав (на 1 л дистиллированной воды): 25 г ацетата кальция (уксуснокислый кальций), 4 г дрожжевого экстракта, 10 г глюкозы [Boquet *et al.* 1973]. В эксперименте с бактерией *Bacillus siamensis*, доминирующей в изученных пробах, в среду B4 были добавлены блоки итальянского кальцитового мрамора, размером 10x10x3мм, которые служили дополнительным источником кальция, а также подложкой для возможного формирования бактериальной биопленки. Последующие эксперименты проводились на среде B4, содержащей ацетат кальция, без добавления мрамора. В эти эксперименты были включены штаммы 4-х видов грибов, изолированных с фресок Софийского собора: *Aureobasidium pullulans* (B1/1), *Aspergillus ochraceus* (B11/3), *Cladosporium cladosporioides* (B11/1), *Penicillium* sp. (B11/2), а также бактерия *Bacillus siamensis*. Аналогичные эксперименты были проведены и на среде SS2. Среда SS2 [Rivadeneyra *et al.* 2014] имеет следующий состав (на 1 л дистиллированной воды): 10 г дрожжевого экстракта, 1 г глюкозы, 5 г пептона, 8 г ацетата магния. Мы модифицировали данную среду, заменив ацетат магния на ацетат кальция (8 г). Эксперименты проводили в стерильных чашках Петри, в которые добавляли по 15 мл каждой среды. Начальное значение pH в экспериментах на среде B4 и на модифицированной среде SS2 было равно семи. Инокулюм вносили из 7-суточных культур бактерий и микроскопических грибов, выращенных предварительно на среде ГМФ (для бактериальных культур) и на среде Чапека (для культур микромицетов). Инокуляцию проводили суспензией бактериальных клеток и конидий гриба. Количество бактериальных клеток в 1 мл исходной суспензии составляло 10^8, конидий гриба – 10^4. В каждом эксперименте в питательную среду вносили 1 мл инокулюма. Опыты проводили в трёхкратной повторности. Контролем служили среды B4 и SS2 без внесения суспензий микроорганизмов. Продолжительность культивирования составила 30 суток при температуре 24°C.

Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ-анализ).

Сканирующую электронную микроскопию использовали для выявления и описания кристаллических структур кальцита, образовавшихся в модельных системах с грибами и бактериями. Первоначально экспериментальные образцы исследовали с применением цифрового оптического стереомикроскопа Leica M250C (“Leica Microsystems”, Германия). СЭМ-исследования были выполнены с использованием настольного растрового сканирующего электронного микроскопа TM 3000 («Hitachi», Япония) в диапазоне увеличений от 100 до 10000 раз. Микроскоп оснащен приставкой энергодисперсионного микроанализа Oxford (EDX-анализ), что позволяет определять элементный состав в конкретной точке объекта.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Разнообразие культивируемых микроорганизмов.

В ходе микологического анализа проб с фресок Софийского собора Вологодского Кремля было выделено на агаризованную среду Чапека и идентифицировано 15 видов микромицетов из 8 родов: *Acaulium acremonium* (Delacr.) Sand.-Den., Guarro & Gené, *Alternaria alternata* (Fr.) Keissl., *Aspergillus flavus* Link, *A. niger* Tiegh., *A. ochraceus* G. Wilh, *A. terreus* Thom, *A. ustus* (Bainier) Thom & Church, *A. versicolor* (Vuill.) Tirab., *Aureobasidium pullulans* (de Bary & Löwenthal) G. Arnaud, *Cladosporium cladosporioides* (Fresen.) G.A. de Vries, *C. sphaerospermum* Penz., *Fusarium oxysporum* Schltdl., *Penicillium chrysogenum* Thom, *P. citrinum* Thom, *Talaromyces purpureogenus* (Stoll) Samson, N. Yilmaz, Houbraken, Spierenb., Seifert, Peterson, Varga & Frisvad. Кроме того, отмечен рост на питательной среде стерильного светлого и темного мицелия. Наиболее богатыми по составу оказались микологические пробы с нижней части стены с фресковой живописью в большом зале Софийского собора, что, вероятно, обусловлено наблюдаемым здесь поверхностным пылевым загрязнением фресок (рис. 2а). Преобладающими по встречаемости оказались виды родов *Aspergillus* и *Penicillium*, которые хорошо известны способностью повреждать настенную живопись [Karpovich-Tate, Rebrikova 1991]. Вместе с тем, в основном эти грибы присутствовали там, где наблюдаются пылевые отложения на поверхности фресок. Очевидно, что мелкие споры грибов оседают и накапливаются вместе с пылевыми частицами на поверхности фресок, однако открытого роста колоний грибов на фресках не наблюдалось. В воздушной среде отмечены те же виды грибов, что были зафиксированы на поверхности фресок. В дополнение к ним в пробах воздуха были выявлены виды родов *Botritys, Chaetomium* и *Paecilomyces*. При этом ни в одной из проб воздушной среды не зафиксировано повышенное содержание спор. Численность колониеобразующих единиц (КОЕ) не превышала 250 КОЕ на 1 куб. м. воздуха. В большом зале (до алтаря) численность КОЕ была несколько ниже, чем в пространстве за алтарем. Эти данные свидетельствуют об умеренном фоне плесневых грибов, встречающихся внутри Собора.

При посеве проб на среду ГМФ постоянно выделялись однотипные бактериальные колонии, которые имели достаточно высокую численность и характеризовались активным ростом. В ходе лабораторных пересевов удалось получить чистую культуру доминирующей бактерии (рис. 2б). Проведенный молекулярный анализ позволил идентифицировать вид *Bacillus siamensis* (штамм Ф-1) – грамположительная палочковидная бактерия. Интересно отметить, что колонии данной бактерии часто развивались вместе с грибами, что, вероятно, указывает на возможные взаимодействия грибов и бактерий в микробном сообществе, формирующемся на поверхности фресок. Кроме того, на среде ГМФ часто отмечали пигментированные (розовые) бактериальные колонии.

Образование кальцита под действием грибов и бактерий

В результате экспериментов установлено, что грибы из 4-х родов (*Aureobasidium, Aspergillus, Cladosporium* и *Penicillium*) и бактерия *B. siamensis* проявили способность к образованию кристаллов вторичного кальцита при наличии кальция в среде. Так, в эксперименте на среде В4 с добавлением мрамора под действием *B. siamensis* образовались глобулы кальцита (до 100 мкм в диаметре). При этом на поверхности мрамора развивалась плотная бактериальная биопленка с включением кальцита (рис. 3а, в). Определение принадлежности полученных глобул к кальциту проводили по морфологии кристаллов и результатам EDX-анализа (рис. 3б). Важно отметить, что на СЭМ-изображениях

хорошо видны следы (отпечатки) от бактериальных клеток на глобулах кальцита в виде мелких полостей, повторяющих форму бактерий (рис. 3в). Этот факт указывает на непосредственное участие бактерий в образовании кальцита, что согласуется с результатами подобных исследований [Tiano *et al.* 1999]. Интересно отметить, что наряду с кальцитом, зафиксированы дипирамидально-призматические кристаллы, характерные для двуводного оксалата кальция уэдделлита (рис. 3г).

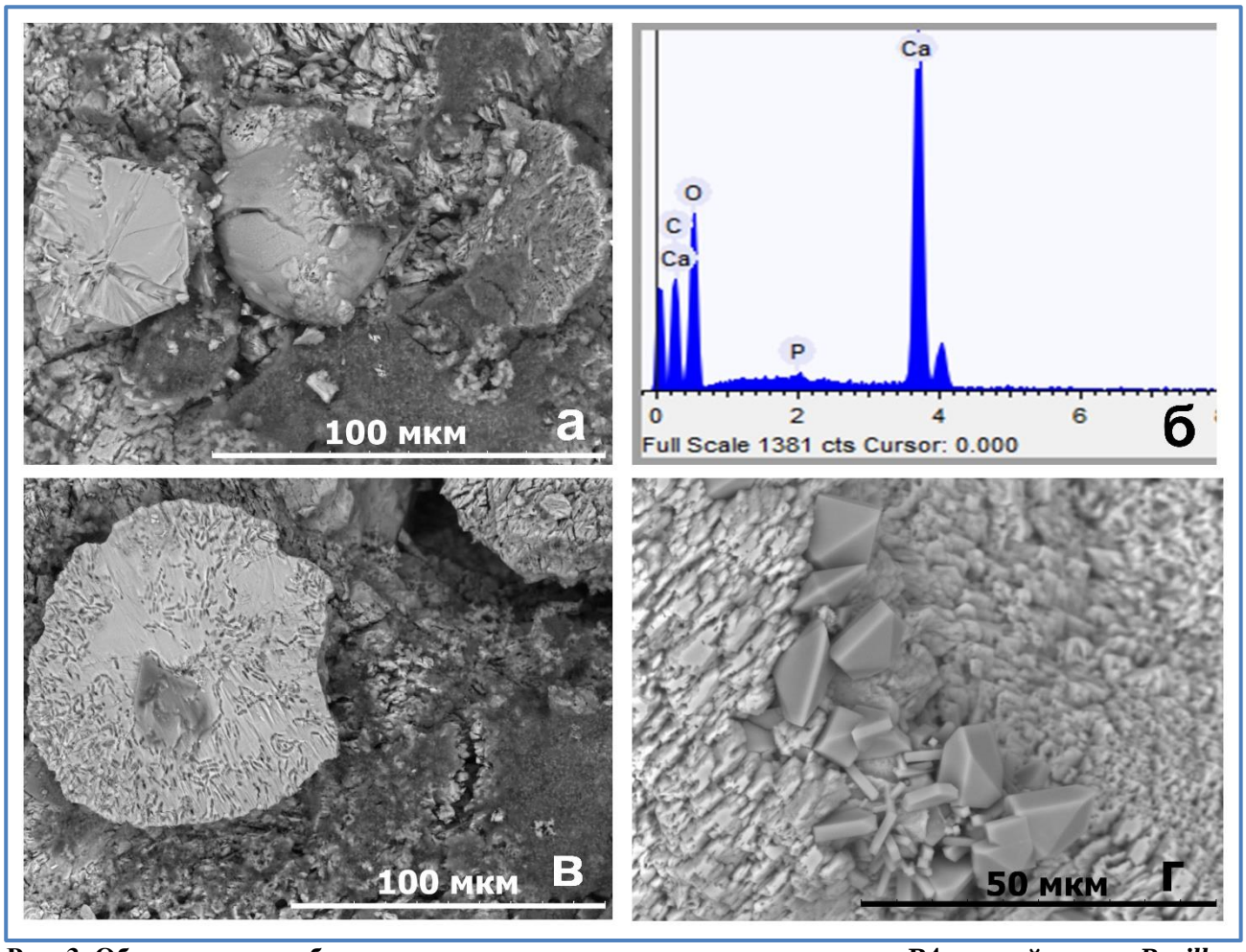


Рис. 3. Образование глобул кальцита на поверхности мрамора в среде В4 под действием *Bacillus siamensis*: а – глобулы кальцита в бактериальной биопленке на поверхности мрамора; б – EDX-спектр образовавшихся глобул; в – крупная глобула кальцита с многочисленными следами бактериальных клеток; г – дипирамидально-призматические кристаллы (предположительно – двуводный оксалат кальция уэдделлит).

В экспериментах на средах В4 и SS2 без добавления мрамора картина была несколько иная, хотя кристаллы кальцита также были получены. Так, под действием *B. siamensis* кристаллы кальцита формировались только на среде SS2 в слабощелочных условиях (рис. 4а, б). При этом кальцит был представлен крупными глобулами (до 1 мм в диаметре). Отсутствие кристаллизации на среде В4 можно объяснить снижением pH до 6, что препятствует процессу кальцификации. В вариантах с грибами образующиеся глобулы кальцита были меньшего размера в сравнении с бактериальными. Так, под действием *Penicillium* sp. (В11/2) на обеих средах формировались глобулы кальцита от 300 до 500 мкм в диаметре (рис. 4в, г) при pH = 8.5. Схожие результаты были получены для *C. cladosporioides* (В11/1) (рис. 4г), тогда как в вариантах с *A. pullulans* (В1/1) (рис. 4д) и *A. ochraceus* (В11/3) мелкие глобулы кальцита

формировались только на среде SS2 в диапазоне pH от 7.5 до 8.5. В контрольной среде без участия микроорганизмов процессы кристаллизации не наблюдались.

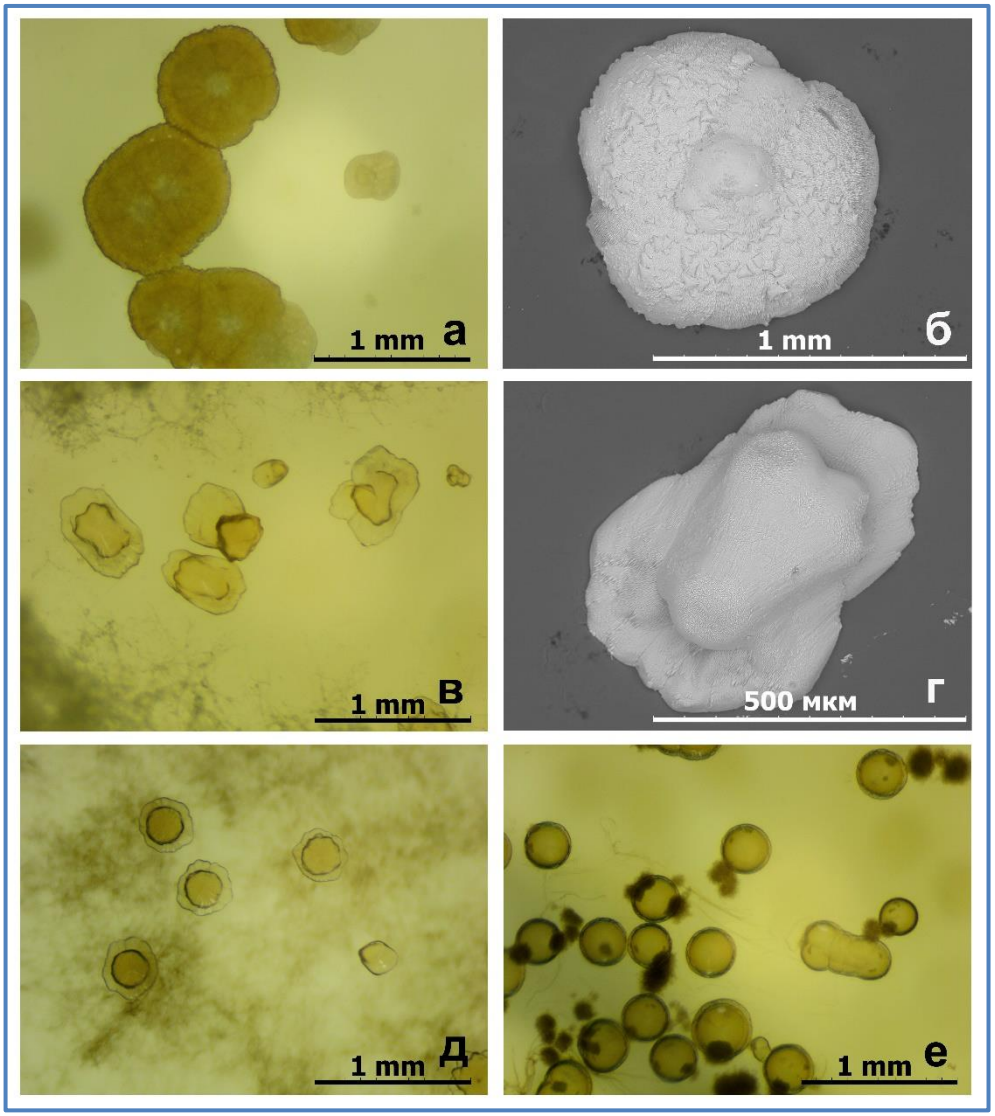


Рис. 4. Глобулы кальцита в культурах микроорганизмов на среде SS2: а – крупные глобулы кальцита в варианте с *B. siamensis* (стереомикроскоп); б – то же (СЭМ-изображение); в – глобулы кальцита в варианте с *Penicillium* sp. (B11/2) (стереомикроскоп); г – то же (СЭМ-изображение); д – глобулы кальцита в варианте с *C. cladosporioides* (B11/1) (стереомикроскоп); е – глобулы кальцита в варианте с *A. pullulans* (B1/1) (стереомикроскоп).

ОБСУЖДЕНИЕ

Из литературы известно, что в нескольких знаменитых соборах Италии на фресках встречается белесая патина, которая может быть связана с развитием бактерий, способных к переотложению кальцита на поверхности фресок [Pepe *et al.* 2010]. В образующихся биопленках были обнаружены бактерии рода *Bacillus*, которые рассматриваются как возможная причина формирования белесого кальцитового налета. Источником кальция во фресках является штукатурка, на которую наносится роспись. Мы предположили, что выделенная нами бактерия *B. siamensis* может играть заметную роль в микробном сообществе на поверхности фресок в Софийском соборе Вологодского Кремля и способствует образованию карбонатной патины. При этом в последние годы было показано,

что и некоторые грибы способны активно участвовать в данном процессе. Так, для видов рода *Penicillium*, была экспериментально доказана способность к образованию кальцита [Sazanova *et al.* 2023].

Результаты проведенных исследований показывают, что поверхность фресок Софийского собора Вологодского Кремля контаминирована микроскопическими грибами и бактериями. Хотя визуальный рост колоний на поверхности красочного слоя не зафиксирован, разнообразие грибов можно оценивать как весьма значительное (15 видов из 8 родов). Необходимо отметить, что в изученных пробах преобладали мелкоспоровые формы микромицетов (виды родов *Aspergillus, Clasoporium, Penicillum*). Образуемые этими грибами споры легко переносятся воздушными потоками и могут распространяться во внутреннем пространстве собора. Дополнительным фактором распространения спор по объекту может стать запыленность стен с фресками. Известно, что споры грибов адсорбируются на пылевых частицах и вместе с ними легко переносятся воздушными потоками [Maggi *et al.* 2000]. Численность КОЕ грибов в пробах воздушной среды не превышала 250 в 1 куб. м. воздуха, что является умеренным показателем для помещений различного назначения.

В большинстве проб с поверхности фресок с признаками белесого налета выявлены однотипные бактерии. Как и бактерии, обнаруженные в Итальянских соборах с аналогичной белесой патиной на фресках [Tomassetti *et al.* 2017], выявленные бактерии принадлежали роду *Bacillus*. Авторы связывают образование патины с активностью бактерий в процессе биоминерализации. Точка зрения о биологической природе налета на фресках была высказана Н.Л. Ребриковой [Ребрикова 2012] по результатам обследования росписей Дионисия Ферапонтова монастыря в Вологодской области. Этот объект наиболее полно исследован на территории России. Белесый налет на фресках монастыря был связан с развитием актиномицетов, клеток других микроорганизмов и частиц пыли. Ряд авторов отмечают, что подобная картина может быть обусловлена метаболической активностью микроорганизмов, приводящей к процессам биоминерализации на поверхности субстрата [Komala, Khun 2013; Fomina *et al.* 2022]. Этот процесс достаточно сложный и зависит от совокупности условий, таких как температура, влажность субстрата и воздушной среды, химический состав субстрата, состав сообщества микроорганизмов, состав и количество продуцируемых микробных метаболитов и др. [Garg, Dhawan 1994; Giustetto *et al.* 2015]. Для бактерий рода *Bacillus* данное явление хорошо изучено и описано в ряде работ [Pepe *et al.* 2010; Tomassetti *et al.* 2017]. При этом интенсивность образования кальцита, форма и размеры кристаллов, вероятно, зависят от вида бактерий и внешних условий [Dhami 2013]. Накопленные данные указывают на важность выявления способности к образованию кальцита у микроорганизмов, развивающихся на фресках и других объектах культурного наследия. Результаты проведенных нами экспериментов показали, что при определенных условиях доминирующая на поверхности фресок бактерия *B. siamensis* может активно участвовать в образовании кальцита при наличии кальция в среде, что вполне согласуется с накопленными данными. Следует отметить, что образование карбонатов кальция под действие грибов изучено гораздо меньше. Некоторые исследователи считают, что вклад грибов в биоминерализацию кальцита может быть также весьма значительным [Bindschedler *et al.* 2016]. Большинство публикаций по этой проблеме появились в последние 10 лет и касаются биогенной трансформации бетона [Li et al. 2014; Luo et al. 2018; Wong et al. 2020; Van Wylick et al. 2021, 2024; Zhao et al. 2022; Devgon et al. 2024]. В качестве объектов исследования указываются грибы *Trichoderma reesei, Neurospora crassa, Pichia ethanolica, Serpula*

himantioides, а также грибы, неидентифицированные до вида. Выявленные нами микромицеты на фресках Софийского собора не были ранее исследованы на предмет образования ими карбоната кальция. Полученные результаты показывают, что все изученные штаммы микромицетов продемонстрировали способность к образованию кальцита. Активнее карбонат кальция образовывался в среде SS2, глобулы кальцита были крупнее, а их количество в среде было гораздо больше, чем в среде B4. При этом образуемые под действием грибов глобулы кальцита были значительно меньших размеров, чем глобулы, образованные под действием *B. siamensis*. Важно отметить, что образование кальцита во всех вариантах экспериментов наблюдалось в диапазоне pH от 7.5 до 8.5. Следует отметить, что в вариантах с *B. siamensis* и *Penicillium* sp. (B11/2) кроме кальцита отмечено образование характерных дипирамидально-призматических кристаллов, по морфологии соответствующих оксалатам кальция. Очевидно, что образование этих кристаллов могло происходить в условиях снижения значений pH за счет кислотопродукции микроорганизмов. Количество кристаллов оксалата кальция (уэдделлита) было существенно меньше по сравнению с глобулами карбоната кальция. Подобная картина отмечалась нами ранее в модельных системах [Rusakov *et al.* 2016; Sazanova *et al.* 2020; Sazanova *et al.* 2023], где была показана зависимость образования карбонатов и оксалатов кальция от параметров среды кристаллизации.

В целом проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что на фресках Софийского собора Вологодского кремля формируется сообщество микроорганизмов, потенциально способное оказывать воздействие на состояние фресок. Микромицеты характеризуются значительным разнообразием, при доминировании видов *Aspergillus* и *Penicillium*, которые способны повреждать настенную живопись. Эти же и другие грибы отмечаются в воздушной среде Софийского Собора и ассоциированы с пылевыми отложениями на поверхности стен. Модельные эксперименты по биоминерализации при участии грибов из 4 родов *Aureobasidium, Aspergillus, Cladosporium* и *Penicillium*, а также бактерии *B. siamensis* продемонстрировали способность этих микроорганизмов к образованию кристаллов вторичного кальцита, различающихся по морфологии у разных видов. Полученные данные позволяют предположить, что доминирующая на поверхности фресок бактерия *B. siamensis* может наиболее активно участвовать в образовании кальцита при наличии кальция в среде.

В целом, проведенные исследования позволяют высказать предположение, что причиной образования белесого налета на стенах Софийского собора Вологодского Кремля с фресковой живописью могли стать взаимосвязанные биологические и химические процессы, протекающие на поверхности фресок при участии микроорганизмов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность сотрудникам Ресурсного центра «Микроскопии и микроанализа» СПбГУ и ООО «Бигль» за содействие в проведении микроскопических и молекулярных исследований, а также сотрудникам Вологодского музея-заповедника за предоставленную возможность и помощь в организации работы.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Исследования проведены в рамках государственного задания БИН РАН (Тема № 124013100829-3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ребрикова Н.Л. (**2012**) Опыт микробиологического исследования росписей Дионисия. Проблемы и решения. *В: Материалах Международной научно-методической конференции: Сохранение росписей Дионисия 1502 г. в Соборе Рождества Богородицы Ферапонтова монастыря. 13-15 сентября 2011 года. Кириллов-Ферапонтово*. Индрик. Москва: 72–77.

Bindschedler S., Cailleau G., Verrecchia E. (**2016**) Role of Fungi in the Biomineralization of Calcite. *Minerals*. **6**(2): 41. https://doi.org/10.3390/min6020041

Boquet E., Boronat A., Ramos-Cormenzana A. (**1973**) Production of Calcite (Calcium Carbonate) Crystals by Soil Bacteria is a General Phenomenon. *Nature*. **246**(5434): 527–529. https://doi.org/10.1038/246527a0

Caporaso J.G., Lauber C.L., Walters W.A., Berg-Lyons D., Lozupone C.A., Turnbaugh P.J., Fierer N., Knight R. (**2011**) Global patterns of 16S rRNA diversity at a depth of millions of sequences per sample. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. **108**(supplement_1): 4516–4522. https://doi.org/10.1073/pnas.1000080107

Caselli E., Pancaldi S., Baldisserotto C. *et al.* (**2018**) Characterization of biodegradation in a 17th century easel painting and potential for a biological approach. *PLOS ONE*. **13**(12): e0207630. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0207630

Corti-Fragoso C., Cicardi M., Salvadori O., Piqué F. (**2019**) Biodeterioration of wall painting at the UNESCO site of Varallo: Pink Patina *IMEKO. In: International Conference on Metrology for Archaeology and Cultural Heritage, MetroArchaeo. Lecce, Italy. 23–25 October 2017*. Curran Associates. NY: 234–239.

Devgon I., Kumar Sachan R.S., Rajput K., Kumar M., Mohammad Said Al-Tawaha A.R., Karnwal A., Malik T. (**2024**) Exploring fungal potential for microbial-induced calcite precipitation (MICP) in bio-cement production. *Frontiers in Materials*. **11** https://doi.org/10.3389/fmats.2024.1396081

Dhami N.K. (**2013**) Biomineralization of Calcium Carbonate Polymorphs by the Bacterial Strains Isolated from Calcareous Sites. *Journal of Microbiology and Biotechnology*. **23**(5): 707–714. https://doi.org/10.4014/jmb.1212.11087

Diaz-Herraiz M., Jurado V., Cuezva S., Laiz L., Pallecchi P., Tiano P., Sanchez-Moral S., Saiz-Jimenez C. (**2013**) The Actinobacterial Colonization of Etruscan Paintings. *Scientific Reports*. **3**(1): 1440. https://doi.org/10.1038/srep01440

Doyle J.J., Doyle J.L. (**1987**) A rapid DNA isolation procedure for small quantities of fresh leaf tissue. *Phytochemical bulletin*. **19**(1): 11–15.

Fomina M., Cuadros J., Pinzari F., Hryshchenko N., Najorka J., Gavrilenko M., Hong J.W., Gadd G.M. (**2022**) Fungal transformation of mineral substrata of biodeteriorated medieval murals in Saint Sophia's cathedral, Kyiv, Ukraine. *International Biodeterioration & Biodegradation*. **175**: 105486. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2022.105486

Gallo C., Motta O., Napoli C., Faggiano A., Ricciardi M., Fiorillo R., Caliano E., Proto A. (**2025**) A Multi-Analytical Approach to Investigate Fresco Paintings in a Hypogeum Environment. *Applied Sciences*. **15**(13): 7286. https://doi.org/10.3390/app15137286

Garg K.L., Dhawan S. (**1994**) Biodeterioration of wall paintings: the Indian experience. *In: Singh J. (ed.) Building mycology: management of decay and health in buildings.* E & FN Spon. London: 239–259.

Giustetto R., Gonella D., Bianciotto V., Lumini E., Voyron S., Costa E., Diana E. (**2015**) Transfiguring biodegradation of frescoes in the Beata Vergine del Pilone Sanctuary (Italy): Microbial analysis and minero-chemical aspects. *International Biodeterioration & Biodegradation*. **98**: 6–18. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2014.10.020

Gomoiu I., Cojoc R.L., Enache M.I., Neagu S.E., Mohanu D., Mohanu I. (**2018**) Microbial Ability to Colonize Mural Painting and Its Substrate. *Acta Physica Polonica A*. **134**(1): 383–386. https://doi.org/10.12693/APhysPolA.134.383

Gorbushina A.A., Heyrman J., Dornieden T., Gonzalez-Delvalle M., Krumbein W.E., Laiz L., Petersen K., Saiz-Jimenez C., Swings J. (**2004**) Bacterial and fungal diversity and biodeterioration problems in mural painting environments of St. Martins church (Greene–Kreiensen, Germany). *International Biodeterioration & Biodegradation*. **53**(1): 13–24. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2003.07.003

Karpovich-Tate N., Rebrikova N.L. (**1991**) Microbial communities on damaged frescoes and building materials in the Cathedral of the Nativity of the Virgin in the Pafnutii-Borovskii monastery, Russia. *International Biodeterioration*. **27**(3): 281–296. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0265-3036(91)90057-X

Komala T., Khun T.C. (**2013**) Calcite-forming bacteria located in limestone area of Malaysia. *Journal of Asian Scientific Research*. **3**(5): 471–484.

Li Q., Csetenyi L., Gadd G.M. (**2014**) Biomineralization of Metal Carbonates by *Neurospora crassa*. *Environmental Science & Technology*. **48**(24): 14409–14416. https://doi.org/10.1021/es5042546

Luo J., Chen X., Crump J., Zhou H., Davies D.G., Zhou G., Zhang N., Jin C. (**2018**) Interactions of fungi with concrete: Significant importance for bio-based self-healing concrete. *Construction and Building Materials*. **164**: 275–285. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.233

Maggi O., Persiani A.M., Gallo F., Valenti P., Pasquariello G., Sclocchi M.C., Scorrano M. (**2000**) Airborne fungal spores in dust present in archives: pProposal for a detection method, new for archival materials. *Aerobiologia*. **16**(3–4): 429–434. https://doi.org/10.1023/A:1026522826477

Pepe O., Sannino L., Palomba S., Anastasio M., Blaiotta G., Villani F., Moschetti G. (**2010**) Heterotrophic microorganisms in deteriorated medieval wall paintings in southern Italian churches. *Microbiological Research*. **165**(1): 21–32. https://doi.org/10.1016/j.micres.2008.03.005

Radaelli A., Paganini M., Basavecchia V., Elli V., Neri M., Zanotto C., Pontieri E., De Giuli Morghen C. (**2004**) Identification, molecular biotyping and ultrastructural studies of bacterial communities isolated from two damaged frescoes of St Damian's Monastery in Assisi*. *Letters in Applied Microbiology*. **38**(6): 447–453. https://doi.org/10.1111/j.1472-765X.2004.01514.x

Ricca M., Alberghina M.F., Houreh N.D., Koca A.S., Schiavone S., La Russa M.F., Randazzo L., Ruffolo S.A. (**2022**) Preliminary Study of the Mural Paintings of Sotterra Church in Paola (Cosenza, Italy). *Materials*. **15**(9): 3411. https://doi.org/10.3390/ma15093411

Rivadeneyra A., Gonzalez-Martinez A., Gonzalez-Lopez J., Martin-Ramos D., Martinez-Toledo M., Rivadeneyra M. (**2014**) Precipitation of Phosphate Minerals by Microorganisms Isolated from a Fixed-Biofilm Reactor Used for the Treatment of Domestic Wastewater. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. **11**(4): 3689–3704. https://doi.org/10.3390/ijerph110403689

Rosado T., Gil M., Caldeira A.T., Martins M. R., Dias C.B., Carvalho L., Mirão J., Candeias A.E. (**2014**) Material Characterization and Biodegradation Assessment of Mural Paintings: Renaissance Frescoes from Santo Aleixo Church, Southern Portugal. *International Journal of Architectural Heritage*. **8**(6): 835–852. https://doi.org/10.1080/15583058.2012.751466

Rusakov A.V., Vlasov A.D., Zelenskaya M.S., Frank-Kamenetskaya O.V., Vlasov D.Yu. (**2016**) The Crystallization of Calcium Oxalate Hydrates Formed by Interaction Between Microorganisms and Minerals. *In: Frank-Kamenetskaya O. V, Panova E.G., Vlasov D.Yu. (eds.) Biogenic—Abiogenic Interactions in Natural and Anthropogenic Systems.* Springer International Publishing. Cham: 357–377. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24987-2_28

Sazanova K.V., Frank-Kamenetskaya O.V., Vlasov D.Yu., Zelenskaya M.S., Vlasov A.D., Rusakov A.V., Petrova M.A. (**2020**) Carbonate and Oxalate Crystallization by Interaction of Calcite Marble with *Bacillus subtilis* and *Bacillus subtilis–Aspergillus niger* Association. *Crystals*. **10**(9): 756. https://doi.org/10.3390/cryst10090756

Sazanova K. V., Zelenskaya M.S., Izatulina A.R., Korneev A. V., Vlasov D.Yu., Frank-Kamenetskaya O. V. (**2023**) Carbonate and Oxalate Crystallization Effected by the Metabolism of Fungi and Bacteria in Various Trophic Conditions: The Case of Penicillium chrysogenum and Penicillium chrysogenum with Bacillus subtilis. *Crystals*. **13**(1): 94. https://doi.org/10.3390/cryst13010094

Tiano P., Biagiotti L., Mastromei G. (**1999**) Bacterial bio-mediated calcite precipitation for monumental stones conservation: methods of evaluation. *Journal of Microbiological Methods*. **36**(1–2): 139–145. https://doi.org/10.1016/S0167-7012(99)00019-6

Tomassetti M.C., Cirigliano A., Arrighi C., Negri R., Mura F., Maneschi M.L., Gentili M.D., Stirpe M., Mazzoni C., Rinaldi T. (**2017**) A role for microbial selection in frescoes' deterioration in Tomba degli Scudi in Tarquinia, Italy. *Scientific Reports*. **7**(1): 6027. https://doi.org/10.1038/s41598-017-06169-0

Van Wylick A., Monclaro A.V., Elsacker E., Vandelook S., Rahier H., De Laet L., Cannella D., Peeters E. (**2021**) A review on the potential of filamentous fungi for microbial self-healing of concrete. *Fungal Biology and Biotechnology*. **8**(1): 16. https://doi.org/10.1186/s40694-021-00122-7

Van Wylick A., Rahier H., De Laet L., Peeters E. (**2024**) Conditions for $CaCO_3$ Biomineralization by *Trichoderma Reesei* with the Perspective of Developing Fungi-Mediated Self-Healing Concrete. *Global Challenges*. **8**(1) https://doi.org/10.1002/gch2.202300160

Wong L.S., Oweida A.F.M., Kong S.Y., Iqbal D.M., Regunathan P. (**2020**) The surface coating mechanism of polluted concrete by *Candida ethanolica* induced calcium carbonate mineralization. *Construction and Building Materials*. **257**: 119482. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119482

Zhao J., Csetenyi L., Gadd G.M. (**2022**) Fungal-induced $CaCO_3$ and $SrCO_3$ precipitation: a potential strategy for bioprotection of concrete. *Science of The Total Environment*. **816**: 151501. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151501

Zucconi L., Gagliardi M., Isola D., Onofri S., Andaloro M.C., Pelosi C., Pogliani P., Selbmann L. (**2012**) Biodeterioration agents dwelling in or on the wall paintings of the Holy Saviour's cave (Vallerano, Italy). *International Biodeterioration & Biodegradation*. **70**: 40–46. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2011.11.018

REFERENCES

Rebrikova N.L. (**2012**) Experience of Microbiological Research of Dionisy's Frescoes. Problems and Solutions. *In: Materials of the International Scientific and Methodological Conference: Preserving the Frescoes by Dionisy from 1502 in the Cathedral of the Nativity of the Virgin of the Ferapontov Monastery*. *13-15 September 2011*. *Kirillov-Ferapontovo*. Indrik. Moscow: 72–77. (In Rus.)

Bindschedler S., Cailleau G., Verrecchia E. (**2016**) Role of Fungi in the Biomineralization of Calcite. *Minerals*. **6**(2): 41. https://doi.org/10.3390/min6020041

Boquet E., Boronat A., Ramos-Cormenzana A. (**1973**) Production of Calcite (Calcium Carbonate) Crystals by Soil Bacteria is a General Phenomenon. *Nature*. **246**(5434): 527–529. https://doi.org/10.1038/246527a0

Caporaso J.G., Lauber C.L., Walters W.A., Berg-Lyons D., Lozupone C.A., Turnbaugh P.J., Fierer N., Knight R. (**2011**) Global patterns of 16S rRNA diversity at a depth of millions of sequences per sample. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. **108**(supplement_1): 4516–4522. https://doi.org/10.1073/pnas.1000080107

Caselli E., Pancaldi S., Baldisserotto C. *et al.* (**2018**) Characterization of biodegradation in a 17th century easel painting and potential for a biological approach. *PLOS ONE*. **13**(12): e0207630. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0207630

Corti-Fragoso C., Cicardi M., Salvadori O., Piqué F. (**2019**) Biodeterioration of wall painting at the UNESCO site of Varallo: Pink Patina *IMEKO*. *In: International Conference on Metrology*

for Archaeology and Cultural Heritage, MetroArchaeo. Lecce, Italy. 23–25 October 2017. Curran Associates. NY: 234–239.

Devgon I., Kumar Sachan R.S., Rajput K., Kumar M., Mohammad Said Al-Tawaha A.R., Karnwal A., Malik T. (**2024**) Exploring fungal potential for microbial-induced calcite precipitation (MICP) in bio-cement production. *Frontiers in Materials*. **11** https://doi.org/10.3389/fmats.2024.1396081

Dhami N.K. (**2013**) Biomineralization of Calcium Carbonate Polymorphs by the Bacterial Strains Isolated from Calcareous Sites. *Journal of Microbiology and Biotechnology*. **23**(5): 707–714. https://doi.org/10.4014/jmb.1212.11087

Diaz-Herraiz M., Jurado V., Cuezva S., Laiz L., Pallecchi P., Tiano P., Sanchez-Moral S., Saiz-Jimenez C. (**2013**) The Actinobacterial Colonization of Etruscan Paintings. *Scientific Reports*. **3**(1): 1440. https://doi.org/10.1038/srep01440

Doyle J.J., Doyle J.L. (**1987**) A rapid DNA isolation procedure for small quantities of fresh leaf tissue. *Phytochemical bulletin*. **19**(1): 11–15.

Fomina M., Cuadros J., Pinzari F., Hryshchenko N., Najorka J., Gavrilenko M., Hong J.W., Gadd G.M. (**2022**) Fungal transformation of mineral substrata of biodeteriorated medieval murals in Saint Sophia's cathedral, Kyiv, Ukraine. *International Biodeterioration & Biodegradation*. **175**: 105486. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2022.105486

Gallo C., Motta O., Napoli C., Faggiano A., Ricciardi M., Fiorillo R., Caliano E., Proto A. (**2025**) A Multi-Analytical Approach to Investigate Fresco Paintings in a Hypogeum Environment. *Applied Sciences*. **15**(13): 7286. https://doi.org/10.3390/app15137286

Garg K.L., Dhawan S. (**1994**) Biodeterioration of wall paintings: the Indian experience. *In: Singh J. (ed.) Building mycology: management of decay and health in buildings.* E & FN Spon. London: 239–259.

Giustetto R., Gonella D., Bianciotto V., Lumini E., Voyron S., Costa E., Diana E. (**2015**) Transfiguring biodegradation of frescoes in the Beata Vergine del Pilone Sanctuary (Italy): Microbial analysis and minero-chemical aspects. *International Biodeterioration & Biodegradation*. **98**: 6–18. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2014.10.020

Gomoiu I., Cojoc R.L., Enache M.I., Neagu S.E., Mohanu D., Mohanu I. (**2018**) Microbial Ability to Colonize Mural Painting and Its Substrate. *Acta Physica Polonica A*. **134**(1): 383–386. https://doi.org/10.12693/APhysPolA.134.383

Gorbushina A.A., Heyrman J., Dornieden T., Gonzalez-Delvalle M., Krumbein W.E., Laiz L., Petersen K., Saiz-Jimenez C., Swings J. (**2004**) Bacterial and fungal diversity and biodeterioration problems in mural painting environments of St. Martins church (Greene–Kreiensen, Germany). *International Biodeterioration & Biodegradation*. **53**(1): 13–24. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2003.07.003

Karpovich-Tate N., Rebrikova N.L. (**1991**) Microbial communities on damaged frescoes and building materials in the Cathedral of the Nativity of the Virgin in the Pafnutii-Borovskii monastery, Russia. *International Biodeterioration*. **27**(3): 281–296. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0265-3036(91)90057-X

Komala T., Khun T.C. (**2013**) Calcite-forming bacteria located in limestone area of Malaysia. *Journal of Asian Scientific Research*. **3**(5): 471–484.

Li Q., Csetenyi L., Gadd G.M. (**2014**) Biomineralization of Metal Carbonates by *Neurospora crassa*. *Environmental Science & Technology*. **48**(24): 14409–14416. https://doi.org/10.1021/es5042546

Luo J., Chen X., Crump J., Zhou H., Davies D.G., Zhou G., Zhang N., Jin C. (**2018**) Interactions of fungi with concrete: Significant importance for bio-based self-healing concrete. *Construction and Building Materials*. **164**: 275–285. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.233

Maggi O., Persiani A.M., Gallo F., Valenti P., Pasquariello G., Sclocchi M.C., Scorrano M. (**2000**) Airborne fungal spores in dust present in archives: pProposal for a detection method, new for archival materials. *Aerobiologia*. **16**(3–4): 429–434. https://doi.org/10.1023/A:1026522826477

Pepe O., Sannino L., Palomba S., Anastasio M., Blaiotta G., Villani F., Moschetti G. (**2010**) Heterotrophic microorganisms in deteriorated medieval wall paintings in southern Italian churches. *Microbiological Research*. **165**(1): 21–32. https://doi.org/10.1016/j.micres.2008.03.005

Radaelli A., Paganini M., Basavecchia V., Elli V., Neri M., Zanotto C., Pontieri E., De Giuli Morghen C. (**2004**) Identification, molecular biotyping and ultrastructural studies of bacterial communities isolated from two damaged frescoes of St Damian's Monastery in Assisi*. *Letters in Applied Microbiology*. **38**(6): 447–453. https://doi.org/10.1111/j.1472-765X.2004.01514.x

Ricca M., Alberghina M.F., Houreh N.D., Koca A.S., Schiavone S., La Russa M.F., Randazzo L., Ruffolo S.A. (**2022**) Preliminary Study of the Mural Paintings of Sotterra Church in Paola (Cosenza, Italy). *Materials*. **15**(9): 3411. https://doi.org/10.3390/ma15093411

Rivadeneyra A., Gonzalez-Martinez A., Gonzalez-Lopez J., Martin-Ramos D., Martinez-Toledo M., Rivadeneyra M. (**2014**) Precipitation of Phosphate Minerals by Microorganisms Isolated from a Fixed-Biofilm Reactor Used for the Treatment of Domestic Wastewater. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. **11**(4): 3689–3704. https://doi.org/10.3390/ijerph110403689

Rosado T., Gil M., Caldeira A.T., Martins M. R., Dias C.B., Carvalho L., Mirão J., Candeias A.E. (**2014**) Material Characterization and Biodegradation Assessment of Mural Paintings: Renaissance Frescoes from Santo Aleixo Church, Southern Portugal. *International Journal of Architectural Heritage*. **8**(6): 835–852. https://doi.org/10.1080/15583058.2012.751466

Rusakov A.V., Vlasov A.D., Zelenskaya M.S., Frank-Kamenetskaya O.V., Vlasov D.Yu. (**2016**) The Crystallization of Calcium Oxalate Hydrates Formed by Interaction Between Microorganisms and Minerals. *In: Frank-Kamenetskaya O. V, Panova E.G., Vlasov D.Yu. (eds.) Biogenic—Abiogenic Interactions in Natural and Anthropogenic Systems.* Springer International Publishing. Cham: 357–377. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24987-2_28

Sazanova K.V., Frank-Kamenetskaya O.V., Vlasov D.Yu., Zelenskaya M.S., Vlasov A.D., Rusakov A. V., Petrova M.A. (**2020**) Carbonate and Oxalate Crystallization by Interaction of Calcite Marble with *Bacillus subtilis* and *Bacillus subtilis–Aspergillus niger* Association. *Crystals*. **10**(9): 756. https://doi.org/10.3390/cryst10090756

Sazanova K.V., Zelenskaya M.S., Izatulina A.R., Korneev A. V., Vlasov D.Yu., Frank-Kamenetskaya O.V. (**2023**) Carbonate and Oxalate Crystallization Effected by the Metabolism of Fungi and Bacteria in Various Trophic Conditions: The Case of Penicillium chrysogenum and Penicillium chrysogenum with Bacillus subtilis. *Crystals*. **13**(1): 94. https://doi.org/10.3390/cryst13010094

Tiano P., Biagiotti L., Mastromei G. (**1999**) Bacterial bio-mediated calcite precipitation for monumental stones conservation: methods of evaluation. *Journal of Microbiological Methods*. **36**(1–2): 139–145. https://doi.org/10.1016/S0167-7012(99)00019-6

Tomassetti M.C., Cirigliano A., Arrighi C., Negri R., Mura F., Maneschi M.L., Gentili M.D., Stirpe M., Mazzoni C., Rinaldi T. (**2017**) A role for microbial selection in frescoes' deterioration in Tomba degli Scudi in Tarquinia, Italy. *Scientific Reports*. **7**(1): 6027. https://doi.org/10.1038/s41598-017-06169-0

Van Wylick A., Monclaro A.V., Elsacker E., Vandelook S., Rahier H., De Laet L., Cannella D., Peeters E. (**2021**) A review on the potential of filamentous fungi for microbial self-healing of concrete. *Fungal Biology and Biotechnology*. **8**(1): 16. https://doi.org/10.1186/s40694-021-00122-7

Van Wylick A., Rahier H., De Laet L., Peeters E. (**2024**) Conditions for $CaCO_3$ Biomineralization by *Trichoderma Reesei* with the Perspective of Developing Fungi-Mediated Self-Healing Concrete. *Global Challenges*. **8**(1) https://doi.org/10.1002/gch2.202300160

Wong L.S., Oweida A.F.M., Kong S.Y., Iqbal D.M., Regunathan P. (**2020**) The surface coating mechanism of polluted concrete by *Candida ethanolica* induced calcium carbonate

mineralization. *Construction and Building Materials*. **257**: 119482. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119482

Zhao J., Csetenyi L., Gadd G.M. (**2022**) Fungal-induced $CaCO_3$ and $SrCO_3$ precipitation: a potential strategy for bioprotection of concrete. *Science of The Total Environment*. **816**: 151501. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151501

Zucconi L., Gagliardi M., Isola D., Onofri S., Andaloro M.C., Pelosi C., Pogliani P., Selbmann L. (**2012**) Biodeterioration agents dwelling in or on the wall paintings of the Holy Saviour's cave (Vallerano, Italy). *International Biodeterioration & Biodegradation*. **70**: 40–46. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2011.11.018

Цитировать как
Власов А.Д., Зеленская М.С., Власов Д.Ю. (**2025**) Микроорганизмы на фресках Софийского собора Вологодского Кремля. *Экобиотех.* **8** (3): 491-505. DOI: 10.31163/2618-964X/2025-35 EDN: TUYCTC

Cited as
Vlasov A.D., Zelenskaya M.S., Vlasov D.Yu. (**2025**) The role of microorganisms in the damage of frescoes of St. Sophia cathedral (Vologda Kremlin). *Ecobiotech.* **8** (3): 491-505. DOI: 10.31163/2618-964X/2025-35 EDN: TUYCTC (In Rus.)

Сведения об авторе

Алексей Дмитриевич Власов, к.геогр.н, Санкт-Петербургский филиал архива Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: alex_vlasov@mail.ru, SPIN: 3872-5583, ORCID: 0000-0001-6911-8814, Scopus: 57196122442, WoS ResearcherID: J-8867-2013.

Марина Станиславовна Зеленская, к.б.н., Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: marsz@yandex.ru, SPIN: 1769-6433, ORCID: 0000-0003-3588-8583, Scopus: 6603103530, WoS ResearcherID: N-4283-2019.

Дмитрий Юрьевич Власов, д.б.н., Санкт-Петербургский государственный университет; Ботанический институт им. В.Л. Комарова РАН; Санкт-Петербург, Россия. E-mail: dmitry.vlasov@mail.ru, SPIN: 2871-2979, ORCID: 0000-0002-0455-1462, Scopus: 7004242063, WoS ResearcherID: J-8866-2013.

Information About the Author

Alexey D. Vlasov, PhD in Geography, St. Petersburg branch of the archive of the Russian Academy of Science, St. Petersburg, Russia. E-mail: alex_vlasov@mail.ru, SPIN: 3872-5583, ORCID: 0000-0001-6911-8814, Scopus: 57196122442, WoS ResearcherID: J-8867-2013.

Marina S. Zelenskaya, PhD in Biology, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia. E-mail: marsz@yandex.ru, SPIN: 1769-6433, ORCID: 0000-0003-3588-8583, Scopus: 6603103530, WoS ResearcherID: N-4283-2019.

Dmitry Yu. Vlasov, Doctor in Biology, St. Petersburg State University; V.L. Komarov Botanical Institute of the Russian Academy of Science; St. Petersburg, Russia. E-mail: dmitry.vlasov@mail.ru, SPIN: 2871-2979, ORCID: 0000-0002-0455-1462, Scopus: 7004242063, WoS ResearcherID: J-8866-2013.