

От нано- до макроуровня: обзор механизмов биоминерализации с участием грибов для самовосстановления и упрочнения материалов

Анна Александровна Будникова^{1,2*} , Дмитрий Владимирович Топчий¹ 

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация

² ООО «Микокарст», 127273, Москва, ул. аллея Березовая, 17-2, 278, Российская Федерация

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: anna.budnikova92@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Введение. В обзоре систематизированы ключевые механизмы биоминерализации, реализуемые грибной культурой, для самовосстановления и упрочнения минеральных материалов – образование карбоната кальция (CaCO_3) через гидролиз мочевины и метаболическую активность мицелия (FICP), а также оксалата кальция (CaC_2O_4) посредством секреции щавелевой кислоты (FIOP). **Методы и материалы.** Обзор основан на анализе рецензируемых научных публикаций (Scopus, Web of Science), из которых более 80% работ опубликованы за последние 5 лет (2022–2026 гг.). Внимание уделялось качественным и количественным показателям влияния грибов на характеристики укрепляемых материалов — составу и объему формирующихся минералов, приросту прочности и снижению водопоглощения, что подтверждалось методами нано- и микроскопии. **Результаты и обсуждение.** В ходе исследования выявлена взаимосвязь между видами и штаммами грибов, реализуемыми механизмами биоминерализации, составами питательных сред и эффектами упрочнения минеральных материалов. Установлено, что *Trichoderma reesei*, *Penicillium chrysogenum*, *Aspergillus niger* и *Neurospora crassa* эффективно индуцируют карбонатную биоминерализацию, обеспечивая самовосстановление и повышение устойчивости бетонных конструкций и грунтовых матриц. *Pleurotus ostreatus* рассматривается как «модельный» организм: он способен осаждать оксалаты и карбонаты кальция, а также формировать «биоармирование», что приводит к циклическому самовосстановлению и упрочнению структуры минеральных материалов. Однако для реализации описанных биотехнологий необходимы разработка методик и стандартов их применения, а также апробация в реальных условиях эксплуатации. **Заключение.** Настоящий обзор представляет научную основу для дальнейшего развития экспериментальных данных и подтверждает перспективы применения грибной культуры для самовосстановления и стабилизации минеральных материалов в строительной, геотехнической и смежных отраслях.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: биоминерализация, биоцементация, грибы, инженерные живые материалы (ELM), микробно-индуцированное осаждение карбоната кальция (MICP, FICP), наноуровень, оксалат кальция; самовосстанавливающиеся материалы

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ НАУЧНОЙ РАБОТЫ, РЕЗУЛЬТАТОМ КОТОРОЙ СТАЛА ПУБЛИКАЦИЯ: Данная работа выполняется в рамках реализации Программы развития федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» на 2025–2036 годы.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Будникова А.А., Топчий Д.В. От нано- до макроуровня: обзор механизмов биоминерализации с участием грибов для самовосстановления и упрочнения материалов. *Нанотехнологии в строительстве*. 2026; 18(4):507–520. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-4-507-520>. – EDN: RVMP1K.

From nano- to macro-scale: a review of fungal-induced biomineralization mechanisms for self-healing and strengthening of materials

Anna A. Budnikova^{1,2*} , Dmitry V. Topchiy¹ 

¹ National Research Moscow State University of Civil Engineering, 129337, Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, Russian Federation

² LLC Mycokarst, 127273, Berezhovaya Alley, 17-2, 278, Moscow, Russian Federation

* Corresponding author: e-mail: anna.budnikova92@gmail.com

ABSTRACT

Introduction. This review systematizes the key mechanisms of fungal-induced biomineralization for the self-healing and strengthening of mineral materials – calcium carbonate (CaCO_3) precipitation through urea hydrolysis and mycelial metabolic activity (FICP), as well as calcium oxalate (CaC_2O_4) formation via oxalic acid secretion (FIOP). **Materials and methods.** The review is based on an analysis of peer-reviewed scientific studies (Scopus, Web of Science), and more than 80% of them were published within the last five years (2022–2026). The analysis focused on qualitative and quantitative indicators of fungal impact on treated materials' properties – mineral composition and yield, strength gains, and reduced water absorption, confirmed by nano- and microscopy methods.

Results and discussion. A relationship between fungal species and strains, biomineralization mechanisms, medium compositions, and material strengthening effects has been identified in the study. It has been established that *Trichoderma reesei*, *Penicillium chrysogenum*, *Aspergillus niger*, and *Neurospora crassa* effectively induce carbonate biomineralization, enhancing self-healing and durability in concrete and soil matrices. *Pleurotus ostreatus* is considered a model organism capable of precipitating both calcium oxalates and carbonates, and forming bio-reinforcement that enables cyclic self-healing and strengthening of mineral material structures. However, implementing these biotechnologies requires developing application protocols and standards, as well as validation under real operating conditions. **Conclusion.** The present review provides a scientific base for further experimental developments and confirms the potential of fungal cultures for the self-healing and stabilization of mineral materials in construction, geotechnical engineering, and related fields.

KEYWORDS: biomineralization, biocementation, fungi, engineered living materials (ELM), microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP, FICP), nanoscale, calcium oxalate, self-healing materials

SOURCES OF FUNDING FOR THE SCIENTIFIC WORK THAT RESULTED IN THE PUBLICATION: The research was funded by the National Research Moscow State University of Civil Engineering.

FOR CITATION:

Budnikova A.A., Topchiy D.V. From nano- to macro-scale: a review of fungal-induced biomineralization mechanisms for self-healing and strengthening of materials. *Nanotechnologies in Construction*. 2026; 18(4):507–520. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-4-507-520>. – EDN: RVMPK.

ВВЕДЕНИЕ

Минеральные материалы, составляющие основу природного ландшафта и строительного наследия в городской среде, на протяжении всего срока службы подвергаются физическому, химическому и биогенному выветриванию. Особую опасность представляют слабые карстовые грунты (доломит, известняк), которые характеризуются низкой устойчивостью к воздействию воды и склонны к непрогнозируемым обвалам. Описанные процессы усугубляются в результате антропогенной деятельности и климатических изменений, что создает основу для разработки стратегий повышения долговечности и устойчивости инфраструктуры, в том числе сохранения объектов культурного наследия [1–2].

В областях строительства и материаловедения все большее внимание уделяется биотехнологиям, основанным на применении бактерий и грибов, способных в ходе метаболизма восстанавливать конструкции по аналогии с заживлением ран у живых систем [3–4]. Ключевым процессом в этом контексте выступает биоминерализация, когда микроорганизмы участвуют в образовании кальциевых соединений, влияя на состав, морфологию и структуру материалов [5–6].

Исследования в областях геомикробиологии и биоинженерии свидетельствуют о возможности реализации процесса биоминерализации грибной культурой в природных условиях. Грибы непосредственно взаимодействуют с горными породами и грунтовыми композитами, содействуя образова-

нию минералов в широком диапазоне условий. Находясь в зависимости от состава «исходной» среды и метаболической активности микроорганизмов, этот природный феномен играет важную роль в геохимических и биологических циклах, приводящих к изменению свойств грунтовых и строительных конструкций [6–7].

Основным механизмом биоминерализации выступает микробно-индуцированное осаждение карбоната кальция (MICP), которое подразделяется на процессы, реализуемые бактериями (BICP) и грибами (FICP) [8]. Их эффективность определяется видом микроорганизмов, составом питательной среды, источниками и содержанием кальция, концентрацией неорганического углерода, кислотно-щелочного баланса (pH), наличием центров нуклеации (мест формирования кристаллов), а также внешними условиями — температурой, влажностью и интенсивностью выветривания [6–9].

В области самовосстанавливающихся строительных материалов значительная часть исследований посвящена «залечиванию» бетона с применением бактерий *Bacillus pseudofirmus*, *Bacillus cohnii* и *Sporosarcina pasteurii* (BICP), которые помещают в капсулы из биоразлагаемого пластика и замешивают в цементный состав [10–11]. При возникновении трещин (воздействии воздуха и влаги) микроорганизмы активизируются, демонстрируя способность к формированию кальцита и автономному восстановлению конструкций. Однако при реализации бактериального подхода наблюдается снижение прочности бетона на сжатие (до 50%), поскольку поры в его матрице (0,5–1,5 мкм) меньше, чем капсулы (2–4 мкм), что зачастую вызывает образование пустот в структуре материала после их разрыва [12]. Также ученые отмечают низкую жизнеспособность этих микроорганизмов в щелочной среде (до 2 месяцев), высокую стоимость компонентов питательной среды (в основном, лактата кальция) и ограничения по ширине «залечиваемых» трещин (до 1 мм) [12–13].

Определять параметры вышерассмотренных процессов на наноуровне исследователям позволяют методы рентгеновской дифракции (XRD) и сканирующей электронной микроскопии (SEM). XRD предоставляет возможность определить кристаллическую и молекулярную структуру осажденных минералов (например, отличить кальцит и арагонит) и размеры образований, в то время как SEM используют для визуализации морфологий и специфики распределения кристаллов в объеме материалов. При этом исследования шведских ученых показывают, что сочетание SEM с энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией (EDX) и сканирующей просвечивающей рентгеновской микроскопией (STXM) расширяют возможности методов, позволяя выявить распро-

страненность тех или иных минералов и структуру гифов грибов на наноуровне (пространственное разрешение до 30 нм) [14].

В этом отношении биоминерализация, индуцированная грибами *Trichoderma reesei*, *Penicillium chrysogenum*, *Aspergillus niger* и *Neurospora crassa* (FICP) посредством гидролиза мочевины и метаболической активности мицелия, рассматривается как перспективное направление в развитии технологий самовосстановления бетона и биоцементации грунтовых оснований [7–17]. Эти микроорганизмы сохраняют жизнеспособность в щелочной среде (pH 11–12) при экстремальных перепадах температуры и влажности, демонстрируя процесс осаждения карбоната кальция (CaCO_3) за короткие периоды времени (первые осадки наблюдаются через 12 часов) [12]. Также мицелий грибов за счет протяженной структуры и, соответственно, множества мест нуклеации (зародышеобразования) обеспечивает интенсивное формирование кристаллов кальцита, распределяя их по порам и трещинам конструкций [12–17]. Кроме того, наблюдается высокая совместимость продуктов жизнедеятельности грибов с матрицей минеральных материалов [17].

Помимо механизмов MICP–FICP внимание исследовательского сообщества привлекает создание «живых» и высокопрочных биокомпозитов, где мицелий одновременно выполняет роль «агента» образования минералов и природного «армирования» [18–20]. Особый интерес представляет съедобный гриб *Pleurotus ostreatus*, который формирует упругий «биокаркас» и связывает частицы рассыпчатых материалов в устойчивую структуру, способствуя улучшению механических характеристик минеральных матриц [20–22]. Вместе с этим он содействует осаждению оксалата кальция (CaOx или CaC_2O_4) (FIOP), обеспечивая уплотнение, гидрофобизацию поверхности и повышение устойчивости объектов к водной эрозии. Образующиеся композиты отличаются высокой экологичностью: они биоразлагаемы, обладают потенциалом к вторичной переработке и снижению углеродного следа. В зависимости от метода воздействия «грибные» материалы могут приобретать различные механические и технические характеристики, что расширяет область их применения от упаковки и теплоизоляции до строительных элементов [20–23].

Несмотря на обозначенный потенциал грибной культуры, влияние штаммов и условий среды на эффективность осаждения минералов остается малоизученным [4, 9, 24, 25]. В существующих исследованиях, как правило, либо описывается общий механизм минерализации без указания штаммов грибов и состава питательных сред, либо, наоборот, присутствует информация об особенностях конкретных

ПРИМЕНЕНИЕ НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

видов, но без детализации процесса формирования минералов и их оценки на наноуровне («концепция» технологии), что не позволяет оптимизировать и масштабировать результаты лабораторных экспериментов.

Цель данной статьи — систематизировать механизмы биоминерализации, реализуемые грибами, выявив особенности осаждения карбоната (FICP)

и оксалата кальция (FIOP) во взаимосвязи с видами и штаммами микроорганизмов, составом питательных сред и эффектами укрепления материалов. Полученные результаты позволят сформировать основу для дальнейших исследований, совершенствования методик применения грибов для самовосстановления, стабилизации и упрочнения минеральных материалов (рис. 1).

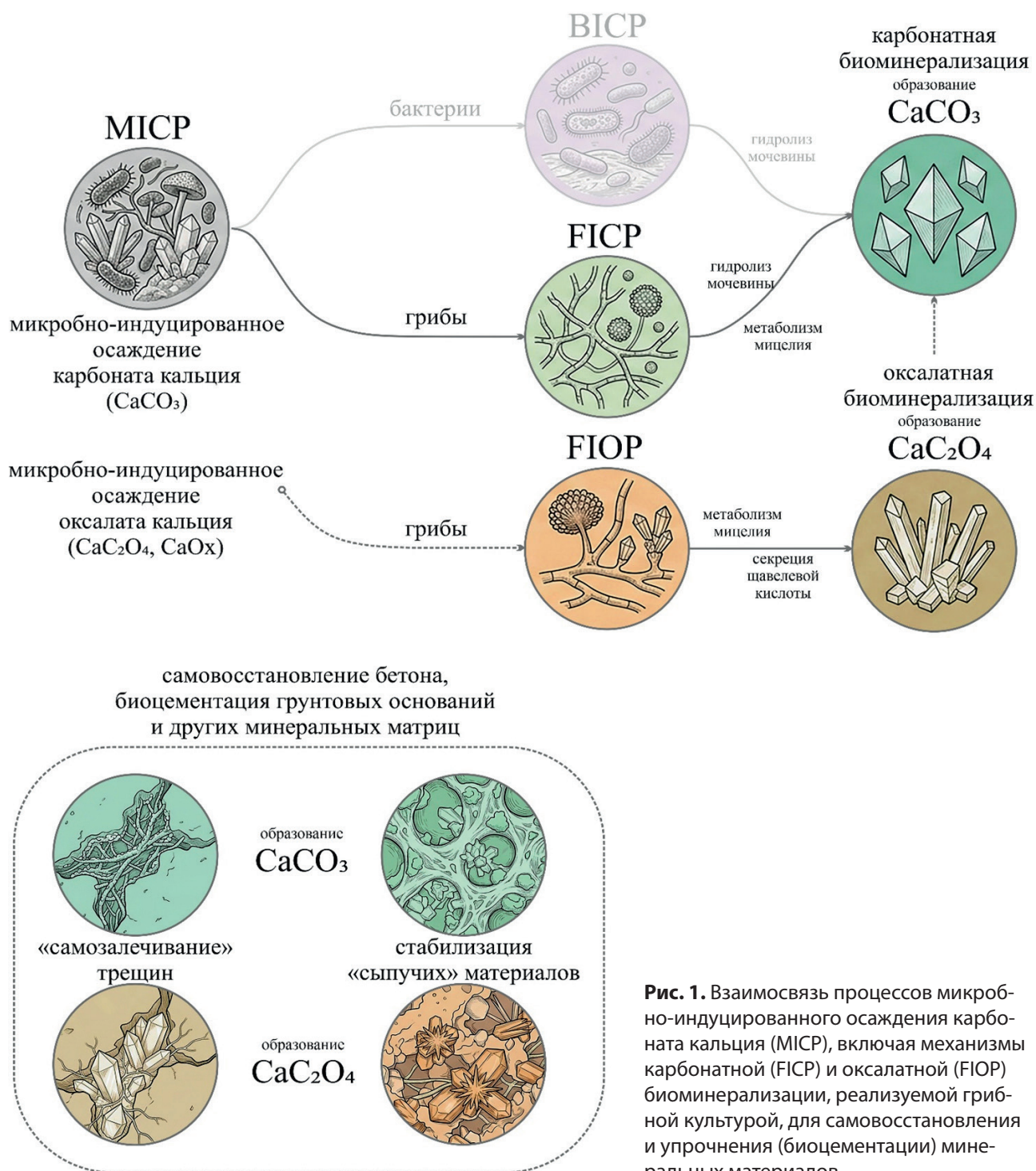


Рис. 1. Взаимосвязь процессов микробно-индуцированного осаждения карбоната кальция (MICP), включая механизмы карбонатной (FICP) и оксалатной (FIOP) биоминерализации, реализуемой грибной культурой, для самовосстановления и упрочнения (биоцементации) минеральных материалов

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

В настоящем обзоре применялись теоретические методы исследования — анализ рецензируемых научных публикаций, индексированных в базах данных Scopus и Web of Science. Важно отметить, что более 80% работ было выпущено в течение последних 5 лет (2022–2026 гг.), из которых около 60% — за последние 3 года (2024–2026 гг.), что подтверждает актуальность и востребованность тематики. Также в статье рассматриваются результаты исследований «основоположников» направления FICP, опубликованные за последние 10 лет, что создает полноценную базу и контекст для сопоставления данных.

На начальном этапе было рассмотрено порядка 100 работ, посвященных применению грибов для создания высокопрочных биокомпозитов, самовосстанавливающихся и инженерных «живых материалов» (ELM), из которых было выделено более 40 значимых исследований в области самовосстановления и биоцементации минеральных материалов и грунтовых оснований.

Критериями отбора публикаций выступали описанные механизмы биоминерализации, информация о видах и штаммах грибов, составах питательных сред, а также количественная и качественная оценка их влияния на эксплуатационные характеристики укрепляемых материалов: состав и объем осаждаемых минералов, прирост прочности, снижение водопоглощения, устойчивость к щелочным условиям и воздействию влаги, а также способность к «залечиванию» трещин. Отдельное внимание было уделено результатам анализа на наноструктурном уровне и подтверждению вышеописанных эффектов при помощи методов нано- и микроскопии (преимущественно SEM и XDR).

Взаимосвязь описанных критериев была положена в основу структуры обзора, послужив его «лейтмотивом» и определив логику систематизации. Помимо этого автор опирался на собственный научный опыт и экспериментальные данные, полученные при работе со штаммами грибов *Trichoderma* и *Pleurotus*

ostreatus. Это позволило сформировать достоверный аналитический материал, отражающий современные тенденции в развитии FICP и FIOP и обеспечивающий интеграцию данных из источников литературы с результатами авторских исследований.

1. Карбонатная биоминерализация, индуцированная грибами (FICP)

1.1. Карбонатная биоминерализация на основе гидролиза мочевины (*Penicillium chrysogenum*, *Neurospora crassa*, *Aspergillus niger*)

Наиболее изученным механизмом биоминерализации, лежащим в основе микробно-индуцированного осаждения карбоната кальция (MICP–FICP), является гидролиз мочевины ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$), в результате которого образуются ионы аммония (NH_4^+) и карбоната (CO_3^{2-}) [6, 8, 14, 17, 26]. В щелочной среде они взаимодействуют с ионами кальция (Ca^{2+}), приводя к формированию карбоната кальция (CaCO_3), осаждаемого в порах и трещинах строительных материалов и грунтовых матриц [17] (рис. 2).

Среди видов грибов, способных к «уреазной» биоминерализации, наиболее изученными и обсуждаемыми являются *Penicillium chrysogenum*, *Neurospora crassa* и *Aspergillus niger*. Они проявляют активность в образовании минералов в цементном шламе и подтверждают воспроизводимость результатов в различных почвенных субстратах [4, 8]. Шведские ученые провели эксперимент, разрезав осажженные грибами кристаллы CaCO_3 на тонкие «пластины» толщиной 75–200 нм. Сканирующая просвечивающая рентгеновская микроскопия (STXM) показала, что кальцит — наиболее термодинамически стабильный полиморф CaCO_3 — сформировался на гифах всех тестируемых микроорганизмов. Также в малом количестве были обнаружены нанокристаллы арагонита и хлорида кальция (CaCl_2), образовавшихся на внеклеточных полимерных веществах (ВПВ) [14].

В исследованиях китайских ученых было показано, что штамм *Penicillium chrysogenum* CS1 спо-



Рис. 2. Механизм карбонатной биоминерализации посредством гидролиза мочевины и уреазной активности грибов: формирование CaCO_3 и биоцементация образцов речного песка

способствует увеличению прочности речного песка на сжатие на 1,8 МПа в процессе биоминерализации, что связано с образованием CaCO_3 и «связыванием» частиц материала [8, 17]. При этом замена 20% природного песка на обработанный отходами и *Aspergillus niger* способствовала повышению прочности на сжатие с 23 до 33 МПа и снижению водопоглощения с 0,9 до 0,5%. Авторы связывают данный эффект с «фиксацией» спор гриба в порах цементно-песчаной матрицы и обосновывают перспективы применения данного вида в производстве кирпича [17, 27].

В альтернативном исследовании рассматривается потенциал осаждения карбоната кальция *Penicillium chrysogenum* для биоцементации поверхностного слоя песчаной почвы и снижения уровня пылеобразования в засушливых (пустынных) регионах. В одном из экспериментов авторы варьировали концентрации хлорида кальция (CaCl_2) и мочевины ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$), в другом — методы инокуляции суспензии на основе грибов. Наиболее высокие показатели прироста прочности (более 2,7 МПа) и содержания карбонатов были достигнуты в течение 24 часов при обработке песка растворами в соотношении 1,5 моль/л CaCl_2 и 1 моль/л $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$. Сканирующая электронная микроскопия (SEM) подтвердила образование кальцита как основного минерала и усиление сцепления частиц почвы на наноуровне, что свидетельствует о возможности формирования устойчивой поверхности грунтовых оснований с применением FICP [28].

Вместе с тем, португальские исследователи, применяя *Penicillium chrysogenum* MUM 9743 и *Neurospora crassa* MUM 9208 для обработки песчаных образцов, достигли максимальной прочности на сжатие 66,5 кПа, что может быть обусловлено различиями в составах сред и фракциях песка, условиях инкубации и уровнях влажности [8].

Российские исследователи указывают на эффективность биоцементации грунтов путем совместного воздействия грибов и бактерий. Добавление в почву 2% «макулатуры» (лигноцеллюлозного субстрата на основе переработанной бумаги), уреаолитической бактерии *Bacillus licheniformis* DSMZ 8782 и дрожжевидного гриба *Scytalidium candidum* 3С обеспечило благоприятные условия для осаждения карбоната кальция (CaCO_3) и прирост прочности на сжатие от 61 кПа до 161,1 кПа. При этом введение биомассы только на основе грибов без добавления целлюлозы и бактерий способствовало упрочнению до 236,6 кПа, что свидетельствует о потенциале грибов в автономном формировании биоцемента [29].

Американские ученые также исследовали синергетическое взаимодействие мицелия широко распространенного микроскопического гриба *Neurospora crassa* и бактерии *Sporosarcina pasteurii*, разработав

инженерный «живой материал» (ELM), обладающий способностью к самовосстановлению и адаптации к суровым условиям среды. В этой системе мицелий выполняет роль «биокаркаса», а бактерии формируют минеральные отложения, укрепляющие структуру материала, что обеспечивает сочетание упругости и умеренной прочности. Исследование показало, что гифы мицелия *Neurospora crassa* способны к «самоминерализации» и без участия бактерий, однако эффективность этого процесса зависит от питательной среды: в присутствии мочевины и кальция происходит осаждение карбоната кальция, сопровождаясь снижением концентрации растворенных компонентов и повышением прочности, особенно при недостатке азота. При этом процесс биоминерализации значительно ускорился при использовании *Sporosarcina pasteurii*, которая в течение 24 часов практически полностью разложила мочевины и кальций, что доказывает потенциал синергетических биосистем (грибы и бактерии) в создании самовосстанавливающихся строительных материалов, а также укреплении и стабилизации почв [29–30] (рис. 3).

Таким образом, карбонатная биоминерализация на основе гидролиза мочевины, реализуемая *Penicillium chrysogenum*, *Neurospora crassa* и *Aspergillus niger*, демонстрирует, что грибы могут выступать эффективными «агентами» образования кальцита. При наличии Ca^{2+} и мочевины, а также обеспечении источников минерального питания и процесса инокуляции можно достигнуть существенного повышения прочности цементных и песчаных материалов, снижения уровня водопоглощения и стабилизации грунтов.

1.2. Карбонатная биоминерализация на основе метаболической активности мицелия (*Trichoderma reesei*, *Candida ethanolica*, *Aspergillus nidulans*)

Некоторые виды грибов способны осуществлять биоминерализацию карбоната кальция (CaCO_3) без участия уреазы: мицелий осаждает ионы кальция (Ca^{2+}) в процессе метаболизма, поглощая углекислый газ (CO_2), что приводит к образованию карбонат-ионов и формированию минералов вдоль поверхности гиф [31] (рис. 4).

Работы американских ученых показывают, что *Trichoderma reesei* обладает высоким потенциалом в «заживлении» трещин в бетоне, поскольку этот род способен адаптироваться к «суровым» условиям среды — низкой влажности, экстремальным температурам, ультрафиолетовому излучению и высокой щелочности [12–13, 32]. В своих экспериментах исследователи сравнивали эффективность *Trichoderma reesei*, *Aspergillus nidulans*, *Cadophora interclivum*, *Umbeliopsis dimorpha*, *Acidomelania panicicola* и *Pseudophia-*

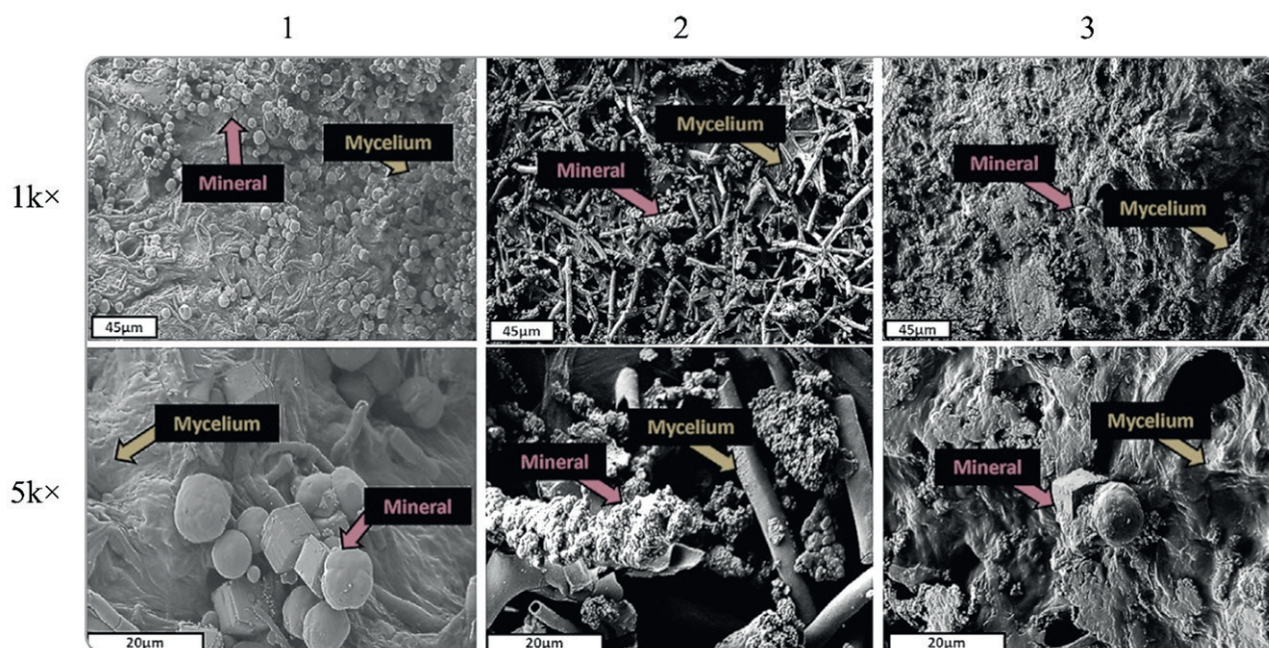


Рис. 3. Образцы почвы в процессе биоминерализации: осаждение карбоната кальция и формирование минералов на гифах грибов: 1 – контрольные образцы (без добавления питательной среды); 2 – опытные образцы с добавлением мочевины; 3 – опытные образцы, выдержанные в солодовом бульоне. Изображения получены методом сканирующей электронной микроскопии (SEM) при увеличениях 1кx и 5кx. Длина шкалы масштаба: 45 мкм (верхний ряд), 20 мкм (нижний ряд) [30]

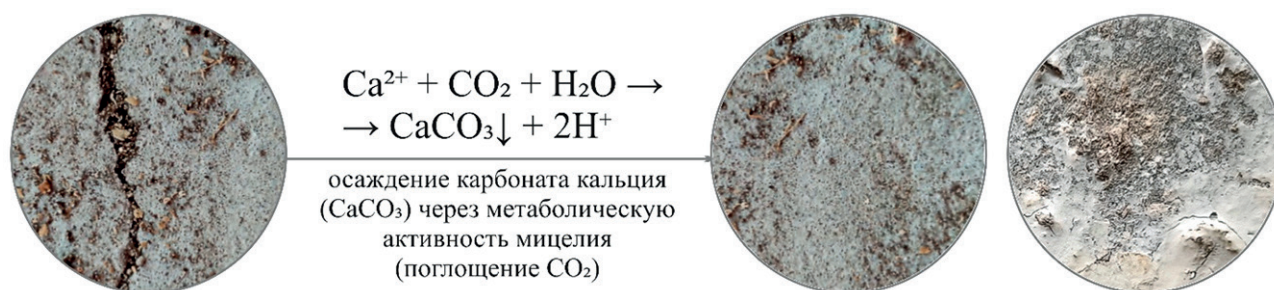


Рис. 4. Механизм карбонатной биоминерализации на основе метаболической активности мицелия грибов и преобразования углекислого газа: формирование CaCO_3 и «самовосстановление» бетона

lophora magnispora в формировании CaCO_3 в питательных средах на основе картофельно-декстрозного агара. Несмотря на выщелачивание гидроксида кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$ из цементного состава и резкое повышение pH от 6,5 до 13,0, *Trichoderma reesei* продемонстрировала устойчивый рост как на поверхности бетона, так и вне его (остальные виды грибов не проявили активность) [12]. Рентгеновская дифракция (XRD) и сканирующая электронная микроскопия (SEM) показали, что кристаллы, осажденные на гифах мицелия, состоят из кальцита. Первые карбонатные образования были зафиксированы уже через 12 часов, а их широкое распространение наблюдалось

на 21-й день. Одновременно с этим было установлено, что прочность бетона на сжатие возрастает при содержании спор 5×10^6 клеток/мм³, но при отклонении от этой «нормы» эффект снижается [12]. В других исследованиях показано, что соотношение 8,42 г спор *Trichoderma reesei* на 1 литр суспензии на основе картофельно-декстрозного агара обеспечивает максимальную прочность бетона на сжатие в 18,99 МПа через 28 суток, что указывает на необходимость соблюдения строгих диапазонов дозирования грибной культуры в составах [33].

Российские исследователи разработали способ восстановления и укрепления объектов из камня

и карстовых известняковых грунтов с применением субстрата на основе природных компонентов и *Trichoderma*, который поддерживает жизнеспособность микроорганизмов в трещинах, способствуя осаждению карбоната кальция в процессе метаболизма и «самозалечиванию» материала аналогичным по составу компонентом [34–35]. В результате каменные конструкции повышают прочность в 2 раза до 40 МПа в течение 28 дней без человеческого и технологического вмешательства [35]. Технология обеспечивает самовосстановление минеральных материалов и предотвращает непрогнозируемые разрушения и обвалы грунтов, доказывая практический и экологический потенциал FICP в автономном укреплении объектов инфраструктуры [20, 31, 35].

Малайзийские ученые, в свою очередь, показали, что дрожжеподобный гриб *Candida ethanolica* при определенном составе питательной среды и концентрации Ca^{2+} способствует повышению прочности бетона на сжатие на 6,27% относительно контрольных образцов с достижением 32,2 МПа через 28 суток. Осажденный CaCO_3 также снижает водопоглощение бетона и повышает его устойчивость к воздействию окружающей среды [6, 17, 36].

Нитчатый гриб *Aspergillus nidulans*, хотя и способен к гидролизу мочевины, демонстрирует способность к биоминерализации в щелочной среде бетона и без уреазы. Однако для этого используют его «мутанты» (например, MAD1445), которые могут расти на поверхности бетонных плит, выдерживая высокие значения pH и участвуя в осаждении CaCO_3 при добавлении кальция в среду [17, 37].

Таким образом, для реализации процесса карбонатной биоминерализации, основанного на метаболической активности грибов, необходимо наличие не только источника кальция, но и питательных веществ (в том числе, микроэлементов), что способствует автономному осаждению CaCO_3 в щелочной среде и формированию устойчивой инфраструктуры [38–39].

2. Оксалатная биоминерализация, индуцированная грибами (FIOP)

2.1. Оксалатная биоминерализация на основе секреции щавелевой кислоты (*Aspergillus niger*, *Penicillium spp.*, *Abortiporus biennis*)

Оксалатная биоминерализация представляет собой отдельный механизм формирования минералов, реализуемый грибной культурой. В нейтральной и щелочной среде щавелевая кислота ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$), секретируемая грибами, взаимодействует с ионами кальция (Ca^{2+}), приводя к образованию оксалата кальция (CaC_2O_4 / CaOx) – малорастворимой соли, осаждаемой на поверхности гиф мицелия. В дальнейшем оксалат может подвергаться биотическому (например, при участии бактерий) и абиотическому преобразованию, что сопровождается высвобождением карбонат-ионов и формированием карбоната кальция (CaCO_3). В этом случае CaOx выступает промежуточным этапом на пути к карбонатной биоминерализации [8, 24, 42]. При этом исследования британских ученых доказали, что щавелевая кислота, выделяемая грибами, способна вторично взаимодействовать с образовавшимся CaCO_3 , высвобождая карбонатные ионы и индуцируя его циклическое осаждение [8, 43] (рис. 5).

В исследованиях польских и российских ученых было установлено, что *Aspergillus niger* и *Penicillium spp.* реализуют оксалатную биоминерализацию при наличии в субстрате источника кальция, причем скорость и интенсивность этого процесса возрастают при добавлении в среду кислотных элементов, нейтрализующих pH [24, 42]. Также было отмечено, что *Abortiporus biennis* способен одновременно образовывать оксалаты и «связывать» тяжелые металлы, что способствует их иммобилизации и доказывает устойчивость этого гриба к загрязненной среде [4, 24].

Таким образом, оксалатная биоминерализация создает предпосылки для последующего формирования карбонатов кальция (CaCO_3). При этом она



Рис. 5. Механизм оксалатной биоминерализации на основе секреции щавелевой кислоты с участием грибов: формирование CaC_2O_4 и стабилизация грунтового основания

представляет собой самостоятельный механизм — важный биогеохимический процесс, который обеспечивает цикличность самовосстановления и иммобилизацию токсичных элементов в природной и искусственной среде обитания.

2.2. Оксалатная биоминерализация и мицелиальное «биоармирование» (*Pleurotus ostreatus*)

Исследования российских ученых показывают, что биотехнологии на основе *Pleurotus ostreatus* представляют собой перспективный подход к укреплению минеральных материалов, подверженных разрушению. Мицелий этого рода гриба отличается метаболической и физической гибкостью, что позволяет ему адаптироваться к экстремальным условиям, изменять свойства субстрата в зависимости от метода обработки (повышать прочность материалов в 2–6 раз) и формировать самовосстанавливающиеся, эластичные и экологически безопасные биокомпозиты [20]. Эксперименты показывают, что мицелий *Pleurotus ostreatus* способен к формированию как оксалата, так и карбоната кальция, выступая также природным «армированием» материала, обеспечивающим циклическое восстановление и укрепление грунтовых оснований в течение 90 дней (1 цикл — 28 дней) [20] (рис. 6).

Исследования китайских ученых подтверждают, что *Pleurotus ostreatus* индуцирует оксалатную биоминерализацию, существенно улучшая физико-механические свойства песчаных грунтов. Эксперименты показали, что мицелий «связывает» поверхностные частицы, предотвращая водную эрозию даже при интенсивном механическом перемешивании (120–170 об/мин). Повышение краевого угла смачивания до 116,42° также свидетельствует о гидрофобизации поверхности, тем самым повышая устойчивость материала к гидродинамическим нагрузкам [8, 44].

Микроскопический анализ минеральных осадков показал, что они состоят преимущественно из кальция, а также моногидрата ($\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) и дигидрата ($\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) оксалата кальция [8]. Исследования

на микро- и наноуровнях подтвердили последовательный характер биоминерализации: метаболическая активность грибов связана с секрецией щавелевой кислоты, что приводит к локальному снижению pH и осаждению оксалатов на гифах мицелия. В дальнейшем при окислительных процессах или повышении pH оксалаты могут преобразовываться в карбонат кальция, что обеспечивает циклическое восстановление минералами пор и трещин материалов и грунтовых матриц [8, 44] (рис. 7).

Таким образом, *Pleurotus ostreatus* стимулирует осаждение оксалата (CaOx) и карбоната кальция (CaCO_3), формирует «биокаркас», что приводит к структурному самовосстановлению и упрочнению минеральных материалов. Он рассматривается как «модельный» организм, демонстрирующий возможности грибной культуры в биоминерализации и «биоармировании» [20, 22, 31, 35, 44].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Настоящий обзор показывает, что биоминерализация, индуцированная грибами, представляет собой самостоятельное и перспективное направление развития инженерных «живых материалов» — устойчивых, экологичных, самовосстанавливающихся. Грибы не только обеспечивают осаждение карбоната кальция (CaCO_3) и оксалата кальция (CaOx), но и выступают в роли «биоармирования» за счет гифальной структуры, что положительно влияет на прочность, пористость и водостойкость материалов и подтверждается экспериментальными данными в различных масштабах (на нано- до макро).

Сравнительный анализ карбонатной биоминерализации на основе гидролиза мочевины и метаболической активности мицелия показывает, что эффективность процессов в обоих случаях зависит от видов и штаммов грибов, ключевых компонентов питательной среды (мочевина, целлюлоза и др.) и наличия источника кальция (Ca^{2+} / солей кальция как CaCl_2). Экспериментальные данные указывают на высокую эффективность некоторых видов гри-



Рис. 6. Механизм оксалатно-карбонатной биоминерализации с участием грибов *Pleurotus ostreatus*: формирование CaCO_3 и CaC_2O_4 , мицелиального «биоармирования» и упрочнение грунтового основания

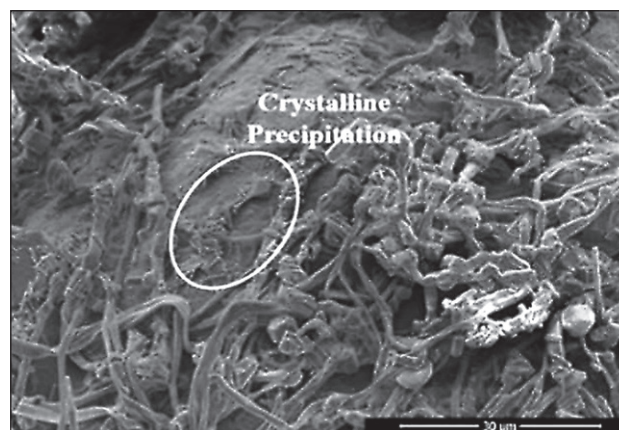
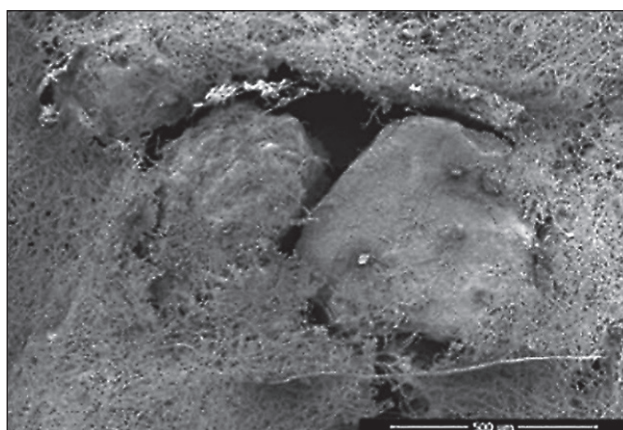


Рис. 7. Изображение песчаного слоя, биоцементированного с участием *Pleurotus ostreatus*, полученное методом сканирующей электронной микроскопии, отображающее мицельный «каркас» и осажденные минералы (SEM) [8]

бов в упрочнении минеральных материалов в течение 28 дней: *Trichoderma reesei* (прирост прочности бетона и карстовых грунтов до 40 МПа), *Aspergillus niger* (прирост прочности цементно-песчаных смесей с 23 до 33 МПа при снижении водопоглощения с 0,9 до 0,5%), *Candida ethanolica* (прирост прочности на 6,27% до 32,2 МПа), а также *Penicillium chrysogenum* и *Neurospora crassa* (прирост прочности песчаных почв на 1,8–2,7 МПа). Дополнительные исследования показывают способность *A. niger*, *P. chrysogenum* и *A. biennis* не только к осаждению минералов, но и к иммобилизации тяжелых металлов.

Pleurotus ostreatus, в свою очередь, стимулирует осаждение оксалата кальция (CaOx) и его преобразование в карбонат кальция (CaCO_3), а также выступает природным «биокаркасом» материалов, что приводит к циклическому и структурному самовосстановлению и упрочнению минеральных матриц. Этот род можно считать «модельным» организмом, демонстрирующим широкие возможности грибной культуры в биоминерализации и «биоармировании», что открывает перспективы для дальнейшего изучения *Pleurotus ostreatus* и разработки методик его применения для упрочнения широкого спектра минеральных материалов.

Однако наблюдаются значительные расхождения между результатами, что может быть обусловлено различиями в штаммах и условиях эксперимента. Также недостаточно изучены механизмы инкапсуляции и долгосрочного поддержания жизнеспособности грибов в цементной матрице, устойчивость полученных структур к циклическим перепадам влажности и температурным воздействиям, а также воспроизводимость эффекта самовосстановления в реальных условиях эксплуатации.

Несмотря на то что направление осаждения минералов и восстановления бетона с применением

грибной культуры (FICP) изучается около 10 лет (с 2016–2019 гг.), уже достигнуты заметные успехи в этой области. Важными задачами дальнейших исследований является стандартизированный выбор наиболее устойчивых и эффективных штаммов грибов для конкретных материалов, разработка методов инкапсуляции (введения) мицелия, обеспечивающих его жизнеспособность без снижения базовой прочности материала, а также изучение совместной работы грибных и бактериальных культур, формирующих синергетические системы MICP–FICP.

Таким образом, необходима разработка стандартов и методик применения грибов для самовосстановления и упрочнения материалов, унифицированных критериев оценки эффективности биоминерализации для масштабирования системы в инженерный макромасштаб.

В данной работе представлена взаимосвязь между видами и штаммами грибов, реализуемыми механизмами биоминерализации, составами питательных сред и эффектами упрочнения минеральных материалов. Обзор формирует целостное представление о текущем технологическом потенциале «живых» грибных культур к биоминерализации, выявляет ограничения масштабирования и закладывает научную основу для дальнейшего развития экспериментальных данных, подтверждая перспективы применения грибных культур для самовосстановления и стабилизации минеральных материалов в строительной, геотехнической и смежных отраслях (табл. 1).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Биоминерализация, индуцированная грибной культурой, представляет собой перспективное направление развития инженерных «живых

Таблица 1. Механизмы биоминерализации, реализуемые грибной культурой: взаимосвязь между видами и штаммами грибов, реализуемыми механизмами биоминерализации, составами среды и «выходными» свойствами (эффектами) укрепляемых материалов

Виды и штаммы грибов	Механизм биоминерализации	Питательная среда	Укрепляемый материал и эффекты	Степень изученности и практический потенциал
<i>Penicillium chrysogenum</i> (CS1, MUM 9743)	– Карбонатная биоминерализация на основе гидролиза мочевины; – Оксалатная биоминерализация на основе секреции щавелевой кислоты	Мочевина, источник / соли Ca^{2+} (CaCl_2 и др.)	Песчаные почвы: повышение прочности на сжатие на 1,8–2,7 МПа, образование CaCO_3 между частицами	Продemonстрирован эффект биоцементации поверхности песчаной матрицы
<i>Neurospora crassa</i> (MUM 9208)	– Карбонатная биоминерализация на основе гидролиза мочевины	Мочевина, источник / соли Ca^{2+} (CaCl_2 и др.), питательные составы для инженерных живых материалов (ELM)	Песчаные почвы: повышение прочности на 66,5 кПа, в ELM – образование CaCO_3 и «биокаркаса»	Перспективный компонент инженерных живых материалов (ELM), формирующий «биоармирование» и распределение минералов в матрицах
<i>Aspergillus niger</i>	– Карбонатная биоминерализация на основе гидролиза мочевины; – Оксалатная биоминерализация на основе секреции щавелевой кислоты	Мочевина, источник / соли Ca^{2+} (CaCl_2 и др.)	Бетонно-песчаная смесь с литейным песком и отходами: повышение прочности на сжатие с 23 до 33 МПа, снижение водопоглощения – с 0,9 до 0,5%	Перспективен для модифицированных цементно-песчаных смесей, требуется дальнейшая оценка воспроизводимости и оценка биобезопасности (патогенности)
<i>Abortiporus biennis</i>	– Оксалатная биоминерализация на основе секреции щавелевой кислоты	Источник Ca^{2+} , питательные микроэлементы	Грунтовые композиты: иммобилизация тяжелых металлов	Перспективен в биоремедиации как вид, устойчивый к токсичным условиям
<i>Scytalidium candidum</i> (3C)	– Карбонатная биоминерализация на основе гидролиза мочевины	Мочевина, CaCl_2 , бактерии <i>Bacillus licheniformis</i> DSMZ 8782 (опционально), «макулатура» (лигноцеллюлоза)	Песчаные и иные почвы: повышение прочности до 161,1 кПа при синтезе с бактериями, до 236,6 кПа – при применении только грибного субстрата	Перспективен для изучения взаимодействия грибов и бактерий при биоцементации грунтов, но требуется оценка биобезопасности (патогенности <i>candidum</i>)
<i>Trichoderma reesei</i>	– Карбонатная биоминерализация на основе метаболической активности мицелия	Картофельно-декстрозный агар (PDA/PDB), источник / соли Ca^{2+} (CaCl_2 , лактат кальция), минеральные компоненты	Бетон: образование CaCO_3 в трещинах, эффективность в щелочной среде, прирост прочности до 18,99 МПа. Камень и карстовые грунты: прирост прочности в 2 раза до 40 МПа за 28 дней	Один из наиболее изученных и осуждаемых видов, перспективен для применения в самовосстанавливающемся бетоне и стабилизации грунтовых субстратов
<i>Candida ethanolica</i>	– Карбонатная биоминерализация на основе метаболической активности мицелия	Питательная среда, источник / соли Ca^{2+} (CaCl_2 и др.)	Поверхность бетонных образцов: прирост прочности на 6,27% до 32,2 МПа, формирование слоя CaCO_3	Перспективен для поверхностного упрочнения бетона, но требуется оценка биобезопасности (патогенности <i>candida</i>)
<i>Aspergillus nidulans</i> (MAD1445)	– Карбонатная биоминерализация на основе метаболической активности мицелия	Картофельно-декстрозный агар (PDA/PDB), источник / соли Ca^{2+} (CaCl_2 , лактат кальция)	Бетонные плиты: сохранение жизнеспособности при pH 13, осаждение CaCO_3	Перспективен как мутантная модель для совершенствования механизмов и методик
<i>Pleurotus ostreatus</i> (M5)	– Оксалатная биоминерализация на основе метаболической активности мицелия – Карбонатная биоминерализация на основе метаболической активности мицелия – Мицелиальное «биоармирование» («биокаркас»)	Природные компоненты, источники Ca^{2+}	Песчаные и известковые карстовые грунты: формирование CaOx и CaCO_3 , гидрофобизация поверхности, циклическое самовосстановление и укрепление в течение 90 дней	Перспективен как модельный организм, демонстрирующий возможности грибной культуры в биоминерализации и «биоармировании». Обладает высоким потенциалом в стабилизации грунтов и создании высокопрочных и экологических биокомпозитов

материалов», а также технологий самовосстановления и упрочнения минеральных материалов. В настоящем обзоре систематизированы два ключевых механизма — образование карбоната кальция (CaCO_3) через гидролиз мочевины и метаболическую активность мицелия (FICP), а также оксалата кальция (CaC_2O_4) посредством секреции щавелевой кислоты (FIOP).

В ходе исследования выявлена взаимосвязь между видами и штаммами грибов, реализуемыми механизмами биоминерализации, составами питательных сред и эффектами упрочнения минеральных материалов. Показано, что *Trichoderma reesei*, *Penicillium chrysogenum*, *Aspergillus niger* и *Neurospora crassa* эффективно индуцируют образование карбоната кальция, повышая прочность и устойчивость бетонных и грунтовых материалов к воздействию воды. *Pleurotus ostreatus* демонстрирует способность к осаждению как оксалата, так и карбоната кальция, а также формирует «биармирование», обеспечивая

циклическое самовосстановление и упрочнение минеральных матриц.

Экспериментальные данные в нано- и макро-масштабах подтверждают положительное влияние грибов на изменение эксплуатационных характеристик материалов, подтверждая перспективы применения этой культуры в строительной, геотехнической и смежных отраслях. Тем не менее необходимы стандартизация методик применения грибов для самовосстановления и укрепления материалов, разработка систем инкапсуляции культуры в существующие матрицы и критериев оценки эффективности биоминерализации, а также проверка устойчивости систем в реальных условиях эксплуатации.

Таким образом, настоящая работа формирует научную основу для дальнейших исследований и подтверждает высокий потенциал грибных культур в упрочнении и самовосстановлении минеральных материалов строительной, геотехнической и смежных отраслях.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Sirt C.E., Bilecen K., Akoglu K.G.; Sahin G.N. Potential of biological mortar for micro-crack remediation of calcareous stones in historical monuments. *Turkish Academy of Sciences Journal of Cultural Inventory*. 2021;24:223–235. <https://doi.org/10.22520/tubaked2021.24.012>
2. Pereda A.F., Saez-Perez M.P. Deterioration patterns in preferred building orientations: Case study in Granada, Spain. *Results in Engineering*. 2026;29:1–12. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2026.109299>
3. Jose S.A., Arvisu E., Menezes P.L. Self-Healing Materials: Mechanisms, Properties, and Applications. *Processes*. 2026;14(9):1436:1–27. <https://doi.org/10.3390/pr14091436>
4. Sazanova (nee Barinova) K.V., Frank-Kamenetskaya O.V., Vlasov D.Yu., Zelenskaya M.S., Vlasov A.D., Rusakov A.V., Petrova M.A. Carbonate and Oxalate Crystallization by Interaction of Calcite Marble with *Bacillus subtilis* and *Bacillus subtilis*—*Aspergillus niger* Association. *Crystals*. 2020;10(9):756:1–16. <https://doi.org/10.3390/cryst10090756>
5. Jin C., Huang Y., Naraghi M., Wu C. Nanomaterial: a neglected bioink ingredient for 3D printing of biomineralization-enabled structural composites. *Frontiers in Mechanical Engineering*. 2025;11:1655463:1–8. <https://doi.org/10.3389/fmech.2025.1655463>
6. Zhao J., Csetenyi L., Gadd G.M. Fungal-induced CaCO_3 and SrCO_3 precipitation: a potential strategy for bioprotection of concrete. *Science of The Total Environment*. 2022;816:1–13. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151501>
7. Gadd G.M. Fungal biomineralization. *Current Biology*. 2021;31(24):1557–1563. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2021.10.041>
8. Jiang L., Cheng M., Hu S., Wang W., Zhang Y., Liu Y. Fungal-Induced Calcium Carbonate Precipitation in Civil Engineering: Mechanisms and Innovative Applications for Soil Stabilization, Self-Healing Concrete, and Heavy Metal Immobilization. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2025;38(3):03125002:1–14. <https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-21637>
9. Rokaya N., Carr E.C., Tiwari S., Wilson R.A., Jin C. Design of Co-culturing system of diazotrophic cyanobacteria and filamentous fungi for potential application in self-healing concrete. *Materials Today Communications*. 2025;44: 112093. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2025.112093>
10. Yan Z., Nakashima K., Takano C., Kawasaki S. Strategies for cost-optimized biocement production: a comprehensive review. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2025;41(67):1–15. <https://doi.org/10.1007/s11274-025-04281-2>
11. Wong P.Y., Mal J., Sandak A., Luo L., Jian J., Pradhan N. Advances in microbial self-healing concrete: A critical review of mechanisms, developments, and future directions. *Science of The Total Environment*. 2024;947:1–16. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174553>
12. Jin C., Yu R., Shui Z. Fungi: A Neglected Candidate for the Application of Self-Healing Concrete. *Frontiers in Built Environment*. 2018;4(62):1–8. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2018.00062>
13. Van Wylick A., Vandersanden S., Jonckheere K., Rahier H., De Laet L., Peeters E. Screening fungal strains isolated from a limestone cave on their ability to grow and precipitate CaCO_3 in an environment relevant to concrete. *microPublication Biology*. 2023;10.17912:1–9. <https://doi.org/10.17912/micropub.biology.000764>

14. Tuyishime J.R.M., Hammer E.C. Pla-Ferriol M., Thanell K., Alwmark C., van Velzen S., Floudas D., Platakys R., Obst M., Zou H. Nanoscale Characterization of Fungal-Induced CaCO₃ Precipitation: Implications for Self-Healing Concrete. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2025;17(26):37648–37656. <https://doi.org/10.1021/acsami.5c07137>
15. Van Wylick A., Monclaro A.V., Elsacker E., Vandeloock S., Rahier H., De Laet L., Cannella D., Peeters E. A review on the potential of filamentous fungi for microbial self-healing of concrete. *Fungal Biology and Biotechnology*. 2021;8(16):1–12. <https://doi.org/10.1186/s40694-021-00122-7>
16. Van Wylick A., Brouwers E., Rahier H., Laet L., Peeters E. Encapsulation of *Trichoderma reesei* and *Neurospora crassa* in calcium alginate capsules for fungi-mediated self-healing concrete: An explorative study on the protocol, survival of the organisms and CaCO₃ biomineralization. *Developments in the Built Environment*. 2024;18:1–10. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100445>
17. Iqbal D.M., Wong L.S., Kong S.Y. Bio-Cementation in Construction Materials: A Review. *Materials*. 2021;14(9):2175:1–21. <https://doi.org/10.3390/ma14092175>
18. Javadian A., Le Ferrand H., Hebel D.E., Saeidi N. Application of Mycelium-Bound Composite Materials in Construction Industry: A Short Review. *SOJ Materials Science & Engineering*. 2020;7(2):1–9. <https://doi.org/10.15226/sojmse.2020.00162>
19. Alemu D., Tafesse M., Deressa Y.G. Production of Mycoblock from the Mycelium of the Fungus *Pleurotus ostreatus* for Use as Sustainable Construction Materials. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2022(2022):1–12. <https://doi.org/10.1155/2022/2876643>
20. Budnikova A.A., Topchiy D.V. Toward protection of urban stone structures from decay using *pleurotus ostreatus*: mycokarst self-healing material. *Construction Materials and Products*. 2026;9(2):4:1–15. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2026-9-2-4>
21. Soh E., Teoh J.H., Leong B., Xing T., Le Ferrand H. 3D printing of mycelium engineered living materials using a waste-based ink and non-sterile conditions. *Materials & Design*. 2023;236:112481:1–11. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.112481>
22. Nakazawa T., Kawauchi M., Otsuka Y., Han J., Koshi D., Schiphof K., Ramirez L., Pisabarro A.G., Honda Y. *Pleurotus ostreatus* as a model mushroom in genetics, cell biology, and material sciences. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2024;108(1):217. <https://doi.org/10.1016/10.1007/s00253-024-13034-4>
23. Alemu D., Tafesse M., Mondal A.K. Mycelium-Based Composite: The Future Sustainable Biomaterial. *International Journal of Biomaterials*. 2022;401528:1–12. <https://doi.org/10.1155/2022/8401528>
24. Graž M. Role of oxalic acid in fungal and bacterial metabolism and its biotechnological potential. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2024;40:178. <https://doi.org/10.1007/s11274-024-03973-5>
25. Van Wylick A., Rahier H., Laet L., Peeters E. Conditions for CaCO₃ Biomineralization by *Trichoderma Reesei* with the Perspective of Developing Fungi-Mediated Self-Healing Concrete. *Global challenges*. 2024;1(8):1–8. <https://doi.org/10.1002/gch2.202300160>
26. Devgon I., Sachan R.S.K., Rajput K., Kumar M., Al-Tawaha A.R.M.S., Karnwal A., Malik T. Exploring fungal potential for microbial-induced calcite precipitation (MICP) in bio-cement production. *Frontiers in Materials: Biomaterials and Bio-Inspired Materials*. 2024;11:1–11. <https://doi.org/10.3389/fmats.2024.1396081>
27. Fang, C.; Kumari, D.; Zhu, X.; Achal, V. Role of fungal-mediated mineralization in biocementation of sand and its improved compressive strength. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2018;133:216–220. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2018.07.013>
28. Tuckett T., Adegoke A., Salifu E. Optimizing Fungal Growth Duration and Concentrations of Cementation Solutions for Fugitive Dust Mitigation via FICP. *Geotechnical Frontiers*. 2025. <https://doi.org/10.1061/9780784485996.042>
29. From Waste to Strength: Applying Wastepaper, Fungi and Bacteria for Soil Stabilization. Golovkina D.A., Zhurishkina E.V. 1,2, Saitova A.T., Bezruchko M.V., Lapina I.M., Kulminskaya A.A. *Applied Sciences*. 2024;14:11678:1–14. <https://doi.org/10.3390/app142411678>
30. Viles E., Heyneman E., Lin S., Montague V., Darabi A., Cox L.M., Phillips A., Gerlach R., Espinosa-Ortiz E.J., Heveran C. Mycelium as a scaffold for biomineralized engineered living materials. *Cell Reports Physical Science*. 2025;6(4):102517. <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2025.102517>
31. Будникова А.А. Междисциплинарная биотехнология «Микокарст»: эффекты от внедрения в области строительства и перспективы. *EurasiaScience: Сборник статей LXXIV международной научно-практической конференции, Москва, 30–31 декабря 2025 года*. Москва: Общество с ограниченной ответственностью «Актуальность.РФ». 2025;56–57. EDN: EXBYQG
32. Luo J., Chen X., Crump J., Zhou H., Davies D.G., Zhou G., Zhang N., Jin C. Interactions of fungi with concrete: Significant importance for bio-based self-healing concrete. *Construction and Building Materials*. 2018;164:275–285. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.233>
33. Chiadighikaobi P.C., Hematibahar M., Kharun M., Stashevskaya N.A., Camara K. Predicting mechanical properties of self-healing concrete with *Trichoderma Reesei* Fungus using machine learning. *Civil & Environmental Engineering*. 2024;11(1):1–17. <https://doi.org/10.1080/23311916.2024.2307193>
34. Патент № 2820439 С1 Российская Федерация, МПК C04B 41/62. Способ реставрации и ремонта изделий и сооружений из бетона и природного камня: № 2023121462: заявл. 16.08.2023; опубл. 16.08.2023 / Будникова А.А.; заявитель: Общество с Ограниченной Ответственностью «Микокарст». EDN: AJNFEF.
35. Будникова А.А. Восстановление объектов из камня с помощью спор грибов: зеленая технология «Микокарст». *Advances in Science and Technology: Сборник статей LXXIII международной научно-практической конференции, Москва, 15 декабря 2025 года*. Москва: Общество с ограниченной ответственностью «Актуальность.РФ». 2025;170–172. EDN: CTZQKM

36. Wong L.S., Oweida A.F.M., Kong S.Y., Iqbal D.M., Regunathan P. The surface coating mechanism of polluted concrete by *Candida ethanolica* induced calcium carbonate mineralization. *Construction and Building Materials*. 2020;257:119482. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119482>
37. Menon R.R., Luo J., Chen X., Zhou H., Liu Z., Zhou G., Zhang N., Jin C. Screening of Fungi for Potential Application of Self-Healing Concrete. *Scientific Reports*. 2019;1(9):1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-39156-8>
38. Farid A.S., Yousef S.T.M., Abd-El Hafez G.H.M., Elsayed K.N.M., El-Khateb A.A.E., Abdelaziz M.M. Effect of novel gram-positive bacteria and fungi on the durability, corrosion resistance performance, and self-healing ability of concrete over various curing conditions. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*. 2024;13(7):995–1014. <https://doi.org/10.1080/21650373.2024.2338555>
39. Aliah N.M.D., Mohd I.J., Abdullah F.A., Saddam A.S. The Effect of Fungus on Concrete as Self-Healing Agent: A Systematic Review. *Recent Trends in Civil Engineering and Built Environment*. 2022;3(1):1607–1613. <https://doi.org/10.30880/rt-cebe.2022.03.01.179>
40. Wylick V.A., Monclaro A.V., Elsacker E., Vandeloock S., Rahier H., De Laet L., Cannella D., Peeters E. A review on the potential of filamentous fungi for microbial self-healing of concrete. *Fungal Biology and Biotechnology*. 2021;8(16):1–12. <https://doi.org/10.1186/s40694-021-00122-7>
41. Klikova K., Holecek P., Hangocova J., Konakova D., Neznaerka V., Stiborova H. Fungal biomineralization potential for stabilization of waste powders. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2025;13(6). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.119335>
42. Frank-Kamenetskaya O., Zelenskaya M., Izatulina A., Gurzhiy V., Rusakov A., Vlasov D. Oxalate formation by *Aspergillus niger* on minerals of manganese ores Available to Purchase. *American Mineralogist*. 2022;107(1):100–109. <https://doi.org/10.2138/am-2021-7651>
43. Burford E.P., Hillier S., Gadd G.M. Biomineralization of Fungal Hyphae with Calcite (CaCO_3) and Calcium Oxalate Mono- and Dihydrate in Carboniferous Limestone Microcosms. *Geomicrobiology Journal*. 2006;23(8):599–611. <https://doi.org/10.1080/01490450600964375>
44. Zhang X., X. Fan C. Wang, X. Yu. A novel method to improve the soil erosion resistance with fungi. *Acta Geotech*. 2023.18(5):2827–2845. <https://doi.org/10.1007/s11440-022-01673-8>

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Авторы заявляют о том, что при подготовке статьи не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта и технологии, основанные на искусственном интеллекте.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Будникова Анна Александровна – лаборант-исследователь Национального исследовательского Московского государственного строительного университета, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация; генеральный директор «Микокарст», 127273, Москва, ул. аллея Березовая, 17-2, 278, Российская Федерация, anna.budnikova92@gmail.com, BudnikovaAA@mgsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7168-3174>

Топчий Дмитрий Владимирович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Испытания сооружений» Национального исследовательского Московского государственного строительного университета, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация, TopchiyDV@mgsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3697-9201>

ВКЛАД АВТОРОВ

Будникова А.А. – концепция исследования; разработка методологии; сбор и анализ источников литературы; систематизация; написание статьи; подготовка графических материалов; редактирование текста; выводы.

Топчий Д.В. – научное руководство.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 06.07.2026; одобрена после рецензирования 13.08.2026; принята к публикации 18.08.2026.