

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 691.32

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-1-8-29

# Современные подходы к созданию самовосстанавливающегося бетона с использованием бактерий родов *Bacillus* и *Sporosarcina*

**Т.А. Низина, А.О. Ковшов**

**Татьяна Анатольевна Низина\***, **Артем Олегович Ковшов**

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева,  
Саранск, Российская Федерация

*nizinata@yandex.ru\**, *a-kovshov@list.ru*



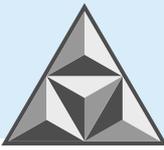
Представлен комплексный анализ современных биотехнологий самовосстановления бетона на основе микробно-индуцированного осаждения карбоната кальция (MICP). Рассмотрены механизмы биохимической активности бактерий, включая штаммы *Bacillus subtilis*, *Bacillus cereus* и *Sporosarcina pasteurii*. Особое внимание уделено методам инкапсуляции микроорганизмов и питательных субстратов для обеспечения жизнеспособности бактерий в условиях высокощелочной среды цементной матрицы. Показаны ключевые факторы, влияющие на эффективность биоминерализации, и перспективные направления развития технологии самовосстанавливающихся строительных материалов.

**Ключевые слова:** самовосстанавливающийся бетон, долговечность, микробно-индуцированное осаждение карбоната кальция, *Bacillus*, *Sporosarcina*, биоминерализация, инкапсуляция микроорганизмов

**Для цитирования:**

Низина Т.А., Ковшов А.О. Современные подходы к созданию самовосстанавливающегося бетона с использованием бактерий родов *Bacillus* и *Sporosarcina* // Умные композиты в строительстве. 2026. Т. 7, вып. 1. С. 8-29. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/7081/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-1-8-29



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-1-8-29

# Modern approaches to the creation of self-healing concrete using *Bacillus* and *Sporosarcina* bacteria

**T.A. Nizina, A.O. Kovshov**

**Tatyana Anatolyevna Nizina\***, **Artem Olegovich Kovshov**

National Research Mordovian State University named after N.P. Ogaryov, Saransk, Russian Federation  
[nizinata@yandex.ru](mailto:nizinata@yandex.ru)\*, [a-kovshov@list.ru](mailto:a-kovshov@list.ru)



*The paper presents a comprehensive analysis of modern biotechnologies for concrete self-healing based on microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP). The authors consider the mechanisms of biochemical activity of bacteria, including strains of *Bacillus subtilis*, *Bacillus cereus*, and *Sporosarcina pasteurii*. Particular attention is paid to methods of encapsulating microorganisms and nutrient substrates to ensure the viability of bacteria in the highly alkaline environment of the cement matrix. The paper highlights key factors affecting the effectiveness of biomineralisation and promising areas for the development of self-healing building materials technology.*

**Keywords:** self-healing concrete, durability, microbially induced calcium carbonate precipitation, *Bacillus*, *Sporosarcina*, biomineralisation, encapsulation of microorganisms

**For citation:**

Nizina T.A., Kovshov A.O. Modern approaches to the creation of self-healing concrete using *Bacillus* and *Sporosarcina* bacteria // *Smart Composite in Construction*. 2026. Vol. 7, Iss. 1. P. 8-29  
URL: <https://comincon.ru/en/nauka/issue/7081/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-1-8-29

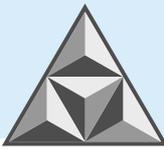


## ВВЕДЕНИЕ

Современная инфраструктура, являющаяся каркасом урбанизированной среды, в значительной степени зависит от эксплуатационных характеристик традиционных строительных материалов, среди которых лидирующие позиции занимает бетон. Его повсеместное применение обусловлено высокой прочностью при сжатии и относительной доступностью. Однако парадокс заключается в том, что, являясь основой долговечности конструкций, он сам уязвим для целого ряда деградиационных процессов. Под постоянным воздействием агрессивных сред, механических нагрузок, циклического замораживания и оттаивания в материале формируются микротрещины, которые, разрастаясь, приводят к макроскопическим повреждениям, коррозии арматуры и разрушению конструкции. Данная уязвимость порождает серьезные экономические и эксплуатационные последствия. Необходимость в систематическом ремонте, усилении и преждевременной замене бетонных элементов ложится тяжелым бременем на муниципальные бюджеты и частных владельцев. Традиционные ремонтные технологии, такие как инъектирование трещин или нанесение защитных покрытий, зачастую носят симптоматический характер. Они требуют значительных трудозатрат, простоев объекта и не устраняют первопричину разрушения, а лишь замедляют ее проявление. В свете этих вызовов научное сообщество сфокусировалось на поиске проактивных и устойчивых решений. Одним из наиболее многообещающих направлений, находящихся на стыке материаловедения и биотехнологии, является разработка самовосстанавливающихся бетонов. В отличие от пассивных традиционных материалов, такие системы обладают функцией «заживления», по аналогии с живыми организмами. При этом ключевым механизмом выступает использование специфических штаммов бактерий, которые вводят в состав бетонной смеси на стадии производства совместно с биоразлагаемыми питательными веществами-капсулами. Инновационный принцип заключается в следующем: при образовании трещины и проникновении в нее влаги капсула с бактериями (например, рода *Bacillus*) разрушается. Микроорганизмы, активизируясь, начинают потреблять питательный субстрат и в процессе своей жизнедеятельности запускают биохимическую реакцию микробно-индуцированной кальцификации. Продуктом этой реакции является нерастворимый карбонат кальция ( $CaCO_3$ ), который эффективно запечатывает трещину в бетоне, предотвращая дальнейшее проникновение в него воды и агрессивных агентов. Этот процесс не только восстанавливает целостность структуры, но и повышает водонепроницаемость материала.

### *Обзор вопроса о долговечности и восстановлении бетона*

В современной строительной индустрии вопрос поддержания структурной целостности и эксплуатационной долговечности бетона сохраняет свою актуальность. Несмотря на высокую прочность при сжатии, бетонная матрица изначально обладает склонностью к образованию дефектов. Под совокупным воздействием механических напряжений, циклического замораживания и оттаивания, а также усадочных процессов в материале закономерно формируется сеть микротрещин. Эти дефекты, часто не различимые невооруженным глазом, играют роль «ахиллесовой пяты» конструкции: они не только снижают прочностные характеристики материала, но и способствуют проникновению вглубь бетона влаги и агрессивных компонентов, таких как хлориды и сульфаты. Контактная со стальной арматурой, эти вещества инициируют процесс коррозии, который приводит к потере несущей способности и прогрессирующему разрушению элемента [1].



В свете указанных вызовов традиционные подходы к ремонту и усилению бетонных конструкционных материалов, являясь трудоемкими и затратными, демонстрируют свою ограниченность, поскольку носят реактивный, а не превентивный характер. В материаловедении наиболее перспективным направлением признана разработка «интеллектуальных» материалов, наделенных функцией автономного самовосстановления. Среди инновационных стратегий лидирующие позиции занимает технология, основанная на фундаментальном биологическом процессе – микробно-индуцированном осаждении карбоната кальция (MICP) [2]. При этом предлагается принципиально новое решение, заимствованное у природы: использование метаболической активности специфических микроорганизмов (бактерий родов *Bacillus* или *Sporosarcina*) для биоминерализации.

Микробно-индуцированное осаждение карбоната кальция (MICP) представляет собой природный биологический феномен, в рамках которого микроорганизмы в процессе своей метаболической активности могут продуцировать неорганические соединения. Этот процесс, являющийся формой биоминерализации, всесторонне изучен в контексте строительных материалов [2-7] и рассматривается как одна из наиболее технологически обоснованных платформ для создания коммерчески жизнеспособных самовосстанавливающихся бетонов. Однако, чтобы преобразовать данный потенциал в надежную и предсказуемую функцию материала, необходимо обеспечить соблюдение ряда критически важных условий на всех этапах жизненного цикла конструкций.

Первым фундаментальным вызовом является обеспечение готовности самозалечивающего агента к моменту образования трещины. Поскольку микробные культуры не могут длительное время выживать в агрессивной (щелочной) среде бетона, а преждевременная их активация не допускается, применяется стратегия защиты. Наиболее эффективным методом признано инкапсулирование бактериальных спор в специальные оболочки-капсулы [8-11]. Эти микроконтейнеры (например, на основе отвержденного альгината кальция [12]) выполняют двойную функцию – защищают биологический агент от разрушения и выступают в роли механического триггера. В момент формирования трещины и ее распространения капсула разрушается, высвобождая микроорганизмы в области дефекта, что инициирует процесс восстановления материала.

Второе обязательное условие касается создания благоприятной среды для метаболизма бактерий после их активации. Разрушение капсулы является лишь первым шагом; для последующей жизнедеятельности аэробных бактерий и запуска процесса MICP необходим одновременный доступ к кислороду, влаге и заранее внесенным в бетонную матрицу питательным веществам [13]. Именно вода выступает ключевым проводником, растворяя питательные субстраты (например, лактат кальция) и обеспечивая их транспортировку к бактериальным клеткам. Максимальная эффективность самозалечивания достигается в конструкциях, эксплуатирующихся в условиях периодического увлажнения, или в среде с высокой влажностью воздуха, так как эти факторы гарантируют наличие жидкой фазы, необходимой для протекания биохимических реакций.

Третий, наиболее сложный аспект – обеспечение долговечности механизма самовосстановления. От источника залечивания требуется сохранять жизнеспособность и способность к активации на протяжении всего проектного срока службы конструкции, который может исчисляться десятилетиями. Для решения этой задачи производится тщательный отбор штаммов бактерий, обладающих способностью образовывать чрезвычайно устойчивые эндоспоры. В состоянии спор микроорганизмы метаболически неактивны и демонстрируют высокую резистентность к экстремальным значениям pH, механическим



нагрузкам, отсутствию питательных веществ и колебаниям температуры. Их особенность – способность быстро переходить от состояния анабиоза к активной фазе именно в момент трещинообразования, что как раз и является наиболее практичным решением для повышения долговечности бетона [14].

Эффективность и кинетика процесса микробно-индуцированного осаждения карбоната кальция (MICP) находятся в прямой зависимости от сложного комплекса биотических и абиотических факторов. С одной стороны, ключевую каталитическую роль играют специфические штаммы бактерий, такие как *Sporosarcina* или *Bacillus*; их метаболическая активность служит двигателем реакции. С другой стороны, успешная минерализация определяется рядом физико-химических условий окружающей среды, включая уровень минерализации субстрата и pH, температурный режим, доступность питательных веществ. Совокупное воздействие этих переменных определяет вариабельность и результативность MICP в широком спектре сред – от пористой структуры бетона до песчаных грунтов [15].

Для целенаправленного управления и оптимизации данного биотехнологического процесса выделяют четыре параметра, выступающие критическими точками контроля:

(I) *Концентрация ионов кальция ( $Ca^{2+}$ )*. Достаточная концентрация ионов кальция в растворе является первым обязательным условием. Эти ионы выступают в роли катионного реагента, который, связываясь с карбонат-анионами ( $CO_3^{2-}$ ), формирует нерастворимый осадок карбоната кальция. Источником  $Ca^{2+}$  часто служат соли, такие как хлорид или ацетат кальция, вводимые в систему в качестве питательного субстрата.

(II) *Концентрация растворенного неорганического углерода (DIC)*. Данный фактор определяет анионную составляющую реакции. Растворенный неорганический углерод в форме карбонат-ионов ( $CO_3^{2-}$ ) является прямым продуктом бактериального метаболизма. Его доступность зависит от интенсивности микробной активности, например, скорости гидролиза мочевины, в результате чего образуется  $CO_2$  и аммоний, сдвигающий pH в щелочную область.

(III) *Значение водородного показателя (pH)*. Уровень pH среды является решающим фактором, влияющим как на жизнеспособность бактерий, так и на химическое равновесие карбонатной системы. Щелочная среда (pH > 8) является оптимальной, поскольку смещает равновесие в сторону преобладания карбонат-ионов ( $CO_3^{2-}$ ) над бикарбонатами ( $HCO_3^-$ ), что значительно ускоряет и облегчает реакцию осаждения кристаллов кальцита.

(IV) *Наличие центров зародышеобразования (нуклеаторов)*. Процесс кристаллизации требует наличия активных центров, на которых начинается рост кристаллов. Поверхность бактериальных клеток, обладающая отрицательным зарядом, идеально подходит для этого, эффективно адсорбируя положительно заряженные ионы  $Ca^{2+}$ . Так сами микробные клетки не только продуцируют реагенты, но и физически выступают матрицей для гетерогенного зародышеобразования, определяя морфологию и прочность формирующегося карбонатного цемента [14].

Биотехнологический подход к созданию самовосстанавливающегося бетона представляет собой инновационную стратегию, основанную на уникальной способности специфических микроорганизмов (главным образом, бактерий родов *Bacillus* и *Sporosarcina*) индуцировать процесс биоминерализации. В силу своей метаболической активности эти микроорганизмы продуцируют нерастворимые соединения карбоната кальция, которые эффективно заполняют микродефекты и полости, выполняя функцию естественного «залечивания» возникающих трещин [1, 2].



Среди наиболее изученных и технологически перспективных штаммов можно выделить *Bacillus subtilis*, *Bacillus cereus*, *Sporosarcina pasteurii* (известную ранее как *Bacillus pasteurii*) и *Sporosarcina ureae*. Ключевое эксплуатационное преимущество данных микроорганизмов заключается в их природной способности к спорообразованию. Это свойство позволяет бактериям переходить в латентное (метаболически неактивное) состояние, обеспечивая их длительную выживаемость в агрессивных условиях высокощелочной среды цементной матрицы ( $\text{pH} > 12$ ). Микроорганизмы сохраняют жизнеспособность в виде устойчивых эндоспор, выходя из анабиоза и активируясь только при появлении доступа влаги и кислорода, который возникает вследствие образования новых трещин [1].

Эффективность и скорость процесса биологического самовосстановления находятся в прямой зависимости от ряда фундаментальных биологических характеристик применяемого микробного штамма. К числу наиболее значимых параметров относятся: уровень ферментативной активности уреазы, определяющий скорость гидролиза мочевины; кинетика роста микробной культуры; устойчивость к длительному воздействию высоких значений pH, а также общая продуктивность процесса биоминерализации. Согласно данным современных исследований, синергетическое применение бактериальных культур (например, штамма *Bacillus subtilis*) совместно с микрокремнеземом приводит к положительному эффекту. Помимо прямого залечивания трещин за счет осаждения карбоната кальция, наблюдается изменение микроструктуры цементного камня – уплотнение порового пространства и формирование более однородной и плотной гидратной фазы. Этот синергетический эффект не только восстанавливает целостность материала, но и приводит к существенному повышению его прочностных характеристик и долговечности [16].

Бактерии, относящиеся к роду *Bacillus*, являются грамположительными палочковидными микроорганизмами, обладающими фундаментальной способностью к образованию эндоспор. Эти специализированные структуры демонстрируют исключительную резистентность к широкому спектру экстремальных условий внешней среды, обеспечивая микроорганизмам выживаемость при критических температурных колебаниях, интенсивном ультрафиолетовом облучении, химическом стрессе и выраженном дефиците питательных ресурсов. С морфологической точки зрения, клетки бактерий *Bacillus* имеют прямую или незначительно изогнутую конфигурацию, что является одним из факторов, способствующих их успешной колонизации и адаптации в разнородных экосистемах [17].

Важнейшей физиологической особенностью бактерий рода *Bacillus* является их статус факультативных анаэробов. Данная метаболическая пластичность позволяет им осуществлять жизнедеятельность как в аэробных, так и в анаэробных условиях, переключаясь между различными биохимическими путями генерации энергии. Подобная адаптационная способность определила их повсеместное распространение и обитание в широком диапазоне экологических ниш – от почвенных покровов и водных резервуаров до высокоспециализированных и стрессовых сред, включая промышленные стоки.

Параллельно в ходе научных изысканий была обнаружена существенная сложность, касающаяся точной таксономической идентификации природных изолятов бактерий этого рода. Наблюдаемые варианты зачастую демонстрируют различие биологических свойств, оставаясь при этом филогенетически близкими к другим установленным видам, что требует применения методов молекулярной генетики для их дифференциации [18]. Кроме того, именно метаболическое разнообразие и пластичность этих микроорганизмов заложены в основу их высокой выживаемости и функциональной эффективности в изменчивых условиях.



Отдельного внимания заслуживает грамположительная бактерия *Bacillus subtilis* (*B. Subtilis*, см. рис. 1), которая признана непатогенной и практически безопасной для человека и животных. *B. subtilis* обладает высокоэффективной системой внеклеточной секреции белков и характеризуется отсутствием синтеза токсичных или опасных побочных продуктов метаболизма. Благодаря комбинации этих уникальных свойств штаммы *B. subtilis* нашли масштабное применение в качестве пробиотиков в ветеринарии и медицине, а также используются в различных отраслях промышленности в качестве сверхпродуцентов ряда целевых продуктов – иммуноактивных факторов, гидролитических ферментов, незаменимых аминокислот и витаминов [19, 20]. Этот комплекс полезных характеристик определяет *B. subtilis* как перспективного кандидата для биотехнологических превращений в строительной индустрии, в частности, создания самовосстанавливающихся цементных композитов.

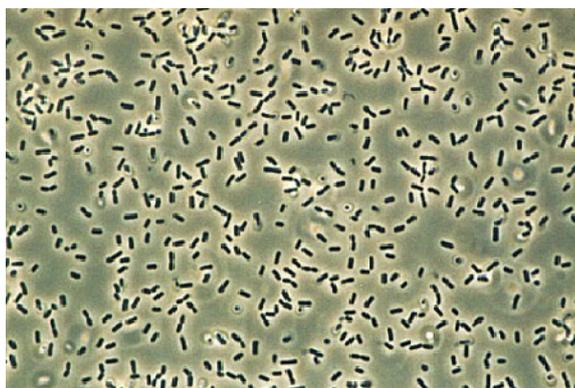


Рис. 1. *Bacillus Subtilis* под микроскопом [21]

Fig. 1. *Bacillus Subtilis* under microscope [21]

Исследования подтверждают, что биодобавки на основе бактерий *Bacillus subtilis* [4, 22] имеют значительный потенциал для автономного залечивания микротрещин, формирующихся в строительных конструкциях под воздействием механических нагрузок и агрессивных факторов внешней среды. Процесс биовосстановления инициируется при контакте бактерий с питательным субстратом, таким как лактат кальция. В ходе своей метаболической активности *Bacillus subtilis* индуцирует осаждение карбоната кальция (кальцита) [23, 24], который в дальнейшем кристаллизуется в полостях дефектов, эффективно заполняя их и постепенно восстанавливая структурную сплошность и монолитность материала [25].

Одним из наиболее значимых барьеров на пути коммерциализации биологического самовосстановления бетона является экстремальная щелочность цементной матрицы, создающая неблагоприятные условия для жизнедеятельности микроорганизмов. Физиологический оптимум для метаболической активности штамма *Bacillus subtilis* 1 ограничен диапазоном рН 4.5-8.0, в то время как показатель кислотности среды в традиционных цементных системах стабильно превышает 11.5 [21]. Это фундаментальное противоречие между биологическими требованиями и параметрами эксплуатации приводит к существенному снижению прогнозируемой эффективности биозалечивания. Преодоление указанного ограничения требует разработки специализированных подходов, таких как предварительная адаптация культур или применение многоуровневых систем защиты, включая инкапсуляцию.

Ключевым звеном в механизме микробиально-индуцированного карбонатного осаждения является уреазы, катализирующая гидролиз мочевины с образованием аммиака и диоксида углерода. Последующая гидратация  $CO_2$  и диссоциация  $NH_3$  приводят к локальному защелачиванию микросреды и увеличению концентрации карбонат-ионов ( $CO_3^{2-}$ ), что в



присутствии катионов  $Ca^{2+}$  создает условия для гетерогенного нуклеогенеза и роста кристаллов карбоната кальция. Важно отметить, что ионы кальция не только выступают субстратом для реакции, но и выполняют сигнальную функцию, потенцируя клеточную активность на мембранном и цитоплазматическом уровнях [26]. Указанная комбинация физиологической пластичности и биохимической эффективности переводит бактерии рода *Bacillus* в ряд высокоперспективных агентов для создания инновационных строительных материалов с функцией автономного восстановления структурной целостности.

*Bacillus cereus* представляет собой грамположительную спорообразующую палочковидную бактерию, распространенную в природных экосистемах. Ключевым свойством этого микроорганизма является способность к формированию высокорезистентных эндоспор, обеспечивающих исключительную выживаемость в экстремальных условиях, включая температурные воздействия, дегидратацию и колебания кислотности среды [27].

В контексте строительной биотехнологии штаммы *Bacillus cereus* демонстрируют высокий потенциал, в первую очередь, благодаря выраженной уреазной активности и способности индуцировать микробное осаждение карбоната кальция (MICP). Исследования подтверждают их эффективность в процессах биоконсолидации трещин цементных материалов, где бактерии выступают в качестве активных агентов биоминерализации. Инкапсулируясь в защитные матрицы на основе пористых заполнителей или полимерных микрокапсул, споры *Bacillus cereus* сохраняют способность к метаболизму в высокощелочной среде цементного камня в течение длительного времени; их активация происходит при доступе влаги через образовавшиеся трещины [28].

Экспериментальные исследования демонстрируют, что применение штаммов *Bacillus cereus* позволяет эффективно залечивать трещины шириной до 0.8 мм. При этом образуется биогенный кальцит, который характеризуется плотной кристаллической структурой и высокой адгезией к поверхности цементной матрицы [29]. Синергетический эффект наблюдается при комбинации бактериальных культур, представленных на рис. 2, с минеральными добавками, такими как микрокремнезем, который не только улучшает условия бактериальной жизнедеятельности, но и способствует формированию однородной микроструктуры композита. Перспективность применения *B. cereus* в строительных материалах подтверждается исследованиями в области, где они используются для упрочнения и восстановления каменных конструкций, при сохранении устойчивой биоминерализующей активности в различных условиях эксплуатации [30].

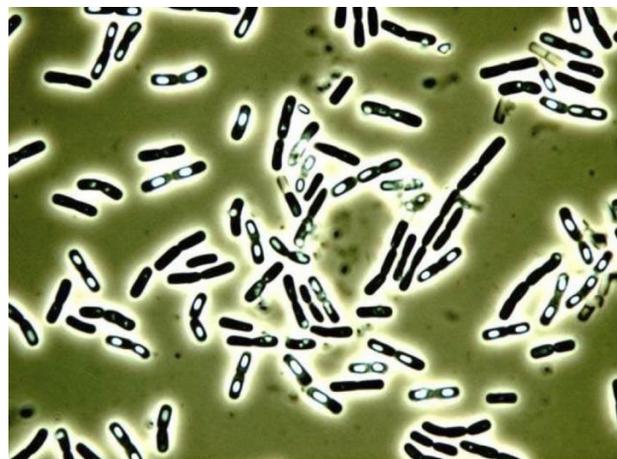


Рис. 2. *Bacillus Cereus* под микроскопом [31]

Fig. 2. *Bacillus Cereus* under microscope [31]



*Sporosarcina pasteurii* (рис. 3) представляет собой грамположительную хемоорганотрофную бактерию, которая с момента открытия претерпела таксономическую реклассификацию; ранее она называлась *Bacillus pasteurii*. Данный микроорганизм относится к классу *Bacillus* и является типичным представителем группы уробактерий – микроорганизмов, обладающих метаболической способностью к активному уреолитису [32].

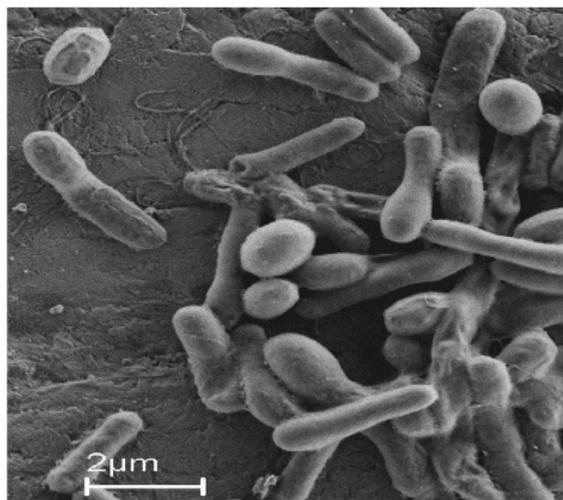


Рис. 3. *Bacillus pasteurii* под микроскопом [33]

Fig. 3. *Bacillus pasteurii* under microscope [33]

Фундаментальным свойством, определяющим интерес к *Sporosarcina pasteurii*, является ее способность продуцировать высокоактивный фермент уреазу. Этот фермент катализирует гидролиз мочевины в окружающей среде по реакции  $CO(NH_2)_2 + H_2O \rightarrow 2NH_3 + CO_2$ . Образующийся аммиак подщелачивает среду, что приводит к возрастанию pH. Одновременно углекислый газ ( $CO_2$ ), взаимодействуя с ионами аммония ( $NH_4^+$ ) и кальция ( $Ca^{2+}$ ) в растворе, инициирует сложную цепь химических превращений, приводящих к осаждению карбоната кальция ( $CaCO_3$ ) в виде кристаллов кальцита или арагонита. Этот процесс является краеугольным камнем в биотехнологических применениях данной бактерии [33].

Как и другие представители рода *Bacillus*, *Sporosarcina pasteurii* обладает способностью к спорообразованию в неблагоприятных условиях [34]. Эта особенность наделяет ее исключительной устойчивостью к экстремальным температурам, высушиванию, механическим нагрузкам и ультрафиолетовому излучению. В вегетативной форме клетки имеют палочковидную форму (бациллы) и являются подвижными. Способность формировать эндоспores выделяет данную бактерию как идеального кандидата для промышленного применения, так как споры можно транспортировать, хранить в сухом виде и активировать непосредственно на месте проведения работ, создавая биологический инокулят [35, 36].

Уникальное свойство бактерии *Sporosarcina pasteurii*, используемое в геотехнике, заключается в ее способности выступать в роли природного агента для скрепления влажных грунтов. При внесении в почву этот микроорганизм инициирует процесс, приводящий к слипанию и цементации твердых частиц. Данный феномен основан на биогеохимическом процессе – микробно-индуцированном осаждении карбоната кальция (MICP), который обеспечивает эффективную биологическую цементацию рыхлых грунтов.

Технология укрепления рыхлых оснований реализуется путем инфильтрации через массу суспензии бактерий и питательной среды, ключевыми компонентами которой являются мочевины и хлорид кальция. Процесс осуществляется в несколько стадий: первоначальная инфильтрация бактериальной суспензии для обеспечения равномерного распределения



микроорганизмов в пористой среде; внесение питательного раствора, содержащего мочевины и источник кальция; заключительная стадия инкубации для развития процесса биоминерализации [37].

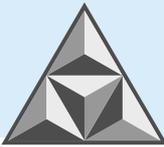
В результате метаболической деятельности бактерий на поверхности отдельных песчинок происходит локальное осаждение карбоната кальция. Механизм процесса включает комплекс биохимических реакций: фермент уреазы, продуцируемый бактериями, катализирует гидролиз мочевины с образованием аммиака и углекислого газа. Аммиак вызывает повышение pH среды, что способствует переходу бикарбонат-ионов в карбонат-ионы. В присутствии ионов кальция происходит кристаллизация карбоната кальция, преимущественно в форме кальцита. Формирующиеся кристаллы выполняют функцию естественного цементирующего агента, создавая прочные мостики между частицами и существенно повышая механическую прочность и несущую способность грунтового массива [38].

Экспериментальные исследования демонстрируют, что образующиеся карбонатные связи обеспечивают высокую адгезию к поверхности минеральных частиц и значительную прочность на сдвиг. Микроструктурный анализ методом сканирующей электронной микроскопии подтверждает формирование непрерывной сети кристаллических мостиков, эффективно связывающих частицы грунта между собой. При этом оптимальное содержание осажденного карбоната кальция составляет 2-4% от массы грунта, что приводит к значительному улучшению механических характеристик при одновременной экономичности процесса [37].

В результате биоцементации рыхлая почва приобретает свойства, сходные с песчаником – осадочной породой, состоящей из плотно сцементированных зерен кварца. Происходит трансформация рыхлого сыпучего материала в конгломерат с выраженной структурной прочностью. Экспериментальные исследования подтвердили, что протекающие биотехнологические процессы обеспечивают существенное увеличение жесткости на сдвиг и несущей способности строительных оснований [39]. Детальный анализ механических характеристик биоцементированных грунтов указывает на увеличение модуля деформации в 2-3 раза по сравнению с исходным, рост прочности на одноосное сжатие – в 4-8 раз. При этом отмечается сохранение фильтрационной способности материала, что имеет *crucial importance* для дренажных характеристик укрепленных массивов. Технология демонстрирует особую эффективность при укреплении песчаных грунтов с коэффициентом фильтрации  $10^{-3}$ – $10^{-5}$  м·с<sup>-1</sup>, где достигается равномерное распределение биогенного цемента [38].

Важным преимуществом биологической цементации является экологическая безопасность и возможность применения в сложных гидрогеологических условиях. Технология позволяет укреплять грунты в непосредственной близости от существующих сооружений без вибрационных воздействий и может быть адаптирована для различных инженерно-геологических условий. Долговременные наблюдения подтверждают стабильность биоцементированных массивов не менее 5 лет без существенной деградации прочностных характеристик [39].

Благодаря безопасности и эффективности *Sporosarcina pasteurii* рассматривается в качестве перспективного экологически чистого биологического строительного агента. Потенциал бактерии не ограничивается геотехникой; научные изыскания демонстрируют возможность ее использования для создания инновационных композитов. Исследуется взаимодействие бактериальных культур с синтетическими полимерами и твердыми минералами, что позволяет формировать гибридные материалы, прочностные характеристики которых превосходят даже костную ткань.



Помимо широко известной *Sporosarcina pasteurii*, другой представитель этого рода – *Sporosarcina ureae* (рис. 4) демонстрирует не менее выдающуюся способность к индуцированному минералообразованию. Ключевым метаболическим процессом для данного микроорганизма также является гидролиз мочевины, катализируемый ферментом уреазой [17].

Хотя *Sporosarcina ureae* является высокоэффективным агентом биоминерализации, значительный интерес сфокусирован и на других представителях обширного рода *Bacillus* (к которому ранее относили и *S. pasteurii*).

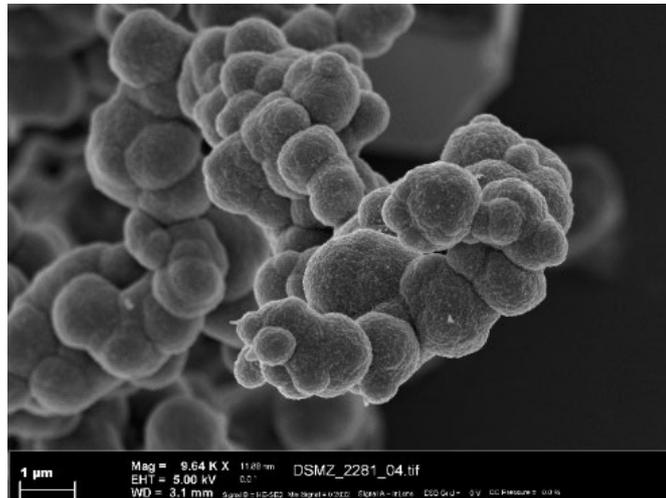


Рис. 4. *Sporosarcina ureae* под микроскопом [40]

Fig. 4. *Sporosarcina ureae* under microscope [40]

Многие виды этого рода, такие как *Bacillus sphaericus*, *Bacillus cohnii* и *Bacillus pseudofirmus*, обладают схожими метаболическими способностями [41]. Их изучение открывает путь к созданию универсальных и адаптируемых биотехнологий. Исследования показывают, что штаммы *Cytobacillus horneckiae* и новый вид *Sutcliffeiella* сохраняют жизнеспособность в бетонной матрице и обладают уреазной активностью, индуцирующей биоминерализацию карбоната кальция [42].

Использование бактерий рода *Bacillus* рассматривается как безопасная и экологичная альтернатива традиционным химическим методам модификации бетона. В отличие от синтетических добавок, микробные агенты являются природными компонентами окружающей среды и не вносят в материал токсичные соединения [9].

Современные исследования демонстрируют разнообразие подходов к введению микроорганизмов в бетон. Наиболее распространенным методом является прямое добавление вегетативных клеток или спор в затворяющую воду, однако этот подход имеет ограниченную эффективность из-за высокой щелочности цементной среды. Альтернативной стратегией выступает использование иммобилизованных форм бактерий в пористых носителях. Исследования [14] показали эффективность инкапсуляции спор *Bacillus subtilis* в альгинате натрия, где образующиеся микрокапсулы диаметром 1-2 мм обеспечивают механическую защиту и постепенное высвобождение микроорганизмов.

Перспективным направлением является использование легких пористых заполнителей в качестве носителей. В [8] демонстрируется успешное применение керамзита, предварительно пропитанного бактериальной суспензией и питательными веществами. Такая система позволяет создать в объеме бетона распределенную сеть микрокапсул, обеспечивая локальную активацию биоминерализации при образовании трещин в любой точке конструкции.

Ключевым аспектом технологии является обеспечение жизнеспособности микроорганизмов в экстремальных условиях бетонной матрицы. Исследования [9] показывают, что инкапсуляция в полимерные гидрогели на основе желатина позволяет



поддерживать в течение 6 мес. метаболическую активность бактерий при pH до 12.5. Механизм защиты заключается в создании буферной зоны вокруг клетки и контроле диффузии ионов через полимерную матрицу.

Активация биологических процессов происходит при появлении трещин и проникновении влаги. Исследователями был предложен каскадный механизм активации: при растрескивании происходит разрушение защитных оболочек, высвобождение спор и их прорастание в присутствии воды и кислорода. Последующий метаболизм питательных веществ приводит к продуцированию уреазы и запуску процесса микробно-индуцированного осаждения карбоната кальция [8].

Эффективность самовосстановления напрямую зависит от состава питательных субстратов. Установлены преимущества комбинации инкапсулированных спор с лактатом кальция, который служит источником энергии для бактерий и одновременно субстратом для биоминерализации [14]. Исследования демонстрируют, что оптимальное соотношение C/N в питательной среде составляет 20:1, что обеспечивает максимальную скорость осаждения карбоната кальция [4].

Температурный режим существенно влияет на кинетику биологических процессов. Отмечается, что оптимальный диапазон температур для большинства продуцентов уреазы составляет 25-30°C [12]; при этом кратковременное ее повышение до 60°C не приводит к потере жизнеспособности инкапсулированных спор.

Методы оценки эффективности биологических систем самовосстановления включают комплекс физико-механических и микроструктурных исследований. Применяется методология, основанная на определении восстановления прочности материалов на сжатие, коэффициента водонепроницаемости и динамического модуля упругости после циклов повреждения-восстановления [14].

Долговечность систем оценивается путем ускоренных испытаний в агрессивных средах. Исследования [8] показывают, что правильно инкапсулированные бактериальные споры сохраняют жизнеспособность в течение 5 лет в условиях циклического замораживания-оттаивания и карбонизации. С применением электронной сканирующей микроскопии подтверждено образование плотных кристаллических структур карбоната кальция, интегрированных в цементную матрицу.

Современные исследования направлены на создание гибридных материалов, сочетающих биологические и химические механизмы самовосстановления. Изучают синергетический эффект от совместного использования бактериальных спор и наночастиц оксида железа, выполняющих роль катализаторов биоминерализации [10].

Перспективным направлением является разработка программируемых систем с контролируемым временем активации. Исследуются многослойные капсулы с различной прочностью оболочек, позволяющие осуществлять поэтапное высвобождение биологических агентов в зависимости от величины повреждения [12].

Современные исследования в области строительного материаловедения все чаще фокусируются на разработке интеллектуальных материалов, обладающих функцией самовосстановления. Среди различных биологических агентов, применяемых для этих целей, спорообразующие бактерии родов *Bacillus* и *Sporosarcina* зарекомендовали себя как наиболее эффективные и перспективные агенты для получения самовосстанавливающегося бетона (биобетона) [43]. Их ключевым преимуществом является исключительная устойчивость в агрессивной высокощелочной среде (pH = 12-13), характерной для цементной матрицы, где большинство микроорганизмов не выживает [44]. Эта устойчивость обеспечивается способностью данных бактерий переходить в латентное состояние, формируя эндоспоры,



которые могут сохранять жизнеспособность в экстремальных условиях на протяжении десятилетий.

Согласно комплексному анализу современных исследований [43], данный биологический процесс имеет впечатляющую эффективность. Кристаллические новообразования способны полностью заполнять микропоры и эффективно залечивать трещины шириной до 0.97 мм. Это приводит к ряду значительных улучшений физико-механических свойств восстановленного бетона:

1. *Повышение прочности.* Наблюдается существенный прирост прочности на сжатие, который, по данным различных исследований, составляет от 24% до 35% по сравнению с контрольными образцами, не подвергавшимися биовосстановлению;

2. *Снижение проницаемости.* Герметизация пор и трещин карбонатной пленкой резко снижает проницаемость бетонной матрицы; при этом уменьшается проникновение воды и агрессивных хлорид-ионов (главная причина коррозии стальной арматуры в железобетонных конструкциях);

3. *Увеличение долговечности.* Совокупность перечисленных факторов (восстановление целостности структуры, повышение прочности и снижение проницаемости) напрямую способствует значительному увеличению проектного срока службы бетонных конструкций, их устойчивости к циклам замораживания-оттаивания и воздействию карбонизации [43].

Таким образом, интеграция бактерий родов *Bacillus* и *Sporosarcina* в бетоны открывает путь к созданию новых, более долговечных и экологически устойчивых строительных материалов, способных к автономному восстановлению и продлению своего жизненного цикла.

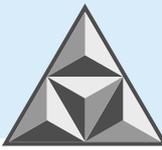
Для успешной реализации технологии самовосстанавливающегося бетона критически важным является решение задачи по сохранению жизнеспособности микроорганизмов в бетонной матрице. Современные исследования предлагают различные стратегии введения бактерий в состав строительного материала. Наиболее эффективным подходом признано не внесение вегетативных клеток или спор в бетонную смесь, а их предварительная иммобилизация на специальных носителях или инкапсуляция.

В качестве защитных матриц применяются высокопористые материалы, такие как диатомит, легкие пористые заполнители (керамзит, перлит), а также полимерные гидрогели и микрокапсулы. Эти носители выполняют двойную функцию: во-первых, они защищают микроорганизмы от механических повреждений на этапе перемешивания высоконапряженной бетонной смеси, а во-вторых, создают буферную зону, частично нивелируя разрушительное воздействие высокой щелочности среды ( $pH = 12-13$ ) в начальный период гидратации цемента. Такой подход позволяет не просто сохранить бактерии, но и продлить на десятилетия их жизнеспособность, обеспечивая долгосрочный потенциал самовосстановления конструкции [14, 42].

Наряду с бактериями, в защитные капсулы или непосредственно в состав бетона вводят питательные компоненты. Ключевыми элементами являются источник ионов кальция (лактат, нитрат или ацетат указанного металла) и мочевины, которые выступают субстратом для запуска процесса биоминерализации в момент активации бактерий влагой, проникающей через трещины [44].

Ключом к созданию эффективных и долговечных самовосстанавливающихся материалов является тщательный отбор целевых штаммов микроорганизмов. Биологические агенты, претендующие на интеграцию в бетон, должны соответствовать ряду строгих критериев, обусловленных спецификой среды их будущего обитания [14, 42]:

- *Способность к спорообразованию.* Это свойство является фундаментальным для длительного анабиотического сохранения в условиях дефицита питательных веществ и влаги.



Споры метаболически инертны и могут выживать в неблагоприятных условиях десятилетиями, активируясь только при появлении воды и кислорода в трещине;

- *Высокая алкалофильность и устойчивость при pH = 12-13.* Штамм должен быть толерантен к экстремально щелочной среде цементного камня, которая является причиной гибели большинства микроорганизмов;

- *Наличие механизмов биоминерализации.* Наиболее изученным является высокая уреазная активность, обеспечивающая гидролиз мочевины с последующим осаждением карбоната кальция. Перспективными также считаются штаммы, использующие альтернативные пути с участием фермента карбоангидразы, которая катализирует гидратацию диоксида углерода с образованием карбонат-ионов [14, 44];

- *Термостойкость.* Бактерии должны выдерживать воздействие температур до 60-70°C, которые могут возникать в бетоне в процессе гидратации цемента или при эксплуатации в жарком климате.

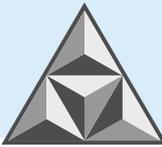
Исследования показывают, что культуры, обладающие необходимым комплексом свойств, в природных условиях встречаются редко. В связи с этим особый научный интерес представляют микробные сообщества, адаптировавшиеся к экстремальным условиям искусственной среды. Выдвигается научная гипотеза о том, что бактерии, сохранившие жизнеспособность в «цементной матрице» исторических и археологических сооружений на протяжении столетий, могут обладать уникальными адаптационными механизмами [42].

Переход от лабораторных исследований к широкомасштабному применению биологического самовосстановления бетона требует решения ряда технологических и экономических задач. Ключевым вопросом является разработка рентабельных методов производства и введения биодобавок в бетонную смесь в промышленных масштабах.

Одним из перспективных направлений является использование в качестве носителей для бактерий и питательных веществ легких пористых заполнителей, таких как керамзит или перлит [8, 29]. Эти материалы не только обеспечивают эффективную защиту микроорганизмов, но и являются стандартным компонентом легких бетонов, что упрощает их интеграцию в существующие технологические процессы. Исследования показывают, что предварительно насыщенные бактериальными спорами и питательными субстратами керамзитовые гранулы могут равномерно распределяться в бетонной смеси, обеспечивая объемный эффект самовосстановления [11].

Важным аспектом является также влияние биодобавок на физико-механические свойства бетона на стадии твердения. Многочисленные эксперименты подтверждают, что правильно подобранные и инкапсулированные бактериальные культуры не оказывают негативного воздействия на прочностные характеристики бетона, а в ряде случаев, благодаря уплотняющему эффекту биоминерализации, даже улучшают их [5, 6, 16]. Так, было установлено, что для бетона с добавлением *Bacillus subtilis* уже на 28-е сутки твердения прочность на сжатие увеличивается на 10-15% по сравнению с контрольными образцами [23].

Экономическая целесообразность технологии оценивается с позиции жизненного цикла конструкций. Хотя первоначальная стоимость биобетона может быть на 15-30% выше по сравнению с традиционным строительным материалом, значительное увеличение срока службы, сокращение затрат на ремонт и техническое обслуживание определяют его применение как экономически выгодное решение при строительстве таких объектов инфраструктуры, как мосты, тоннели, гидротехнические сооружения и высотные здания [8, 11]. Расчеты показывают, что экономия средств в течение 50-летнего жизненного цикла конструкции может достигать 40-50% за счет снижения эксплуатационных расходов [14].



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Перед внедрением технологии биологического восстановления цементного камня стоят серьезные вызовы. К ним относятся стандартизация биодобавок, прогнозирование долгосрочной эффективности их действия в различных климатических условиях, а также разработка нормативной базы, регламентирующей применение биобетона в строительстве.

Наиболее перспективными направлениями дальнейших исследований являются:

- генетический инжиниринг штаммов для усиления их уреазной активности и устойчивости в экстремальных условиях;
- разработка «умных» капсул с контролируемым временем высвобождения питательных веществ;
- создание гибридных систем, комбинирующих бактериальное самовосстановление с другими технологиями, например, использованием полимерных микрокапсул или волокон, наполненных герметиком;
- изучение синергии с использованием промышленных отходов, таких как шлаки и зола-унос, для создания экологически чистых композитов.

Современная строительная индустрия стоит на пороге биотехнологической революции, и самовосстанавливающийся бетон является одним из наиболее ярких ее символов. Представленные данные демонстрируют, что бактерии родов *Bacillus* и *Sporosarcina*, благодаря уникальному сочетанию спорообразования, алкалофильности и высокой метаболической активности, представляют собой ценный инструмент, применяемый для коренного улучшения эксплуатационных свойств бетона.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Jaf D.** A review on self-healing concrete: A biological approach // *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology (IJARET)*. 2020. Vol. 11. Iss. 4. P. 1-10. DOI: 10.5937/ior2301001J.
2. **Строкова В.В., Власов Д.Ю., Франк-Каменецкая О.В., Духанина У.Н., Балицкий Д.А.** Применение микробной карбонатной биоминерализации в биотехнологиях создания и восстановления строительных материалов: анализ состояния и перспективы развития // *Строительные материалы*. 2019. № 9. С. 83. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-774-9-83-103.
3. **Баженов Ю.М., Ерофеев В.Т., Салман А.Д.С.Д., Смирнов В.Ф., Фомичев В.Т.** Технология самовосстановления железобетонных конструкций с помощью микроорганизмов // *Русский инженер*. 2018. № 4 (61). С. 46-48.
4. **Jonkers H.M., Thijssen A., van Breugel K.** Bacteria mediated remediation of concrete structures // *Proceedings of the second international symposium on service life design for infrastructures*. 2010. P. 833-840.
5. **Ghosh P., Mandal S., Chattopadhyay B.D., Pal C.** Use of microorganism to improve the strength of cement mortar // *Cement and Concrete Research*. 2005. Vol. 35. Iss. 10. P. 1980-1983. DOI: 10.1016/j.cemconres.2005.03.005.
6. **Ghosh S., Biswas M., Chattopadhyay B.D., Mandal S.** Microbial activity on the microstructure of bacteria modified mortar // *Cement and Concrete Composites*. 2009. Vol. 31. Iss. 2. P. 93-98. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2009.01.001.
7. **Dhami N.K., Reddy M.S., Mukherjee A.** Biomineralization of calcium carbonates and their engineered applications : a review // *Frontiers in Microbiology*. 2013. No. 4. DOI: 10.3389/fmicb.2013.00314
8. **Wang J.Y., Snoeck D., Van Vlierberghe S., Verstraete W., De Belie N.** Application of hydrogel encapsulated carbonate precipitating bacteria for approaching a realistic self-healing in concrete // *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 68. P. 110-119. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.06.018.
9. **Seifan M., Ebrahiminezhad A., Ghasemi Y., Berenjian A.** Microbial calcium carbonate precipitation with high affinity to fill the concrete pore space: nanobiotechnological approach // *Bioprocess and Biosystems Engineering*. 2018. Vol. 42. Iss. 1. P. 37-46. DOI: 10.1007/s00449-018-2011-3.



10. **Seifan M., Sarmah A.K., Samani A.K., Ebrahimezhad A., Ghasemi Y., Berenjian A.** Mechanical properties of bio self-healing concrete containing immobilized bacteria with iron oxide nanoparticles // *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2018. Vol. 102. Iss. 10. P. 4489-4498. DOI: 10.1007/s00253-018-8913-9.
11. **Иноземцев С.С., До Т.Ч.** Состояние и перспективы развития технологии самовосстанавливающихся дорожных материалов // *Вестник МГСУ*. 2020. Т. 15. № 10. С. 1407-1424. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.10.1407-1424.
12. **Wang J.Y., Soens H., Verstraete W., De Belie N.** Self-healing concrete by use of microencapsulated bacterial spores // *Cement and Concrete Research*. 2014. Vol. 56. P. 139-152. DOI: 10.1016/j.cemconres.2013.11.009
13. **Nielsen S.D., Koren K., Löbmann K., Hinge M., Scoma A., Kjeldsen K.U. et al.** Constraints on CaCO<sub>3</sub> precipitation in superabsorbent polymer by aerobic bacteria // *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2019. Vol. 104. Iss. 1. P. 365-375. DOI: 10.1007/s00253-019-10215-4.
14. **Черных Т.Н., Горбачевских К.А., Криушин М.В., Орлов А.А., Комелькова М.В., Платковский П.О.** Биоминеральные добавки для самозалечивания бетона // *Вестник МГСУ*. 2024. Т. 19. Вып. 4. С. 569-579. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.569-579
15. **Ерофеев В.Т., Аль Дулайми Салман Давуд Салман, Смирнов В.Ф.** Бактерии для получения самовосстанавливающихся бетонов // *Интернет-журнал «Транспортные сооружения»*. 2018. Т. 5. № 4. DOI: 10.15862/07SATS418.
16. **Qtiashat D., Al Khazaleh M.** Influence of Bacillus Subtilis Bacteria on Strength and Durability of Concrete with Silica Fume // *Civil and Environmental Engineering*. 2022. Vol. 18. Iss. 1. P. 254-264. DOI:10.28991/CEJ-2025-011-05-013.
17. **Журавская Н.Е., Шевченко К.В., Журавский Д.А.** Биоповреждения бетонных конструкций, мероприятия по восстановлению // *Проблемы современного строительства. Мат. Межд. науч.-техн. конф.* Минск, 28 мая 2020 г. С. 231-232.
18. **Симонов А.А., Алфимов А.В., Бабакулиев Р.** Исследование механизма самовосстановления микротрещин в бетонных конструкциях с использованием бактерий // *Сб. науч. ст. Всерос. молод. науч. конф. «За нами будущее: взгляд молодых ученых на инновационное развитие общества»*. 2020. Т. 4. С. 81-86. EDN: DSVVSS.
19. **Карпов Д.С., Домашин А.И., Котлов М.И., Осипова П.Д. и др.** Биотехнологический потенциал штамма Bacillus subtilis 20 // *Молекулярная биология*, 2020. Т. 54. № 1. С. 137-145. DOI:10.31857/S0026898420010085.
20. **Van Dijk J.M., Hecker M.** Bacillus subtilis: From soil bacterium to super-secreting cell factory // *Microbial Cell Factories*. 2013. DOI:10.1186/1475-2859-12-3.
21. **Функциональная гастроэнтерология: Bacillus subtilis (сенная палочка)** [Электронный ресурс]. URL: <https://gastroscan.ru/handbook/144/5648> (дата обращения 20.10.2025).
22. **Аль Дулайми С.Д.С.** Самовосстанавливающиеся бетоны, модифицированные микробиологической добавкой : дисс. канд. техн. наук. М., 2019. 310 с. EDN: OVDXMN.
23. **Joshi K.A., Kumthekar M.B., Ghodake V.P.** Bacillus Subtilis Bacteria impregnation in concrete for enhancement in compressive strength // *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2016. Vol. 3. Iss. 5. P. 1229-1234.
24. **De Leeuw N.H., Parker S.C.** Surface structure and morphology of calcium carbonate polymorphs calcite, aragonite, and vaterite: an atomistic approach // *The Journal of Physical Chemistry B*. 1998. Vol. 102. Iss. 16. P. 2914-2922. DOI: 10.1021/jp973210f.
25. **Jongvivatsakul P., Janprasit K., Nuaklong P., Pungrasmi W., Likitlersuang S.** Investigation of the crack healing performance in mortar using microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) method // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 212. P. 737-744. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.035.
26. **Мальчевский В.А., Береговой В.А., Болдырев С.А., Капустин А.Е., Субботин А.М., Петров С.А.** Использование добавки экзометаболита микроорганизма Bacillus cereus, полученного из обводненных грунтов, в качестве пластификатора для улучшения прочности цементных растворов // *Байкал – Ворота в Азию. Мат. Межд. науч.-практ. конф. Улан-Удэ*, 2021. С. 122-126. DOI:10.31554/978-5-7925-0605-3-2021-122-126.



27. *Bacillus cereus* – Микробиологический контроль [Электронный ресурс]. URL: <https://mibio.ru/mikrobiologiya/mikrobiologicheskij-kontrol-produktov-bacillus-cereus/> (дата обращения 20.10.2025).
28. **Achal V., Mukherjee A., Reddy, M.S.** Microbial concrete: A way to enhance the durability of building structures // *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2011. Vol. 23(6). P. 730-734. DOI:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000159.
29. **Xu J., Wang X.** Self-healing of concrete cracks by ceramsite-loaded microorganisms // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 1-12. DOI:10.1155/2018/5153041.
30. **Yang Y., Chu J., Cao B., Hanlong L.** Biocementation of soil using non-sterile enriched urease-producing bacteria from activated sludge. *Journal of Cleaner Production*. 2020. 262. 121315. DOI:10.1016/j.jclepro.2020.121315.
31. EurekaAlert!: *Bacillus cereus* under the Microscope [Электронный ресурс]. URL: <https://www.eurekaalert.org/multimedia/707853> (дата обращения 20.10.2025).
32. *Sporosarcina pasteurii* – Alchetron, The Free Social Encyclopedia [Электронный ресурс]. URL: <https://alchetron.com/Sporosarcina-pasteurii> (дата обращения 20.10.2025).
33. **Mobley H.L., Hausinger R.P.** Microbial ureases: significance, regulation, and molecular characterization // *Microbiological Rev.* 1989. P. 90-92. DOI:10.1128/MMBR.53.1.85-108.1989.
34. **Yoon J.-H., Lee K.-C., Weiss N., Kho Y.H., Kang K.H., Park Y.-H.** *Sporosarcina aquimarina* sp. nov., a bacterium isolated from seawater in Korea, and transfer of *Bacillus pasteurii* to the genus *Sporosarcina* // *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*. 2001. P. 1079. DOI:10.1099/00207713-51-3-1079.
35. **Mitchell A.C., Ferris F.G.** The coprecipitation of Sr into calcite precipitates induced by bacterial ureolysis in artificial groundwater: Temperature and kinetic dependence // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2005. P. 4201. DOI: 10.1016/j.gca.2005.03.014.
36. **Whiffin V.S., van Paassen L.A. & Harkes M.P.** Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique // *Geomicrobiology Journal*. 2007. P. 417. DOI:10.1080/01490450701436505.
37. **DeJong J.T., Mortensen B.M., Martinez B.C., Nelson D.C.** Bio-mediated soil improvement // *Ecological Engineering*. 2010. P. 201. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2008.12.029.
38. **Al Qabany A., Soga K. & Santamarina C.** Factors affecting efficiency of microbially induced calcite precipitation // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2012. P. 993. DOI:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000666.
39. **DeJong J.T., Martinez B.C., Ginn T.R., Hunt C., Major D., and Tanyu B.** Development of a Scaled Repeated Five-Spot Treatment Model for Examining Microbial Induced Calcite Precipitation Feasibility in Field Applications // *Geotechnical Testing Journal*. 2014. Vol. 37. № 3. P. 424-435. DOI:10.1520/ GTJ20130089. ISSN 0149-6115.
40. BacDive: *Sporosarcina ureae* DSM 2281 is a mesophilic bacterium of the family Caryophanaceae [Электронный ресурс]. URL: <https://bacdive.dsmz.de/strain/11990>.
41. **Baskar S., Baskar R., Mauclore L.** Microbially induced calcite precipitation in culture experiments: Possible origin for stalactites in the caves of the Meghalaya Plateau // *Current Sci*. 2006. P. 58.
42. **Чистяков В.А., Сидоренко Н.Г.** Живой бетон: как микроорганизмы помогают строительным материалам самовосстанавливаться // *Межд. науч.-практ. конф. «Состояние и перспективы развития фундаментальной и прикладной микробиологии»*, 24-25 сентября 2025 г. С. 3. DOI:10.5281/zenodo.17214973.
43. **Beskopylny A.N., Shcherban' E.M., Stel'makh S.A., Shilov A.A., Chernil'nik A., El'shaeva D., Chistyakov V.A.** Analysis of the Current State of Research on Bio-Healing Concrete (Bioconcrete) // *Materials (Basel)*. 2024 Sep 13;17(18):4508. DOI:10.3390/ma17184508.
44. **Aramova O., Kornienko I., Chistyakov V., Alliluyeva E., Kirsanova T.** Properties of the urease enzyme as a component of self-healing concrete: Rev. // *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2024; 113:11310. DOI: 10.4123/CUBS.113.10.

Поступила в редакцию 15.12.2026

Одобрена после рецензирования 17.01.2026

Принята к опубликованию 10.03.2026



## REFERENCES

1. **Jaf, D.** A review on self-healing concrete: A biological approach (2020), *Inter. J. Adv. Res. Eng. Technol. (IJARET)*, vol. 11, iss. 4, pp. 1-10. DOI:10.5937/ror2301001J.
2. **Stroikova, V.V., Vlasov, D.Yu., Frank-Kamenetskaya, O.V., Dukhanina, U.N. and Balitsky, D.A.** (2019), Application of microbial carbonate biomineralization in biotechnologies for the creation and restoration of building materials: analysis of the state and development prospects, *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*, no. 9, p. 83. DOI: 10.31659/0585-430X-2019 774 9 83 103 (in Russian).
3. **Bazhenov, Yu.M., Erofeev, V.T., Salman, A.D.S.D., Smirnov, V.F. and Fomichev, V.T.** (2018), Technology of self-healing of reinforced concrete structures using microorganisms, *Russkij Inzhener [Russian Engineer]*, vol. 4, no. 61, pp. 46-48 (in Russian).
4. **Jonkers, H.M., Thijssen, A. and van Breugel, K.** (2010), Bacteria mediated remediation of concrete structures, *Proc. sec. inter. symposium on service life design for infrastructures*, pp. 833-840.
5. **Ghosh, P., Mandal, S., Chattopadhyay, B.D. and Pal, C.** (2005), Use of microorganism to improve the strength of cement mortar, *Cement and Concrete Res.*, vol. 35, iss. 10, pp. 1980-1983. DOI: 10.1016/j.cemconres.2005.03.005.
6. **Ghosh, S., Biswas, M., Chattopadhyay, B.D. and Mandal, S.** (2009), Microbial activity on the microstructure of bacteria modified mortar, *Cement and Concrete Composites*, vol. 31, iss. 2, pp. 93-98. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2009.01.001.
7. **Dhami, N.K., Reddy, M.S. and Mukherjee, A.** (2013), Biomineralization of calcium carbonates and their engineered applications: a rev., *Frontiers in Microbiology*, no. 4. DOI: 10.3389/fmicb.2013.00314.
8. **Wang, J.Y., Snoeck, D., van Vlierberghe, S., Verstraete, W. and De Belie, N.** (2014), Application of hydrogel encapsulated carbonate precipitating bacteria for approaching a realistic self-healing in concrete, *Construction and Building Mat.*, vol. 68, pp. 110-119. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.06.018.
9. **Seifan, M., Ebrahiminezhad, A., Ghasemi, Y. and Berenjian, A.** (2018), Microbial calcium carbonate precipitation with high affinity to fill the concrete pore space: nanobiotechnological approach, *Bioprocess and Biosystems Eng.*, vol. 42, iss. 1, pp. 37-46. DOI: 10.1007/s00449 018 2011 3.
10. **Seifan, M., Sarmah, A.K., Samani, A.K., Ebrahiminezhad, A., Ghasemi, Y. and Berenjian, A.** (2018), Mechanical properties of bio self-healing concrete containing immobilized bacteria with iron oxide nanoparticles, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 102, iss. 10, pp. 4489-4498. DOI: 10.1007/s00253 018 8913 9
11. **Inozemtsev, S.S. and Do, T.Ch.** State and prospects of development of self-healing road materials technology (2020), *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*, vol. 15, no. 10, pp. 1407-1424. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.10.1407-1424 (in Russian).
12. **Wang, J.Y., Soens, H., Verstraete, W. and De Belie, N.** (2014), Self-healing concrete by use of microencapsulated bacterial spores, *Cement and Concrete Res.*, vol. 56, pp. 139-152. DOI: 10.1016/j.cemconres.2013.11.009.
13. **Nielsen, S.D., Koren, K., Löbmann, K., Hinge, M., Scoma, A. and Kjeldsen, K.U. et al.** (2019), Constraints on CaCO<sub>3</sub> precipitation in superabsorbent polymer by aerobic bacteria, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 104, iss. 1, pp. 365-375. DOI: 10.1007/s00253 019 10215 4.
14. **Chernykh, T.N., Gorbachevskikh, K.A., Kriushin, M.V., Orlov, A.A., Komelkova, M.V. and Platkovskiy, P.O.** (2024), Biomineral additives for self-healing concrete, *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*, vol. 19, iss. 4, pp. 569-579. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.569-579 (in Russian).
15. **Erofeev, V.T., Al Dulaimi Salman, Daoud Salman and Smirnov, V.F.** (2018), Bacteria for producing self-healing concretes, *Int.-zhurn. «Transportnye sooruzheniya» [Online J. "Transport Structures"]*, vol. 5, no. 4. DOI: 10.15862/07SATS418 (in Russian).
16. **Qtiahat, D. and Al Khazaleh, M.** (2022), Influence of Bacillus Subtilis Bacteria on Strength and Durability of Concrete with Silica Fume, *Civ. Envir.Eng.*, vol. 18, iss. 1, pp. 254-264. DOI:10.28991/CEJ-2025-011-05-013.
17. **Zhuravskaya, N.E., Shevchenko, K.V. and Zhuravsky, D.A.** (2020), Biodamage of concrete structures, restoration measures, *Problemy sovremennogo stroitel'stva. Mat. Mezhd. nauch.-tekhn. konf. [Problems of Modern Construction. Materials of the International Scientific and Technical Conference]*, Minsk, May 28, pp. 231-232 (in Russian).



18. **Simonov, A.A., Alfimov, A.V. and Babakuliev R.** (2020), Study of the mechanism of self-healing of microcracks in concrete structures using bacteria, *Sb. nauch. st. Vseross. molod. nauch. konf. «Za nami budushchee: vzglyad molodykh uchenykh na innovatsionnoe razvitie obshchestva» [Coll. sci. art. All-Russ. Youth Sci. Conf. "The Future is Ours: The View of Young Scientists on the Innovative Development of Society"]*, vol. 4, pp. 81-86 (in Russian).
19. **Karpov, D.S., Domashin, A.I., Kotlov, M.I. and Osipova, P.D. et al.** (2020), Biotechnological potential of the *Bacillus subtilis* 20 strain, *Molekulyarnaya Biologiya [Molecular Biology]*, vol. 54, no. 1, pp. 137-145. DOI:10.31857/S0026898420010085 (in Russian).
20. **Van Dijk, J.M. and Hecker, M.** (2013), *Bacillus subtilis*: From soil bacterium to super-secreting cell factory, *Microb. Cell Fact.* DOI:10.1186/1475-2859-12-3.
21. Functional Gastroenterology: *Bacillus subtilis* (hay bacillus) [Electronic]. Available at: <https://gastroscan.ru/handbook/144/5648> (accessed 20.10.2025) (in Russian).
22. **Al Dulaimi, S.D.S.** Self-healing concretes modified with a microbiological additive: diss. ... cand. tech. sci. M., 2019. 310 p.
23. **Joshi, K.A., Kumthekar, M.B. and Ghodake, V.P.** (2016), *Bacillus Subtilis* Bacteria impregnation in concrete for enhancement in compressive strength, *Inter. Res. J. Eng. Tech.*, vol. 3. iss. 5, pp. 1229-1234.
24. **De Leeuw, N.H. and Parker, S.C.** (1998), Surface structure and morphology of calcium carbonate polymorphs calcite, aragonite, and vaterite: an atomistic approach, *J. Phys. Chem. Ser. B*, vol. 102, iss. 16, pp. 2914-2922. DOI: 10.1021/jp973210f.
25. **Jongvivatsakul, P., Janpravit, K., Nuaklong, P., Pungrasmi, W. and Likitlersuang, S.** (2019), Investigation of the crack healing performance in mortar using microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) method, *Construction and Building Materials*, vol. 212, pp. 737-744. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.035
26. **Malchevsky, V.A., Beregovoy, V.A., Boldyrev, S.A., Kapustin, A.E., Subbotin, A.M. and Petrov, S.A.** (2021), Use of an exometabolite additive of the microorganism *Bacillus cereus*, obtained from water-saturated soils, as a plasticizer to improve the strength of cement mortars, *Baikal – Vorota v Aziyu. Mat. Mezhd. nauch.-prakt. konf.*, Ulan-Ude, pp. 122-126. DOI:10.31554/978-5-7925-0605-3-2021-122-126 (in Russian).
27. *Bacillus cereus* – Microbiological control [Electronic]. Available at: <https://mibio.ru/mikrobiologiya/mikrobiologicheskij-kontrol-produktov-bacillus-cereus/> (accessed 20.10.2025) (in Russian).
28. **Achal, V., Mukherjee, A., and Reddy, M.S.** (2011), Microbial concrete: A way to enhance the durability of building structures, *J. Mat. Civ. Eng.*, vol. 23, no. 6, pp. 730-734. DOI:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000159.
29. **Xu, J., & Wang, X.** (2018), Self-healing of concrete cracks by ceramsite-loaded microorganisms, *Advances in Mat. Sci. Eng.*, vol. 1-12. DOI:10.1155/2018/5153041.
30. **Yang, Y., Chu, J., Cao, B. and Hanlong, L.** (2020), Biocementation of soil using non-sterile enriched urease-producing bacteria from activated sludge, *J. Clean. Prod.*, vol. 262, p. 121315. DOI:10.1016/j.jclepro.2020.121315.
31. EurekaAlert!: *Bacillus cereus* under the Microscope [Electronic]. Available at: <https://www.eurekaalert.org/multimedia/707853> (accessed 20.10.2025).
32. *Sporosarcina pasteurii* - Alchetron, The Free Social Encyclopedia [Electronic]. Available at: <https://alchetron.com/Sporosarcina-pasteurii> (accessed 20.10.2025).
33. **Mobley, H.L. and Hausinger, R.P.** (1989), Microbial ureases: significance, regulation, and molecular characterization, *Microbiol. Rev.*, pp. 90-92. DOI:10.1128/MMBR.53.1.85-108.
34. **Yoon, J.-H., Lee, K.-C., Weiss, N., Kho, Y. H., Kang, K. H. and Park, Y.-H.** (2001), *Sporosarcina aquimarina* sp. nov., a bacterium isolated from seawater in Korea, and transfer of *Bacillus pasteurii* to the genus *Sporosarcina*, *Inter. J. System. Evol. Microbiol.*, p. 1079. DOI:10.1099/00207713-51-3-1079.
35. **Mitchell, A.C. and Ferris, F.G.** (2005), The coprecipitation of Sr into calcite precipitates induced by bacterial ureolysis in artificial groundwater: Temperature and kinetic dependence, *Geochim. Cosmochim. Acta*, p. 4201. DOI:10.1016/j.gca.2005.03.014.
36. **Whiffin, V.S., van Paassen, L.A., and Harkes, M.P.** (2007), Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique, *Geomicrobiol. J.*, p. 417. DOI:10.1080/01490450701436505.



37. **DeJong, J.T., Mortensen, B.M., Martinez, B.C. and Nelson, D.C.** (2010), Bio-mediated soil improvement, *Ecolog. Eng.*, p. 201. DOI:10.1016/j.ecoleng.2008.12.029.
38. **Al Qabany, A., Soga, K. and Santamarina, C.** (2012), Factors affecting efficiency of microbially induced calcite precipitation, *J. Geotechn. Geoenviron. Eng.*, p. 993. DOI:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000666.
39. **DeJong, J. T., Martinez, B. C., Ginn, T. R., Hunt, C., Major, D., and Tanyu, B.** (2014), Development of a Scaled Repeated Five-Spot Treatment Model for Examining Microbial Induced Calcite Precipitation Feasibility in Field Applications, *Geotechn. Testing J.*, vol. 37, no. 3, pp. 424-435, DOI:10.1520/GTJ20130089. ISSN 0149-6115.
40. BacDive: *Sporosarcina ureae* DSM 2281 is a mesophilic bacterium of the family Caryophanaceae [Electronic]. Available at: <https://bacdive.dsmz.de/strain/11990> (accessed 20.10.2025).
41. **Baskar, S., Baskar, R. and Mauclaire, L.** (2006), Microbially induced calcite precipitation in culture experiments: Possible origin for stalactites in the caves of the Meghalaya Plateau, *Current Sci.*, p. 58.
42. **Chistyakov, V.A. and Sidorenko, N.G.** (2025), Living concrete: how microorganisms help building materials self-heal, *Mezhd. nauch.-prakt. konf. «Sostoyanie i perspektivy razvitiya fundamental'noj i prikladnoj mikrobiologii» [Inter. Sci. Pract. Conf. "State and Prospects of Development of Fundamental and Appl. Microbiology"]*, Sept. 24-25, p. 3. DOI:10.5281/zenodo.17214973 (in Russian).
43. **Beskopylny, A.N., Shcherban', E.M., Stel'makh, S.A., Shilov, A.A., Chernil'nik, A., El'shaeva, D. and Chistyakov, V.A.** (2024), Analysis of the Current State of Research on Bio-Healing Concrete (Bioconcrete), *Materials (Basel)*, September 13;17(18):4508. DOI:10.3390/ma17184508.
44. **Aramova, O., Kornienko, I., Chistyakov, V., Alliluyeva, E. and Kirsanova, T.** (2024), Properties of the urease enzyme as a component of self-healing concrete: Rev., *Constr. Uniq. Build. Struct.*; 113:11310. DOI: 10.4123/CUBS.113.10.

Received 15.12.2026

Approved 17.01.2026

Accepted 10.03.2026